

**Über ein bildgebendes
Ultraschallecho - Verfahren für die
Zerstörungsfreie Prüfung
von Betonbauteilen**

Von der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

von

Dipl.-Phys. Frithjof Wollbold

aus Hamm in Westfalen

Tag der Einreichung: 17. 02. 1998

Tag der mündlichen Prüfung: 21. 02. 2002

Vorsitzender des Prüfungsausschusses: Prof. Dr.-Ing. H. G. Schäfer

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Neisecke

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. U. Diederichs

- Elektronische Version -

*Format: Adobe™ Acrobat 4.05
(komprimierte Version LQ)*

English Title: Towards an Online-Imaging Ultrasound-Pulse-Echo-Method
applied for the Nondestructive Testing of Concrete Structures

Anmerkungen zur elektronischen Version:

- der Inhalt ist identisch zur Druckversion
- die Auflösung der Abbildungen wurde reduziert (kleinere Dateigröße)
- die Abbildungen werden daher nur schwarz-weiß wiedergegeben
- das Dokument ist „ nur lesbar “, darf daher frei weitergereicht werden
- eine Druckfreigabe / farbige Version ist beim Autor erhältlich
(via Internet www.wollbold.de)
- zur Betrachtung wird empfohlen: Adobe™ Acrobat Reader 4+, doppelseitig

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
<u>1. Einleitung</u>	1
<u>2. Physikalische Grundlagen der Ultraschallprüfung</u>	4
2.1. Schallfeldgrößen	4
2.1.1. Schwingung und Welle	4
2.1.2. Wellenarten	7
2.1.3. Schalldruck und Schallwellenwiderstand	9
2.1.4. Schallfeld eines ebenen, kreisförmigen Kolbenschwingers	11
2.2. Schallausbreitung	15
2.2.1. Schallschwächung	15
2.2.1.1. Divergenz	16
2.2.1.2. Streuung	16
2.2.1.3. Absorption und Dispersion	18
2.2.1.4. Gesamte Schallschwächung	19
2.2.2. Schallwellen an Grenzflächen	21
2.2.2.1. Reflexion und Durchlass	21
2.2.2.2. Schallübergang an verschiedenen Grenzflächen	25
<u>3. Ultraschallprüfung an mineralischen Baustoffen und Bindemitteln</u>	30
3.1. Durchschallungsverfahren	30
3.1.1. Ultraschallaufzeit-Verfahren	31
3.1.2. Ultraschallintensitäts-Verfahren	31
3.1.3. Ultraschallfrequenz-Analyse	33
3.2. Ultraschallecho-Verfahren	33
3.2.1. A-Bild	36
3.2.2. B-Bild	37
3.2.3. Rekonstruktion (C-Bild, D-Bild)	40
3.3. Impaktecho-Verfahren	41
3.4. Normen, Richtlinien, Merkblätter	43
<u>4. Untersuchungen zur Verbesserung der Ultraschall-Prüftechnik</u>	46
4.1. Aufbau und Modifizierung der Prüfeinrichtung	46
4.1.1. A-Bild-Darstellung, Laborbetrieb	46
4.1.2. B-Bild-Darstellung, Laborbetrieb	49
4.1.3. Integrierter Aufbau auch für den Praxiseinsatz	52
4.2. Klärung der Eigenschaften und Eignung handelsüblicher Prüfköpfe	54

4.3. Klärung der Eignung einer Elektro-Viskosen Flüssigkeit als neuartigem Koppelmittel	64
4.3.1. Voruntersuchungen	65
4.3.1.1. Herkömmliche Koppelmittel	65
4.3.1.2. Erstarrendes Koppelmittel	69
4.3.1.3. Folgerungen und Zielsetzung	71
4.3.2. Untersuchungen mit EVF	74
4.3.2.1. Hinweise zur EVF und deren Anwendung	74
4.3.2.2. Aufbau einer erweiterten Prüfeinrichtung	79
4.3.2.3. Versuchsaufbau und erkannte Probleme	84
4.3.2.4. Nachweis des mit EVF erzielbaren Effektes	89
4.3.3. Beurteilung der Eignung von EVF als Koppelmittel	93
<u>5. Einsatz des Prüfverfahrens unter Laborbedingungen</u>	97
5.1. Ermittlung des Auflösungsvermögens	97
5.1.1. Laterale Auflösung	97
5.1.2. Tiefenauflösung	100
5.2. Untersuchungen an praxisnahen Labor-Probekörpern	102
5.2.1. Untersuchungen an Probekörpern der BAM in Berlin	104
5.2.1.1. Bestimmung der Wanddicke	105
5.2.1.2. Ortung des Spannkanales	106
5.2.1.3. Ermittlung des Verfüllzustandes des Spannkanales	110
5.2.2. Untersuchungen an Probekörpern der BAST in Bergisch-Gladbach	112
5.2.2.1. Bestimmung der Wanddicke	114
5.2.2.2. Ortung des Spannkanales	115
5.2.2.3. Verfüllzustand der Spannkanaäle	119
5.2.2.4. Kiesnester um Spannkanaäle	120
5.2.2.5. Hohlstellen und weitere Kiesnester	120
5.2.3. Ergänzende Anmerkungen	121
<u>6. Einsatz des Prüfverfahrens an bestehenden Bauwerken</u>	122
6.1. Ortung von Gleitschalungskanälen	122
6.2. Untersuchung von Fundamentplatten	128
<u>7. Zusammenfassung</u>	133
7.1. Erreichter Entwicklungsstand und heutige Anwendungsgebiete	133
7.2. Anregungen für die weitere Forschung	136
<u>8. Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole</u>	139
<u>9. Literaturverzeichnis</u>	141
Anhang	155

1. Einleitung

Prüfungen mit Ultraschall werden seit etwa 60 Jahren auf sich ständig erweiternden Anwendungsgebieten durchgeführt. Physikalisch und technisch anspruchslöse Untersuchungen zur Materialcharakterisierung erfolgten zunächst durch einfachen Vergleich der Schalllaufzeiten in Werkstoffen. Die Messung erfolgte dabei mit getrennten Ultraschallsendern und -empfängern („Prüfköpfen“) in Durchschallung. In der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts konnten durch die schnelle Entwicklung neuer elektronischer Komponenten und verbesserte Prüfköpfe die Signifikanz der Ultraschallprüfung wie auch die Einsatzmöglichkeiten erheblich erweitert werden.

Eine wesentliche Akzeptanzsteigerung wurde, zunächst im Stahlbau, dadurch erzielt, dass Prüfverfahren nach dem Echo-Prinzip realisiert wurden, wodurch schnelle, manuelle Prüfungen von nur einer Seite des Werkstoffes mit einem einzigen, kombinierten Sende- und Empfangsprüfkopf ermöglicht wurden. Für die Stahlprüfung mit Ultraschall bei Frequenzen von 1 - 2MHz existieren heute umfangreiche Normen (z.B. DIN EN 583) und detaillierte Ausbildungsrichtlinien (z.B. DGZfP-Richtlinien A1-A4). Durch die Verwendung höherer Frequenzen ($\geq 10\text{MHz}$) konnte zudem das Auflösungsvermögen gegenüber sehr kleinen Defekten soweit gesteigert werden, dass heute auch anspruchsvollere Prüfungen z.B. an GFK-Laminaten im Flugzeugbau zu den Standardverfahren der Qualitätssicherung gehören.

Seit den 1980´er Jahren etablierten sich zusätzlich bildgebende Ultraschallverfahren insbesondere im Bereich der medizinischen Diagnostik. Durch den Einsatz von Spezialprüfköpfen und fortgeschrittenen Bildverarbeitungssystemen wurden einfach durchzuführende Untersuchungen mit hoher Aussagefähigkeit realisiert. Nur die Darstellung der „Messwerte“ im Echt(zeit-)bild ermöglicht dabei eine sinnvolle



BILD 1.1: Bildgebende Ultraschalldiagnostik [ALOKA2000]

Interpretation des Prüfergebnisses sogar für Nicht-Fachleute auf dem Gebiet der Prüftechnik selbst. Auch für das Gebiet der Ultraschallprüfung von Beton und mineralischen Baustoffen erschien es daher sinnvoll, Verfahren zu entwickeln, die unter Verwendung modernster Technik signifikante Prüfergebnisse bei einfacher Handhabbarkeit ermöglichen.

Im Bauwesen wurde die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung bis in die 1990´er Jahre nur selten in der Praxis angewendet [KRAUTKRÄMER1986], [DEUTSCH1997]. Aufgrund der Inhomogenität speziell des Baustoffes Beton (Zuschläge, Zementstein, Luftporen) unterscheidet sich das Schallausbreitungsverhalten wesentlich von dem aus der Stahlprüfung oder der Medizintechnik bekannten. Die starke Schallschwächung im Werkstoff macht es erforderlich, hohe Schallintensitäten bei deutlich geringeren Frequenzen ($< 250\text{kHz}$) einzusetzen. Aus physikalischen Gründen ist es dann unmöglich, den Schallstrahl zu fokussieren (s. KAP. 2). Darüberhinaus standen bis 1990 keine Prüfköpfe zur Verfügung, die hinreichend kurze und zugleich leistungsstarke Impulse zur Anwendung für Ultraschallecho-Verfahren erzeugen konnten.

Daher erfolgte in den meisten Fällen lediglich eine Messung der Laufzeit des Ultraschallimpulses in Durchschallung, nur in Einzelfällen wurde auch die im Baustoff auftretende Amplitudenschwächung (Schallintensität) [NEISECKE 1974] oder das Frequenzspektrum der Schallsignale [JONAS1996] berücksichtigt. Im Bereich der Ultraschallprüfung von Beton können aussagefähige Ergebnisse praktisch nur durch relative Messungen erreicht werden. Diese können sowohl zeitlich (z.B. beim Erstarren/Erhärten von Bindemitteln) als auch räumlich (z.B. durch Defektoskopie, Hohlräume, Verdichtungsmängel im Beton) erfolgen. Eine deutliche Erweiterung der Aussagekraft und Aussage-sicherheit könnte dann erreicht werden, wenn relative Veränderungen innerhalb eines Prüfbereiches durch ein bildgebendes Verfahren dargestellt werden, so dass auch kleinste relative Abweichungen erkannt werden können. Sofern die Prüfbilder in Echtzeit, z.B. direkt beim Bewegen eines Prüfkopfes auf der Bauteiloberfläche, dargestellt werden sollen, sind aus Gründen der

Handhabbarkeit nur Verfahren nach dem Echo-Prinzip anwendbar.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Prüftechnik basiert daher auf einem Ultraschallecho-Verfahren mit schneller Umsetzung der detektierten Ultraschallsignale einzelner, sog. A-Bilder ("Oszilloskopbilder") in farbcodierte, online-erzeugte B-Bilder (s. KAP.3). Die B-Bilder stehen somit unmittelbar "vor Ort" (in-situ) zur Auswertung bereit; zeitaufwendige, nachträglichen Berechnungen sind nicht erforderlich. Für die Prüfung signifikante Bereiche können sofort bestimmt und ggf. im Detail untersucht und protokolliert werden.

Da das B-Bild-Ultraschallecho-Verfahren hier erstmals am Werkstoff Beton mit dem Ultraschallprüfsystem NFUS 2000 der Fa. Ingenieurbüro Dr. Hillger [HILLGER1991] zur Anwendung kommen konnte, war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, dieses wichtige Verfahren für die Prüfung von Beton so weiter zu entwickeln, dass über den Laboreinsatz hinaus auch erfolgreiche Einsätze in der Baupraxis möglich werden. Hierfür wurden folgende Punkte als wichtig angesehen :

- Erweiterungen des Prüfsystems für die Ziele dieser Arbeit,
- Ermittlung und Implementierung der für den Werkstoff Beton optimalen Prüfparameter,
- Untersuchung verschiedener Prüfköpfe und Koppelmittel, insb.
- Untersuchung einer Elektro-Viskosen Flüssigkeit als Koppelmittel,
- Labor-Untersuchungen zur Aussagefähigkeit bei verschiedenen Prüfaufgaben und Prüfkörpern,
- praktischer Einsatz der Prüfeinrichtung an bestehenden Bauwerken.

Die nachfolgende Arbeit berichtet, nach einer kurzen Einführung in die Physik und die grundlegenden Begriffe und Verfahren der Ultraschallprüfung, über die für diese Aufgabenstellungen erzielten Ergebnisse.

2. Physikalische Grundlagen der Ultraschallprüfung

Im Folgenden wird ein Überblick über die Physik des Ultraschalls gegeben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den zum Verständnis dieser Arbeit erforderlichen Parametern für die Prüfung von mineralischen Baustoffen, insbesondere Beton. Allgemeine Einführungen finden sich u.a. in [MATTHIES1998] und [DGzFP1999], zur Vertiefung werden [KRAUTKRÄMER1986] sowie [DEUTSCH1997-1] empfohlen. Einen kurzen historischen Abriss gibt [NEISECKE1974].

2.1 Schallfeldgrößen

2.1.1 Schwingung und Welle

Unter dem Begriff „Schall“ versteht man die Ausbreitung elastomechanischer Schwingungen in Materie. Die Wellenausbreitung erfolgt über die elastische Kopplung der Materieteilchen, ein Massetransport findet somit nicht statt. Die Schwingung der Materieteilchen erfolgt ortsgebunden um ihre jeweilige Ruhelage. Den minimalen, räumlichen Abstand zweier gleicher Schwingungszustände kennzeichnet die Wellenlänge λ , den entsprechenden zeitlichen Abstand die Schwingungs- oder Periodendauer T . Für die Frequenz f gilt :

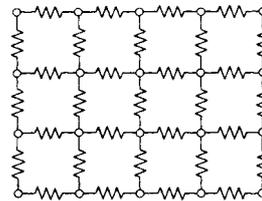


BILD 2.1: Modell eines elastischen Körpers [KRAUTKRÄMER1986]

$$f = 1/T \quad \text{mit der Einheit 1 Hertz (Hz)} \quad \{2.1\}$$

Als Ultraschall bezeichnet man dann Schallwellen mit Frequenzen von 20 kHz bis 1 GHz:

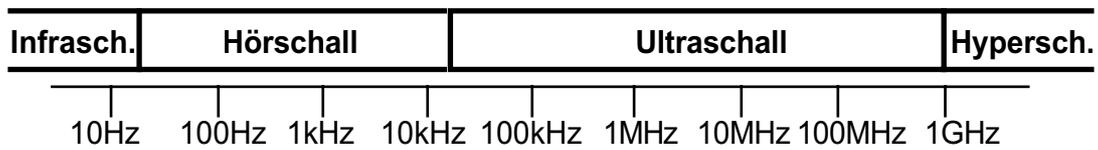


BILD 2.2: Schallbereiche

Für die Auslenkung eines Teilchens gilt die Bewegungsgleichung für harmonische Schwingungen:

$$\xi(t) = A \sin(\omega t) \quad \{2.2\}$$

Die maximale Auslenkung (Elongation) wird dabei durch die Amplitude **A**, der momentane Schwingungszustand in Bezug zur Ruhelage durch die Phase gekennzeichnet (ωt). Die Phase korreliert mit der Frequenz über:

$$\omega = 2\pi f \quad \{2.3\}$$

Unterschiedliche Auslenkungszustände der schwingenden Teilchen lassen sich durch die Phasendifferenz beschreiben. BILD 2.3 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Sobald sich eine Schwingung innerhalb eines Körpers durch die elastische Kopplung der Teilchen fortpflanzt, wird diese als Welle bezeichnet. Analog zur Beschreibung des Einzelteilchens in {2.2} und {2.3} lässt sich eine Welle zunächst durch ihre Amplitude charakterisieren, die i.d.R. elektronisch, z.B. am Oszilloskop, in Volt erfasst werden kann. Im idealen Fall einer monochromatischen Welle ($f = \text{const.}$) entspricht die Ausbreitungs- (Schall-) geschwindigkeit **v** der Phasengeschwindigkeit, d.h. der Ortsveränderung gleichphasiger Signalanteile pro Zeit.

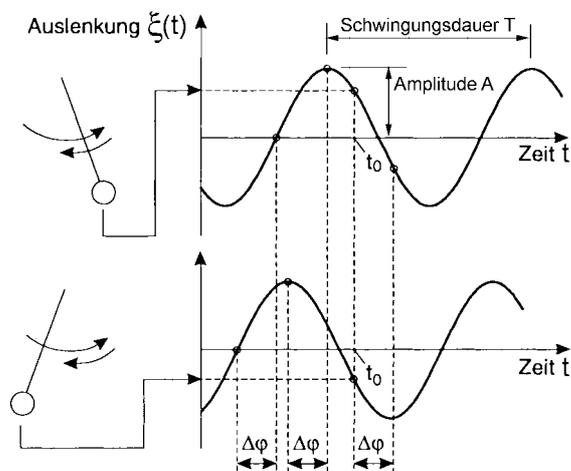


BILD 2.3: Beispiel für Amplitude und Phasendifferenz [MATTHIES1998]

Mit der allgemeinen Formel:

$$\mathbf{v} = \mathbf{s} / \mathbf{t} \quad \text{mit der Wegstrecke } \mathbf{s} \quad \{2.4\}$$

gilt für die Dauer einer Schwingungsperiode T : $s(T) = \lambda$. Durch Einsetzen von {2.1} in {2.4} folgt direkt:

$$\mathbf{v}_{\text{PHASE}} = \lambda / \mathbf{T} = \lambda \cdot \mathbf{f} \quad \{2.5\}$$

Diese (Phasen-) Ausbreitungsgeschwindigkeit ist eine Materialkonstante und charakteristisch für den betrachteten Werkstoff und seinen Zustand. Die Beziehung {2.5} ist allerdings explizit abhängig von der (theoretisch monochromatischen) Frequenz f , die in diesem Zusammenhang der Prüffrequenz bei der Ultraschall-Prüfung entspricht. Bei realen Werkstoffen ist es nicht möglich, eine Prüfung bei nur einer bestimmten Frequenz durchzuführen, vielmehr ist ein geeignetes Frequenzband zu ermitteln und anzuwenden. Dieses wird sowohl durch die am jeweiligen Prüfkörper physikalisch sinnvollen, als auch durch die von der technischen Konstruktion des Schallsenders vorgegebenen Frequenzbereiche bestimmt. In der Regel gelangt daher die so genannte Gruppengeschwindigkeit der Schallimpulse zur Auswertung, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Maximums \mathbf{v}_{MAX} der Superposition aller im Schallsignal vorhandenen Frequenzen. Den Zusammenhang zwischen $\mathbf{v}_{\text{PHASE}}$ und \mathbf{v}_{MAX} bezeichnet man als Dispersion. Für die meisten Fälle bei der Prüfung von Beton kann die Dispersion vernachlässigt werden.

Aus der Materialkonstanten \mathbf{v} und der verwendeten Prüffrequenz f ergibt sich nach {2.5} die Wellenlänge λ der eingestrahlten Schallwelle. Dieser Parameter bestimmt wesentlich das räumliche Auflösungsvermögen der betrachteten Prüfanordnung, da Defekte oder abweichende Materialeigenschaften i.d.R. nur dann detektiert werden können, wenn deren Größe die eingestrahlte Wellenlänge übersteigt (s.a. KAP. 5.1). Im Bereich der standardisierten Prüfung von Stahl ($v_L = 5900\text{m/s}$, $f \geq 1\text{MHz}$) können daher Wellenlängen unterhalb 6mm eingesetzt werden. Aufgrund der stark schallschwächenden Materialeigenschaften des inhomogenen Werkstoffes Beton (s. KAP. 2.2) müssen deutlich geringere Prüffrequenzen bis maximal 250kHz eingesetzt werden. Mit

$V_{L,BETON} = 4000\text{m/s}$ ergeben sich die in TAB. 2.1 dargestellten Anhaltswerte für die resultierenden Wellenlängen.

<i>Prüffrequenz</i>	<i>Wellenlänge</i>	<i>empfohlen für</i>
<i>in kHz</i>	<i>in mm</i>	<i>Werkstoff</i>
250	16	Zementestrich
200	20	Beton A/B8
100	40	Beton A/B16
50	80	Beton A/B32

TAB. 2.1: Wellenlängen bei der Betonprüfung (Anhaltswerte)

2.1.2 Wellenarten

Schallwellen breiten sich durch die elastische Übertragung von Bewegungsenergie von Teilchen zu Teilchen in Materie aus. Hierbei gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, wie die Teilchen, bezogen auf die Ausbreitungsrichtung, schwingen können.

Als Longitudinalwelle bezeichnet man eine sich ausbreitende Schwingung, wenn die Teilchen parallel zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Im Ausbreitungsmedium entstehen dabei örtliche Druckminima und -maxima. Weitere Bezeichnungen sind daher Druck-, Kompressions- oder Dichtewelle. Da die Energieübertragung über elastische Stöße erfolgt, können sich Longitudinalwellen in allen Medien, d.h. in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern ausbreiten.

Allein in Festkörpern ist es zusätzlich möglich, auch Querkräfte zu übertragen. Solche Wellen, bei denen die Teilchen senkrecht zur

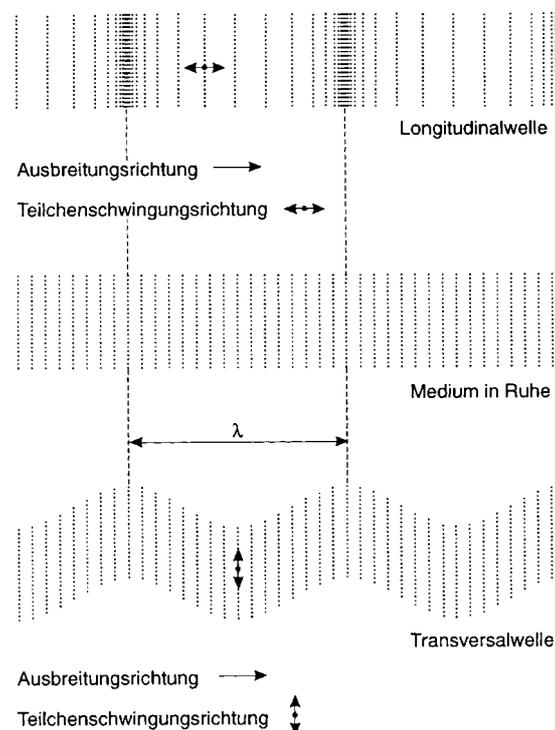
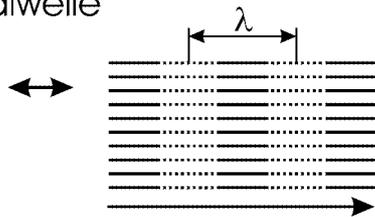


BILD 2.4: Wellen im unbegrenzten Medium [MATTHIES1998]

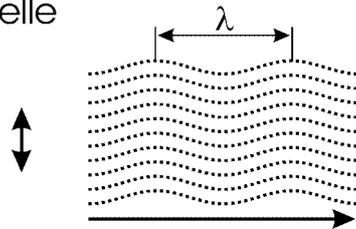
Ausbreitungsrichtung schwingen, werden Transversalwelle (auch Scher-, Schub- oder Querwelle) genannt. Die Ausbildung einer bevorzugten Schwingungsebene, d.h. die Polarisation der Welle, kann in den hier betrachteten Fällen vernachlässigt werden.

Longitudinalwelle



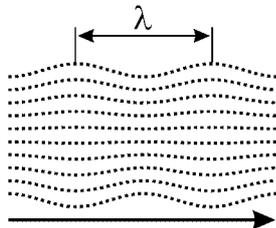
$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \{2.6\}$$

Transversalwelle



$$v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad \{2.7\}$$

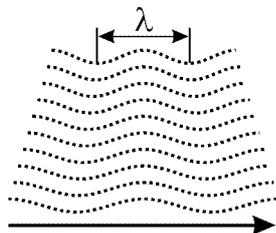
Dehnwelle



$$v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \{2.8\}$$

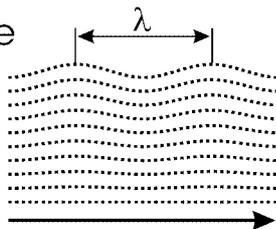
E: Elastizitätsmodul
 μ : Querdehnzahl
 ρ : Dichte
 A: Querschnittsfläche
 I: Flächenträgheitsmoment
 λ : Wellenlänge

Biegewelle



$$v_B = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{I}{A}} \quad \{2.9\}$$

Oberflächenwelle



$$v_O = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} v_T \quad \{2.10\}$$

BILD 2.5: Elastische Wellen in Festkörpern [DGzFP1999]

Monochrome („reine“) Longitudinal- bzw. Transversalwellen können sich im Prinzip nur in einem idealen, nicht begrenzten Medium ausbreiten. In allen praktischen Fällen treten weitere Wellenarten durch Überlagerung der reinen Schwingungsmoden hinzu. An Grenzflächen entstehen die vorwiegend transversalen Oberflächen- (Rayleigh-) Wellen. Sofern die Bauteilabmessungen im Bereich der Wellenlänge liegen, treten je nach Geometrie zusätzlich Dehn- (Stab-) oder Biege- (Platten-, Lamb-) Wellen u.a. hinzu. Um bei praktischen Prüfungen den störenden Einfluss dieser Schwingungsmoden gering zu halten, sollte daher idealerweise für die geometrische Ausdehnung des Prüfkörpers b in jede Raumrichtung gelten (s. KAP. 2.2.2.1): $b > 2 \quad \{2.11\}$

BILD 2.5 gibt einen Überblick über die wichtigsten Wellenarten. Festkörperphysikalisch lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit für die unterschiedlichen Wellenmoden aus den wesentlichen Stoffkonstanten Elastizitätsmodul E , der Poisson-Konstanten sowie der Stoffdichte ableiten ($\{2.6\} - \{2.10\}$). Insbesondere ist auch das Verhältnis der longitudinalen $\{2.6\}$ zur transversalen $\{2.7\}$ Ausbreitungsgeschwindigkeit eine Stoffkonstante (s.a. KAP. 4.3). Für Beton gelten die Anhaltswerte (vgl. [DIN1045]):

$$E \approx 20000 - 40000 \text{ N/mm}^2 \quad \{2.12\}$$

$$\approx 0,1 - 0,35 \text{ (DIN1045: } 0,2) \quad \{2.13\}$$

$$v_T \approx 40\% - 60\% v_L \quad \{2.14\}$$

In Abgrenzung zum statisch ermittelten E-Modul E_{STAT} lässt sich aus den Schallwerten v_L und v_T der sog. dynamische E-Modul E_{DYN} ermitteln. Eine Rechnung hierzu findet sich in KAP. 4.3.1.3.

2.1.3 Schalldruck und Schallwellenwiderstand

Durch die Auslenkung der Teilchen im Schallfeld ergeben sich, wie erwähnt, zeitliche (und somit örtliche) Druckminima und -maxima. Der resultierende Schall(wechsel-)druck p ergibt sich direkt aus der Teilchenauslenkung zu:

$$p(t) = v \cdot \dot{u}(t) \quad \text{in N/m}^2 \quad \{2.12\}$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$. Der maximale Schalldruck p_{MAX} tritt folglich bei der maximalen Teilchenauslenkung u_{MAX} auf. Mit {2.2} gilt dann:

$$p_{MAX} = A \cdot \omega \cdot A_{EL} \quad (A_{EL} \text{ in Volt}) \quad \{2.13\}$$

Die Amplitude A ist direkt proportional der z.B. am Oszilloskop bestimmten Amplitude A_{EL} , z.B. der Echohöhe in Volt. Den Ausdruck v aus {2.12} bezeichnet man als Schallwellenwiderstand Z (auch: Schallwiderstand oder Schallimpedanz) :

$$Z = v / \dot{u} \quad \text{in kg/(m}^2\text{s)} \quad \{2.14\}$$

Z ist ein Kennzeichen für die materialkonstanten, elastischen Eigenschaften. Stoffe mit hoher bzw. geringer Schallimpedanz bezeichnet man daher als „schallhart“ bzw. „schallweich“. Die Schallimpedanz ist jedoch (im Gegensatz zur elektrischen, z.B. ohmschen Impedanz) kein Maß für die Schallschwächung im Werkstoff (s. KAP. 2.2). Z.B. sind sowohl Stahl (schallhart) als auch Luft (schallweich) gute Schallleiter.

In seltenen Fällen ist auch die Intensität der Schallwelle J von Interesse. Die Intensität ist proportional zum Quadrat des Schalldruckes und ergibt sich zu:

$$J = p^2 / (2Z) \quad \text{in W/m}^2 \quad \{2.15\}$$

In der Praxis werden der Schalldruck p und die Intensität J häufig in relativen logarithmischen Dezibel-Einheiten angegeben. Für das Dämpfungs- bzw. Verstärkungsmaß a gilt dann die Formel:

$$a = 20 \lg (p_2/p_1) \quad \text{in dB} \quad p_2 = p_1 \cdot 10^{(a/20)} \quad \{2.16\}$$

$$a = 10 \lg (J_2/J_1) \quad \text{in dB} \quad J_2 = J_1 \cdot 10^{(a/10)} \quad \{2.17\}$$

Für die z.B. am Oszilloskop bestimmte Amplitude A_{EL} hat sich bei praktisch durchgeführten Untersuchungen fälschlicherweise der Begriff „Intensität“ eingebürgert (z.B. im Begriff „Ultraschallintensitäts-Verfahren“). Bei Berechnun-

gen ist daher darauf zu achten, ob eigentlich der Wert des maximalen Schalldruckes (nach {2.16}) oder die physikalisch korrekte Intensität (nach {2.17}) ermittelt wird.

TAB. 2.2 fasst die Schallkennwerte für einige Werkstoffe zusammen. Alle genannten Parameter gelten dabei in gleicher Weise für ebene wie für Kugelwellen (s. nachfolgend KAP. 2.1.4).

Werkstoff bei T=20°C, NK	Ultraschallgeschw.		Dichte in kg/dm ³	Schallw.widerst. Z = v _L * in 10 ⁹ *kg/(m ² *s)	Literatur
	long. v _L in m/s	trans. v _T in m/s			
Stahl (Vergleichskörper)	5920	3250	7,9	46,8	[MATTHIES 1998]
Aluminium	6300	3120	2,7	17,0	[MATTHIES 1998]
Quarzglas	5570	3520	2,6	14,5	[MATTHIES 1998]
Beton	4200	2100	2,3	9,7	
Gips (Halbhydrat)	2000	o.A.	1,1	2,2	
Wasser	1483	-	1	1,5	[MATTHIES 1998]
Luft	343	-	0,0012	0,00041	[JONAS1996]

TAB. 2.2: Schallkennwerte von Werkstoffen (Anhaltswerte)

2.1.4 Schallfeld eines ebenen, kreisförmigen Kolbenschwingers

Zur Erzeugung von Ultraschall werden Prüfköpfe eingesetzt, die heute i.d.R. mit piezoelektrischen, keramischen Platten als Schallerzeuger arbeiten (s. KAP. 4.2). Nach Anregung durch einen kurzen, elektrischen Spannungsstoß schwingt die piezoelektrische Platte auf der ganzen Fläche bei gleicher Phase und Amplitude mit ihrer Eigenfrequenz f_0 . Im ungedämpften Fall (freier Schwinger) hängt diese allein von der Plattendicke d und der Schallgeschwindigkeit c der Piezokeramik ab:

$$f_0 = c / 2d \quad \{2.18\}$$

Bei Anregung z.B. mit einer sinusförmigen Wechselspannung der Frequenz f schwingt die Piezoplatte mit derselben, erzwungenen Frequenz f . Für beide

Fälle resultiert die Wellenlänge nach {2.5} zu:

$$= c / f \quad \{2.19\}$$

Durch ihre Verformung wirkt die Piezoplatte sowohl als Dickenschwinger zur Erzeugung von Longitudinalwellen als auch als Scherschwinger, der Transversalwellen erzeugt und auf das Umgebungsmedium überträgt. Diese Schallerzeugung entspricht der durch einen oszillierenden Kolben innerhalb einer Lochblende hervorgerufenen (s. BILD 2.6); man spricht daher vom Schallfeld eines (idealen) ebenen, kreisförmigen Kolbenschwingers. Nach dem Huygensschen Prinzip lässt sich das Schallfeld aus der Überlagerung der an jedem Punkt der Schallquelle erzeugten (kugelförmigen) Elementarwelle konstruieren. So entstehen Interferenzmaxima und -minima, deren Lage und Form grundsätzlich von folgenden Parametern abhängt:

- dem Durchmesser D der Schallquelle
- der (freien oder erzwungenen) Schallwellenlänge
- dem Abstand s von der Schallquelle.

Betrachtet man zur Vereinfachung die Schalldruckverteilung auf der Schallachse (Lotrechte zum Mittelpunkt des Schallsenders), resultieren insbesondere in der Nähe der Schallquelle Schalldruckmaxima und -minima (Nahfeld,

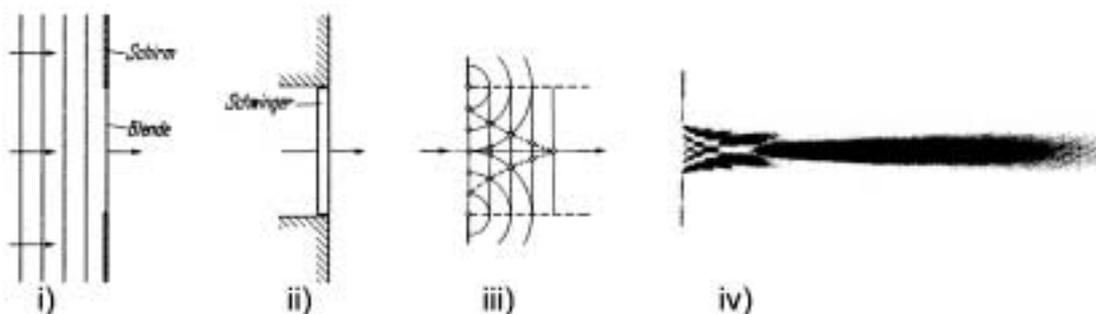


BILD 2.6: Schemata für die Schallausbreitung eines ebenen Schwingers
 i) Ebene Schallwelle an starrer Lochblende
 ii) Ebener Schwinger in starrer Wand
 iii) Interferenz des Schallfeldes nach Blendendurchgang
 iv) Beispiel für ein Schallfeld vor einem Schwinger mit mit $D/\lambda = 6,7$
 (nach: [KRAUTKRÄMER1986])

Interferenzfeld, auch Fokusdistanz). Ab einer Entfernung **N** von der Schallquelle nimmt der Schalldruck dann kontinuierlich allein durch seine geometrische Ausdehnung auf einem Kugelsegment ab (Fernfeld).

Ein signifikantes Nah- oder Interferenzfeld tritt nur auf, wenn der Durchmesser **D** der Schallquelle groß gegenüber der (freien oder erzwungenen) Schallwellenlänge ist, d.h. $D/\lambda > 1$. Die Entfernung zur Senderoberfläche **z** des letzten auftretenden Schalldruckmaximums auf der Schallachse ergibt sich dann aus:

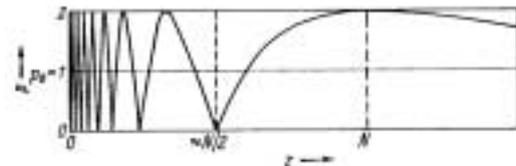


BILD 2.7: Beispiel für die Schalldruckverteilung auf der Schallachse eines Kolbenschwingers [KRAUTKRÄMER1986]

$$z = \frac{D^2}{4} \quad \{2.20\}$$

Da der Schallstrahl innerhalb des Nahfeldes nicht divergiert, sondern fokussiert, ist es insbesondere für Prüfungen nach dem Echo-Verfahren sehr vorteilhaft, Prüfköpfe mit ausgedehntem Nahfeld einzusetzen. Dieses ist nach {2.20} dann der Fall, wenn gilt: $D/\lambda \gg 1$. Die resultierende Nahfeldlänge **N** kann dann genähert werden durch:

$$z = \frac{D^2}{4} = N \quad \{2.21\}$$

Im Bereich der Stahlprüfung können durch die Verwendung hochfrequenter Prüfköpfe Nahfeldlängen von 50mm und mehr realisiert werden. BILD 2.7 zeigt Beispiele einiger Schallfelder bei der Stahlprüfung [MATTHIES1998].

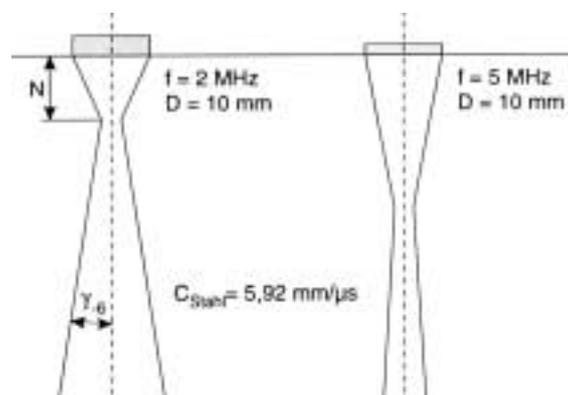


BILD 2.8: Schematisierte Schallstrahlfelder b.d. Stahlprüfung [MATTHIES1998]

Für den Bereich der Ultraschall-echo-Prüfung von Beton schein-

det die Verwendung gebündelter Schallstrahlen aus. Aufgrund der Inhomogenität des Baustoffes (s. KAP. 2.2ff) müssen Schallfrequenzen von 50kHz bis max. 250kHz eingesetzt werden. Die entsprechenden Wellenlängen liegen dann gem. {2.19} für $c_{\text{BETON}} \approx 4000 \text{ m/s}$ zwischen 8cm und ca. 2cm. Da die geeigneten Prüfköpfe (s. KAP. 4.2) Schwingerdurchmesser von $D \geq 39\text{mm}$ aufweisen, gilt praktisch immer: $D/\lambda \leq 1$. FORMEL {2.21} liefert dann Nahfeldlängen $N \leq 0 \text{ (mm)}$, d.h. der Schallsender verhält sich faktisch wie eine einzelne, punktförmige Schallquelle. Das resultierende Schallfeld ist rechnerisch nahezu kugelförmig (s. BILD 2.9), die Schallwelle ist also eine konzentrische Kugelwelle. Da die Richtcharakteristik eines Prüfkopfes in Sende- und Empfangsbetrieb gleich bleibt, werden bei der Betonprüfung die Echosignale aus allen Richtungen einer konzentrischen Kugelschale gleichgewichtet empfangen; ihre Intensität hängt daher im Wesentlichen von der über den (doppelten) Schallweg eintretenden Schallschwächung ab (s. KAP. 2.2).

Seit kurzer Zeit sind realistische Modellrechnungen zur Schallausbreitung auch in Beton möglich (s. z.B. [MARKLEIN1997], [LANGENBERG1995]). Hierbei werden die elastomechanischen Eigenschaften des jeweiligen Betons über Ultraschallmodellierung basierend auf der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik

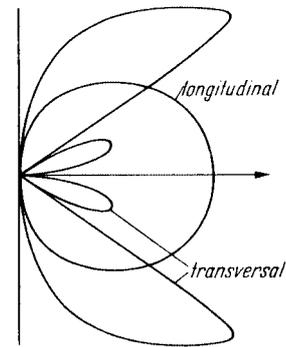


BILD 2.9: errechnete Richtcharakteristik eines Schallsenders mit $D/\lambda \approx 1$ [KRAUTKRÄMER1986]

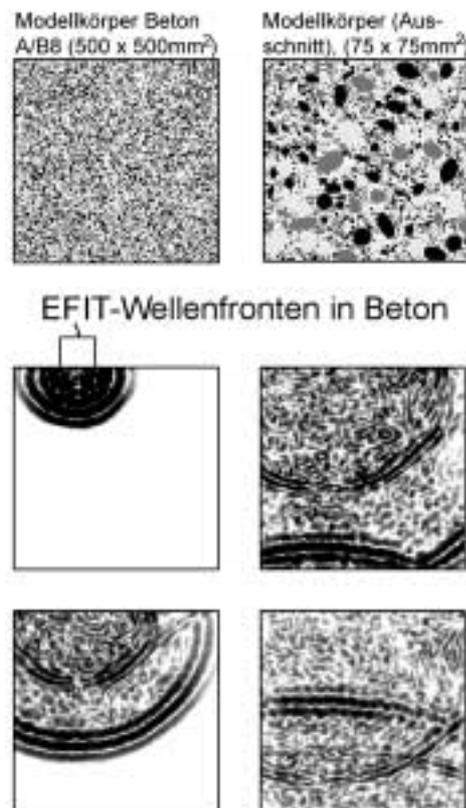


BILD 2.10: Simulierte Schallwellenausbreitung in Beton (nach [LANGENBERG1995])

(EFIT) genähert und das Ausbreitungsverhalten in Abhängigkeit von den Betoneigenschaften (Zuschläge, Luftporen etc.) und weiterer schallphysikalischer Parameter simuliert. Das Ergebnis einer solche Modellrechnung für einen würfelförmigen Betonprobekörper ($500 \times 500\text{mm}^2$) mit einem Zuschlaggrößtkorn von 8mm zeigt BILD 2.10 (LANGENBERG in [KRIEGER1998]).

2.2 Schallausbreitung

Im Gegensatz zu Lichtwellen benötigen Schallwellen zwingend ein materielles Ausbreitungsmedium, welches das Schallsignal beeinflusst. Veränderungen des Schallsignals treten dabei sowohl durch Wechselwirkungen mit dem Ausbreitungsmedium selbst, als auch beim Übergang von einem zu einem zweiten Ausbreitungsmedium auf.

2.2.1 Schallschwächung

Beim Durchlaufen eines (ideal unbegrenzten) Werkstoffes wird das Ultraschallsignal durch mehrere Effekte in Amplitude und Form verändert. Der Gesamteffekt wird unter dem Begriff Schallschwächung zusammengefasst. Der Schallschwächung liegen grundsätzlich zwei Ursachen zugrunde:

- die Geometrie des Schallfeldes
 - Divergenz
- physikalische Wechselwirkungen mit dem Ausbreitungsmedium
 - Streuung
 - Absorption
 - Dispersion

Die nachfolgenden Überlegungen gelten streng nur für die hier in erster Linie interessanten Longitudinalwellen. Überlegungen zu weiteren Moden finden sich [KRAUTKRÄMER1986].

2.2.1.1 Divergenz

Wie KAP. 2.1.4 dargelegt, breitet sich der Ultraschall bei der Betonprüfung praktisch als ideale Kugelwelle um den Prüfkopf aus. Die Abnahme der Intensität folgt daher dem einfachen, quadratischen Abstandsgesetz. Die Anfangsintensität J_0 sinkt im Abstand d auf:

$$J = J_0 / d^2 \quad \{2.22\}$$

Nach {2.15} gilt dann für den Schalldruck p (Oszilloskopanzeige!):

$$p = p_0 / d \quad \{2.23\}$$

Diese geometrische Abnahme der Amplitude im Fernfeld wird auch als Schallschwächung infolge der Strahlöffnung bezeichnet. Sie ist aufgrund der Kugelcharakteristik des Schallfeldes bei der Betonprüfung unvermeidlich, kann aber durch Nachregeln der Verstärkung am Prüfgerät ausgeglichen werden.

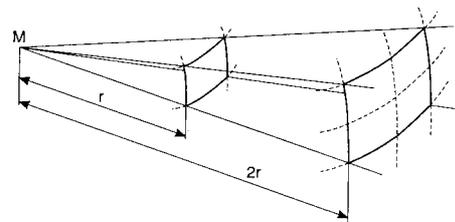


BILD 2.11: Geometrische Strahlöffnung
[MATTHIES1998]

2.2.1.2 Streuung

Beton ist als mehrkomponentiger Verbundwerkstoff sehr inhomogen. Zementmatrix, Zuschläge und Luftporen unterscheiden sich schallphysikalisch deutlich (s. TAB. 2.2). Daher kommt es ständig zu Phasenübergängen, die das Schallsignal beeinflussen. An diesen Phasenübergängen kann es prinzipiell zu zwei Effekten kommen. Sofern die Abmessungen des Phasenüberganges (genauer: dessen Projektion senkrecht zur Schallachse) im Bereich der Prüfwellenlänge (hier: 20-80mm) liegen, können direkte Reflexionen (s. KAP. 2.2.2) und Beugungserscheinungen auftreten, die das Schallsignal schon nach kurzem Weg vollständig ablenken. Da dieses für die Phasenübergänge an den Grobzuschlägen (8-32mm) zutrifft, ist es zwingend erforderlich, Prüfwellenlängen oberhalb der Abmessung des Grobzuschlages zu

verwenden (s. TAB. 2.1).

Sofern die Abmessung einer Inhomogenität kleiner als die Prüfwellenlänge ist, wird das Schallsignal durch Streuung geschwächt. Im Werkstoff Beton sind solche Inhomogenitäten in großer Zahl durch kleinere Zuschläge (Sieblinie nach Fuller-Parabel) und insbesondere durch die bei der Herstellung entstandenen Luftporen vorhanden. Die Streuung nimmt dabei näherungsweise zu

- i) mit der 3. Potenz des Streuzentrendurchmessers
- ii) linear mit der Dichte der Streuzentren, und somit
- iii) linear mit dem Schallweg.

Wegen i) haben Streuzentren mit Durchmessern unterhalb weniger % der Prüfwellenlänge kaum Einfluss auf das Prüfsignal. Sind Streuzentren mit Durchmessern oberhalb ca. 10% der Prüfwellenlänge (hier also: 2-8mm) vorhanden, wirken sie der Erfahrung nach deutlich auf das Prüfsignal ein, was im Werkstoff Beton praktisch immer der Fall ist (z.B. Luftporen mit einigen mm Durchmesser). Da der Anteil der gestreuten Schallenergie für das Prüfsignal verloren ist, verschlechtert sich das Signal-Rausch-Verhältnis mit zunehmendem Schallweg (iii) ggf. soweit, dass kein signifikantes Echo erhalten werden kann. Punkt i) und ii) hängen wesentlich von der Zusammensetzung und Herstellung des Prüfbetons ab, wie auch in geringerem Umfang die summarischen Schallschwächungen durch Absorption und Dispersion (s.u). Eine signifikante Eindringtiefe des Schallsignals kann daher praktisch nur empirisch und im Einzelfall angegeben werden. Zudem enthält der Werkstoff Beton i.d.R. auch eine Anzahl von Luftporen oder kleiner Verbundfehler, deren Abmessungen in die Größenordnung der Prüfwellenlänge fallen. Die dann auftretenden, statistisch reflektierten Schallanteile erhöhen zusätzlich den Rauschanteil im Prüfsignal („Gras“), wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis weiter sinkt.

2.2.1.3 Absorption und Dispersion

In jedem schallleitenden Medium wird ein Anteil der Schallenergie direkt in (Reibungs-) Wärme umgesetzt. Diese Absorption ist eine Materialkonstante und führt zu einer Schallschwächung, die linear mit dem Schallweg zunimmt. Durch die höhere Auslenkungsgeschwindigkeit der Teilchen steigt die Absorption zudem mit höheren Frequenzen an. Die durch Absorption hervorgerufene Schallschwächung ist beim Dynamikumfang der heutigen Prüftechnik (über 100dB) jedoch vergleichsweise leicht durch eine geeignete Anhebung der Verstärkung zu kompensieren.

Als weiterer frequenzabhängiger Effekt beeinflusst die Dispersion das Schallsignal. Abhängig von seiner Frequenzcharakteristik (s. KAP. 4.2) sendet ein Prüfkopf in Echo-Technik nach der Anregung einen breitbandigen Schallimpuls aus. Hierbei weichen die Schallgeschwindigkeiten der Einzelfrequenzen, d.h. die in KAP. 2.1 eingeführten Phasengeschwindigkeiten, von der sog. Gruppengeschwindigkeit, d.h. der Schallgeschwindigkeit des Amplitudenpeaks (Maximum der Einhüllenden des Frequenzgemisches) ab. Dieses führt mit zunehmendem Schallweg zu einer Aufweitung („Broadening“) des zuvor kurzen Pulses. Da die Schallenergie insgesamt konstant bleibt, sinkt die Amplitude bei gleichzeitigem Anstieg der Pulsdauer. Bei geringen Eindringtiefen (bis ca. 30cm Echotiefe) ist diese Signalverschlechterung wenig relevant, stellt aber für größere Schalltiefen ein wesentliches Hindernis dar. Daher werden verschiedene Verfahren untersucht, die auch diesen Effekt z.T. ausgleichen ([KRAUSE1997], [KÖHLER1997], [KROGGEL1995]). Grundsätzliche Hinweise gibt z.B. [SCHICKERT1998]). Darüberhinaus führen Dispersionseffekte dazu, dass z.B. Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit eines Probekörpers mit verschiedenen Prüfgeräten, Prüfköpfen und Prüffrequenzen oft abweichende Ergebnisse liefern, was [VITYUK1995] diskutiert.

2.2.1.4 Gesamte Schallschwächung

Die in KAP. 2.2.1.2 und 2.2.1.3 erläuterten Einflussparameter für Streuung, Absorption und Dispersion sind im Einzelnen theoretisch oder messtechnisch nur sehr schwer zu erfassen; für den Werkstoff Beton ist dieses auf Grund des weiten Bereiches der möglichen Zusammensetzungen und Herstellungsbedingungen i.d.R. unmöglich. Die Reduktion des Schalldruckes auf der Schallachse durch Streuung, Absorption und Dispersion insgesamt mit dem Abstand d zum Prüfkopf erfolgt exponentiell und kann dementsprechend durch eine Exponentialfunktion dargestellt werden:

$$p = p_0 e^{-\alpha d} \quad \{2.24\}$$

Dabei ist α der Gesamtschwächungskoeffizient für die durch Streuung, Absorption und Dispersion hervorgerufenen Abnahme des Schalldruckes mit d . Betrachtet man die zugehörigen Intensitäten J , so gilt für den Schallschwächungskoeffizient der Intensität α_J wg. {2.15}:

$$\alpha_J = 2\alpha \quad \text{in Np/m} \quad \{2.25\}$$

Die SI-Einheit der Schallschwächung ist das Neper (Np), s.a. [KRAUTKRÄMER1986]. Aus praktischen Gründen wird zur Angabe des Schallschwächungskoeffizienten i.d.R. das Dezibelmaß bevorzugt. Analog zu {2.16} gilt dann:

$$d = 20 \lg \frac{p_0}{p} \text{ dB} \quad \text{mit } \alpha \text{ in dB/m} \quad \{2.26\}$$

Bei der Betonprüfung muss zusätzlich die geometrische Aufweitung des Schallstrahles im Fernfeld gem. {2.23} berücksichtigt werden. Unter realen Bedingungen entsteht außerdem eine variable Schwächung des Schallsignales durch unterschiedliche Ankopplungsbedingungen des Prüfkopfes an den Werkstoff, die durch einen weiteren Koeffizienten k beschrieben werden kann. Zusammenfassend erhält man die Formel für die gesamte reale Schallschwächung:

$$p = k \frac{p_0}{d} e^{-d} \quad \{2.27\}$$

In stark schallschwächenden Werkstoffen wie Beton liegt der Gesamtschwächungskoeffizient für die durch Streuung, Absorption und Dispersion empirisch zwischen 40 - 80dB/m und hat daher den stärksten Einfluss auf das Messsignal (z. exp. Ermittlung von α s. z. B. [HILLGER1983]). Die geometrische Strahlaufweitung kann hingegen beim Dynamikumfug der heutigen Prüftechnik (bis 120dB) i.d.R. durch eine angepasste Verstärkungssteuerung über den Schalllaufweg (Tiefenausgleich s. KAP. 4). kompensiert werden. Die durch unterschiedliche Ankopplungsbedingungen hervorgerufenen Schwankungen liegen der Erfahrung nach bei bis zu 10dB und sind insbesondere dann relevant (und störend), wenn relative Messungen durchgeführt werden sollen, was z.B. beim nachfolgend diskutierten, bildgebenden B-Bild-Verfahren der Fall ist. BILD. 2.12 zeigt exemplarisch die bei einer Durchschallungsprüfung eines Betons mit $\alpha = 60\text{dB/m}$ und $k = 5\text{dB}$ auftretenden Schallverluste für einen Schallweg von 1m zwischen Sender und Empfänger. Die Amplitude des Schallsignal wurde dabei für $d = 5\text{cm}$ willkürlich auf 100% gesetzt. Das Beispiel ist vergleichbar einer Prüfung nach dem Echoverfahren über einen (einfachen) Schallweg von 50cm, wobei dann jedoch zusätzlich die bei der Rückwandreflexion auftretenden Schallverluste zu berücksichtigen sind (s.u.).

		S Beton mit $\alpha = 60\text{dB/m}$, $k = 5\text{dB}$, $p(5\text{cm}) = 100\%$ E			
Amplitudenabnahme durch		d = 5 cm	25cm	50cm	100cm
Strahlöffnung		100%	20%	10%	5%
Streu./Abs./Disp.		100%	25%	4%	0,1%
Ankopplung		100%	100%	100%	56%
ges. in%		100%	5%	0,4%	0,004%
ges. in db		0db	-26dB	-47dB	-88dB

BILD 2.12: Beispiel für Schallschwächung in Beton

2.2.2 Schallwellen an Grenzflächen

Reale Werkstoffe weisen grundsätzlich Begrenzungen auf, an denen sich das Schallübertragungsmedium und mithin dessen Schallübertragungseigenschaften ändern, z.B. Beton Luft. Sofern die Abmessungen einer solchen Grenzfläche senkrecht zur Schallachse im Bereich der Prüfwellenlänge oder darüber liegen, wird das Schallsignal anteilig reflektiert und beim Übergang in das zweite Medium gebrochen (für geringere Abmessungen der Grenzfläche s. KAP. 2.2.1.2). Solche Reflexionen treten z.B. auf

- an den Bauteilgrenzen (z.B. an der Rückwand)
- an größeren Hohlräumen im Prüfkörper ($d_{\text{HOHLRAUM}} > \lambda$)
- beim Übergang Prüfkopf Prüfkörper

Beim hier diskutierten Ultraschallecho-Verfahren stellen die reflektierten Anteile des Schallsignales den wesentlichen Messparameter dar. Art und Geometrie des Grenzflächenübergangs beeinflussen dabei wesentlich die Amplitude und Form des reflektierten Schallsignals.

2.2.2.1 Reflexion und Durchlass

Zunächst soll das Auftreffen einer ebenen Welle senkrecht auf eine ebene, glatte und unbegrenzte Grenzfläche (s. BILD 2.13) betrachtet werden, was der Idealisierung einer Rückwandreflexion entspricht. Die unterschiedlichen Schallübertragungseigenschaften der Medien 1 und 2 werden dabei durch die zugehörigen Werte

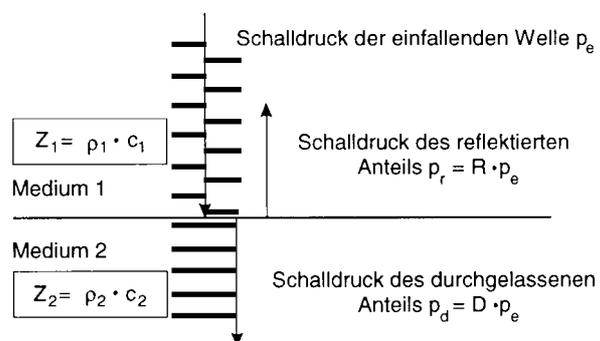


BILD 2.13: Schallwelle bei senkrechtem Auftreffen auf eine Grenzfläche (nach [MATTHIES1998])

des Schallwiderstandes \mathbf{Z}_1 und \mathbf{Z}_2 charakterisiert (s. KAP. 2.1.3). An der Grenzfläche wird die Schallwelle zum Teil reflektiert und zum Teil durchgelassen. Der Reflexionsfaktor \mathbf{R} und der Durchlassfaktor \mathbf{D} kennzeichnen den jeweiligen Anteil \mathbf{p}_r bzw. \mathbf{p}_d des resultierenden Schalldruckes zum Schalldruck der Einfallswelle \mathbf{p}_e :

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{p}_r}{\mathbf{p}_e} \quad \{2.25\} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{D} = \frac{\mathbf{p}_d}{\mathbf{p}_e} \quad \{2.26\}$$

Wegen der Energieerhaltung muss für die zugehörigen Intensitäten \mathbf{J}_e (einfallende Welle) und \mathbf{J}_r (refl. Welle) bzw. \mathbf{J}_d (durchgel. Welle) gelten:

$$\mathbf{J}_{\text{ges}} = \text{const.} = \mathbf{J}_e = \mathbf{J}_r + \mathbf{J}_d \quad \{2.27\}$$

Nach Einsetzen von {2.15} in {2.27} erhält man nach kurzer Rechnung:

$$(1-\mathbf{R})(1+\mathbf{R}) = n\mathbf{D}^2 \quad \text{mit } n = \mathbf{Z}_1 / \mathbf{Z}_2 \quad \{2.28\}$$

Somit ergeben sich die dimensionslosen Faktoren \mathbf{R} und \mathbf{D} :

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_1}{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1} \quad \{2.29\} \quad \mathbf{D} = \frac{2 \mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1} \quad \{2.30\}$$

und ferner gilt:

$$1 + \mathbf{R} = \mathbf{D} \quad \{2.31\}$$

woraus durch Einsetzen von {2.25} und {2.26} direkt folgt:

$$\mathbf{p}_e + \mathbf{p}_r = \mathbf{p}_d \quad \{2.32\}$$

Schallintensität und Schalldruck sind beim Übergang an Grenzflächen also grundlegend unterschiedlich zu betrachten. Während die Betrachtung im Energie-/Intensitätsbereich der Intuition „einlaufende Welle = Summe der auslaufenden Wellen“ entspricht, sind für den Schalldruck zusätzlich die unterschiedlichen Schallwiderstände in beiden Ausbreitungsmedien zu berücksichtigen. BILD 2.14b zeigt am Beispiel des Überganges in ein schallhär-

teres Medium (s. KAP. 2.1.3) den Anstieg des Schalldruckes der transmittierten (durchgelassenen) Welle (zur Phasenlage s. nachf. KAP. 2.2.2.2). Da bei praktischen Prüfungen i.d.R. die Werte des Schalldruckes ausgewertet werden (z.B. am Oszilloskop), beziehen sich die weiteren Erläuterung ausschließlich hierauf.

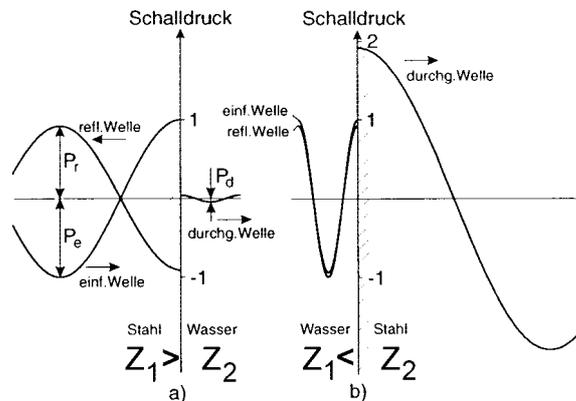


BILD 2.14: Schalldruckwerte bei der Reflexion an der Grenzfläche Stahl/Wasser (nach [MATTHIES1998])

Der Vollständigkeit halber wird noch kurz auf die Reflexion an Grenzflächen bei schrägem Einfall des Schallstrahls eingegangen. Da sich die Schallwelle bei der Betonprüfung praktisch kugelförmig um den Sender ausbreitet, tritt dieser Fall in der Regel immer auf. Sowohl für die reflektierten als auch für die durchgelassenen (und gebrochenen) Wellenanteile gilt das Snelliussche Brechungsgesetz:

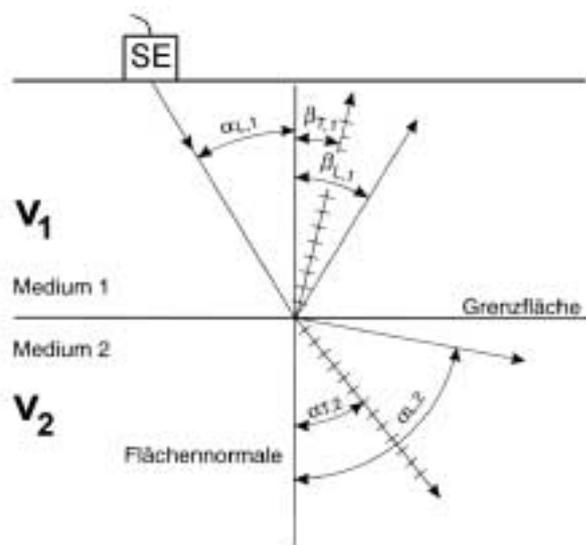
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad \{2.33\}$$

mit

1 : Winkel der einlaufenden Welle

2 : Winkel der auslaufenden Welle

v_1, v_2 : Schallgeschwindigkeit in Medium 1 bzw. 2



Zeichenerklärung:

- $\alpha_{L,1}$: Einfallswinkel der Longitudinalwelle
- $\beta_{L,1}$: Reflexionswinkel der Longitudinalwelle
- $\beta_{T,1}$: Reflexionswinkel der Transversalwelle
- $\alpha_{L,2}$: Brechungswinkel der Longitudinalwelle
- $\alpha_{T,2}$: Brechungswinkel der Transversalwelle
- : Longitudinalwelle
- + + : Transversalwelle

BILD 2.15: Reflexion, Brechung und Modenumwandlung bei schrägem Einfall (nach [MATTHIES1998])

Zusätzlich treten hier Modenumwandlungen auf, d.h. nach der Reflexion z.B. einer Longitudinalwelle treten zusätzlich transversale Wellenanteile auf. Da diese Wellenanteile eine andere Schallgeschwindigkeit als die longitudinalen aufweisen (vgl. TAB. 2.2), treten weitere Reflexions- und Brechungswinkel gem. {2.33} hinzu (s. BILD 2.15).

Reflexionen bei schrägem Einfall sind für das Ultraschallechoverfahren nur in 2 Fällen bedeutsam. Zum einen muss ein Prüfkörper in seinen lateralen Abmessungen (d.h. rechtwinklig zur Schallachse) mindestens doppelt so groß sein wie die Prüfwellenlänge, d.h. $b > 2 \lambda$, da es sonst zu einer so starken Überlagerung direkt und indirekt reflektierter Anteile mit so geringen Laufzeitunterschieden kommt, dass das Prüfsignal nicht mehr auswertbar ist (s. BILD 2.16). Insbesondere müssen auch Kallibrierkörper diesem Kriterium entsprechen; z.B. ist eine Kallibrierung an Standard-Zementmörtelprismen ($4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$) nicht möglich. Die Prüftiefe d hingegen darf beim Ultraschallechoverfahren kleiner sein, da mit einzelnen, kurzen Schallimpulsen geprüft wird. Die minimale Prüftiefe hängt allein von der sog. Totzeit des verwendeten Prüfkopfes ab (s. KAP. 4.2).

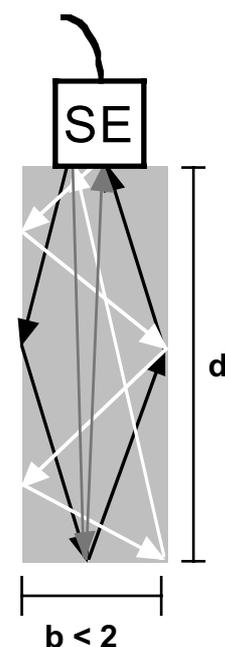


BILD 2.16: Skizze zur minimalen Prüfkörperbreite b

Der andere Fall ist die Reflexion des Ultraschallsignals an einem zylindrischen oder kugelförmigen Reflektor wie es z.B. bei der Ortung von Spannkämen auftritt. Da hier auch bei seitlich zum Prüfkopf liegendem Reflektoren immer Schallanteile lotrecht reflektiert werden, detektiert das Prüfgerät dann auch Defekte deutlich außerhalb der Schallachse, allerdings gleichzeitig bei deutlich geringeren Amplituden als bei Flächen-

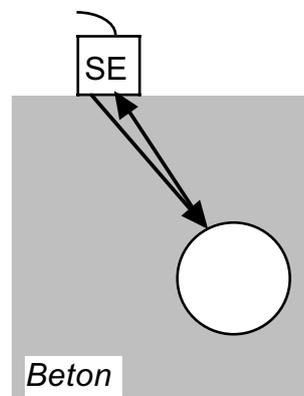


BILD 2.17: Skizze zur seitlichen Ortung z.B. eines Spannkamens

reflektoren (s. BILD 2.17). Bei bildgebenden Verfahren wird der Echoreflex dementsprechend hyperbolisch aufgeweitet. Praktische Auswirkungen zeigen die KAP. 5 und 6.

Weiter anzumerken ist, dass die hier verwendeten Prüfköpfe (s. KAP. 4.2) auf das Senden und Empfangen longitudinaler Wellen(-anteile) optimiert sind. Zufällig auf den Prüfkopf treffende Transversalanteile werden bauartbedingt praktisch nicht detektiert.

2.2.2.2 Schallübergang an verschiedenen Grenzflächen

Nachfolgend werden die für die Ultraschallechoprüfung wesentlichen Prüfsituationen vorgestellt. Messparameter des Ultraschallechoverfahrens sind grundsätzlich Reflexionen von Grenzflächen. Exemplarisch werden daher 5 Grenzflächen-Übergänge diskutiert:

- | | | | |
|------|----------|---------------------|---------------------------------|
| i) | Prüfkopf | Beton-Prüfkörper | (Ankopplung) |
| ii) | Beton | Prüfkörper - Luft | (z.B. freistehende Wand) |
| iii) | Beton | Prüfkörper - Wasser | (z.B. Wand gg. nasses Erdreich) |
| iv) | Beton | Stahl | (z.B. Bewehrungsstab) |

i) Prüfkopf Beton-Prüfkörper

Beim Ultraschallechoverfahren dient ein Prüfkopf sowohl als Sender als auch als Empfänger. Zur Übertragung einer maximalen Schallenergie muss der Prüfkopf möglichst fest an den Prüfkörper, hier also an den Beton, angekoppelt werden. Zur Betonprüfung geeignete Prüfköpfe sind bauartbedingt, d.h. durch die Konstruktion des piezokeramischen Schwingers und dessen mechanische und elektrische Bedämpfung von vorneherein gut an die akustischen Eigenschaften des (ebenfalls keramischen) Baustoffes Beton angepasst. Im idealen Falle eines direkten Kontaktes ist also ein verlustarmer Schallübergang (d.h. $D = 1$, $R = 0$) gewährleistet. Aufgrund der Oberflächen-

rauhigkeit liegt der Prüfkopf jedoch effektiv nur teilweise auf der Betonoberfläche auf (s. BILD 2.18). Die dazwischen befindlichen Luft einschüsse können keine Schallenergie übertragen (s. ii)) und wirken zudem stark als Streuzentren. Um diesen Effekt zu minimieren, muss zwingend ein Koppelmittel verwendet werden, das in seinen akustischen Eigenschaften deutlich näher an denen des Beton bzw. des Prüfkopfes liegt. In vielen Fällen hat sich hier Glycerin bewährt (s. ausführlich in KAP. 4.3.1.1, TAB. 2.2 und TAB. 4.1: $Z(\text{Luft}) = 0,00041$;

$Z(\text{Glycerin}) = 2,4$; $Z(\text{Beton}) = 9,2$ in $10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$). Die Angabe eines Durchlassfaktors für die Grenzfläche Prüfkopf - Prüfbeton ist jedoch nicht sinnvoll, da die Schallverluste wesentlich auf die Streuung an den Luft- bzw. Koppelmitteleinschlüssen zurückzuführen sind und zudem von weiteren Faktoren wie der jeweiligen Oberflächenrauhigkeit, der Art des Koppelmittels, der Koppelmittelschichtdicke und dem Anpressdruck abhängen. Empirisch kann ein Übergangs-Dämpfungsfaktor k angegeben werden, der bereits in KAP. 2.2.1.4 eingeführt und erklärt wurde.

ii) Beton Prüfkörper - Luft

Eine Prüfaufgabe für das Ultraschallecho-Verfahren kann die Bestimmung der Schalllaufzeit in Bauteilen gleicher Dicke z.B. zur Homogenitätskontrolle von Fertigbauteilen (vgl. [HILLGER1984]) oder, bei bekannter Schallgeschwindigkeit im Beton, die Ermittlung der Dicke einer freistehenden Wand (z.B. Hüllbeton eines Silos, Kühlturmes) sein (s. BILD 2.18). In beiden Fällen ist die Reflexion des Schallsignals am Wandende mit dem Übergang vom schallharten Medium Beton zum schallweichen Medium Luft entscheidend.

Einsetzen der Werte aus TAB. 2.2 in {2.29} bzw. {2.39} ergibt dann:

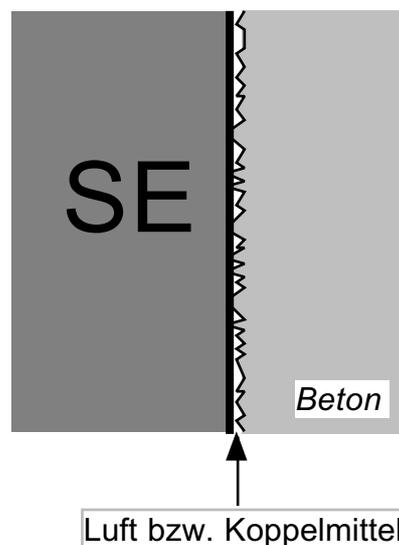
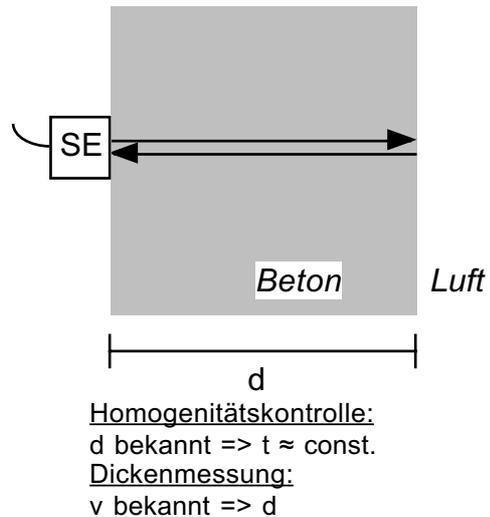


BILD 2.18: Skizze: Notwendigkeit eines Koppelmittels

$$R_{\text{BETON LUFT}} = -0,9999 \text{ und}$$

$$D_{\text{BETON LUFT}} = 0,0001$$

Das Schallsignal wird also unter Phasenumkehr (neg. Vorzeichen, vgl. BILD 2.14a) praktisch vollständig reflektiert. Der Signalverlust durch den durchgelassenen Anteil beträgt lediglich 0,01% oder ca. 0,001dB, was weit unterhalb der Nachweisgrenze liegt. In der Praxis lässt sich dieses Prüfverfahren bis zu bestimmten Bauteildicken durchführen, deren Grenzen durch die in KAP. 2.2.1 erläuterten, schallschwächenden Effekte bestimmt sind. Mit der hier verwendeten Prüfeinrichtung (s. KAP. 4 ff.) lassen sich auf diese Weise Bauteildicken bis 70cm durchschallen.



**BILD 2.19: Schema:
Übergang Beton Luft**

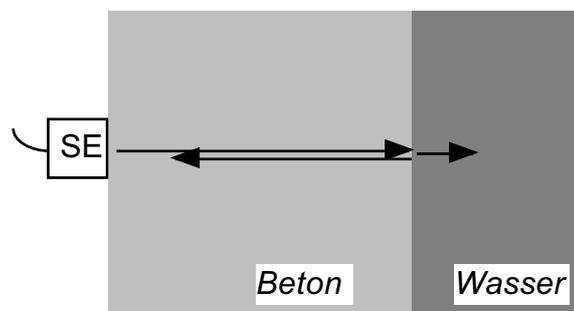
iii) Beton-Prüfkörper Wasser

Bei einigen Prüfaufgaben, z.B. bei der Bestimmung der Dicke einer Fundamentplatte oder -wand („Weiße Wanne“), grenzt das Betonbauteil an das Erdreich. Während R und D für den Übergang in trockenes Erdreich insbesondere wegen des hohen Luftgehaltes im Einzelfall nur schwer abgeschätzt werden kann, lässt sich der Übergang in nasses, das heißt wassergesättigtes Erdreich durch den Übergang Beton Wasser annähern (BILD 2.19). Mit den in TAB 2.2 dargestellten Werten des Schallwiderstandes Z folgt dann:

$$R_{\text{BETON->WASSER}} = -0,7348 \text{ und}$$

$$D_{\text{BETON->WASSER}} = 0,2652$$

Das reflektierte Signal wird also um ca 27% oder ca. 3dB gegenüber dem einfallenden geschwächt, wobei wiederum ein Phasensprung



**BILD 2.20: Schema:
Übergang Beton Wasser**

von 180° bei der Reflexion am schallweicherem Medium erfolgt. Der Erfahrung liegt der Schallverlust beim Übergang in das reale Materialgemisch Erdreich + Wasser allerdings deutlich höher, wodurch die Detektion eines Rückwandechos unter Umständen schon bei gegenüber ii) deutlich geringeren Bauteildicken unmöglich wird. Dagegen kann für den Übergang in völlig trockenes Erdreich von einer fast vollständigen Reflexion wie unter ii) dargestellt ausgegangen werden, was in Laboruntersuchungen mit Normsand festgestellt wurde. In der Praxis hängt der reale Schallverlust stark von den jeweiligen Gegebenheiten (insb. Wassersättigung, Druck) ab.

iv) Beton Stahl

Oberflächennahe Bewehrungsstäbe können das Ultraschallsignal erheblich beeinflussen. Mit TAB. 2.2 gilt für den Übergang Beton Stahl:

$$R_{\text{BETON STAHL}} = 0,6566 \text{ bzw. } R_{\text{STAHL BETON}} = -0,6566 \text{ und}$$

$$D_{\text{BETON STAHL}} = 1,6566 \text{ bzw. } D_{\text{STAHL BETON}} = 0,3434$$

Unter den in BILD 2.20 skizzierten Verhältnissen (z.B. Bewehrungsstab $\varnothing=12\text{mm}$) wird also ein Anteil von ca. 57% des Schalldruckes ($D_{\text{BETON STAHL}} \times D_{\text{STAHL BETON}} = 0,5689$) durch den Bewehrungsstab transmittiert, ein Anteil von ca. 66% am Bewehrungsstab reflektiert ($\neq 100\%$ s.o.). Hinzu treten Beugungserscheinungen, da der Durchmesser des Stabes in der Größenordnung der Prüfwellenlänge liegt. In der Praxis können die einzelnen Anteile im Echobild nicht unterschieden werden. Viel-

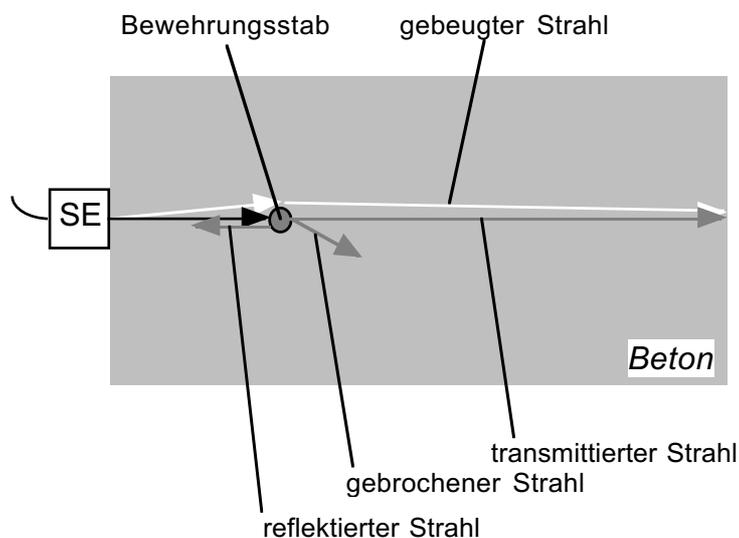


BILD 2.21: Schema: Einfluss von oberflächennaher Bewehrung

mehr führt das Vorhandensein eines Bewehrungsstabes auf der Schallachse je nach Lage und Abmessung effektiv zu einer mehr oder weniger starken Reduzierung des Signal-Rausch-Verhältnisses durch das Hinzutreten teilreflektierter Schallwellen. In einigen Fällen, insbesondere bei sehr oberflächennahen, größeren Bewehrungsstäben kann dadurch eine Echoortung an diesen Stellen unmöglich werden. Dieses kann jedoch i.d.R. dadurch ausgeglichen werden, dass ggf. noch vorheriger Ortung mit einem Bewehrungssucher zwischen den Stäben geprüft wird. Tieferliegende Maschenbewehrung stört dagegen im Regelfall wenig.

Ein Besonderheit von ii) und iv) stellt die Ortung eines zylindrischen Stahlhüllrohres dar. Dieser Fall wird in KAP. 5 diskutiert.

3. Ultraschallprüfung mineralischen Baustoffen und Bindemitteln

Zur Ultraschallprüfung mineralischen Baustoffen (z.B. Beton, Estrich) und Bindemitteln (z.B. Zement, Gips) können verschiedene Verfahren eingesetzt werden, die sich hinsichtlich ihrer technischen Ausführung und der ausgewerteten schallphysikalischen Parameter, d.h. mithin in ihrem Anwendungsgebiet und der resultierenden Aussagefähigkeit z.T. deutlich unterscheiden. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Verfahren gegeben, wobei das besondere Augenmerk auf das hier diskutierte Ultraschallecho-Verfahren und die Besonderheiten bei der Prüfung speziell des Werkstoffes Beton gelegt wird (KAP. 3.2). Die kompaktere Darstellung der alternativen Verfahren in KAP. 3.1 und 3.3 wurde in Teilen aus dem Merkblatt B4 der „Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung“ [DGzFP1999] übernommen, an dessen Erarbeitung der Autor mitgewirkt hat.

3.1 Durchschallungsverfahren

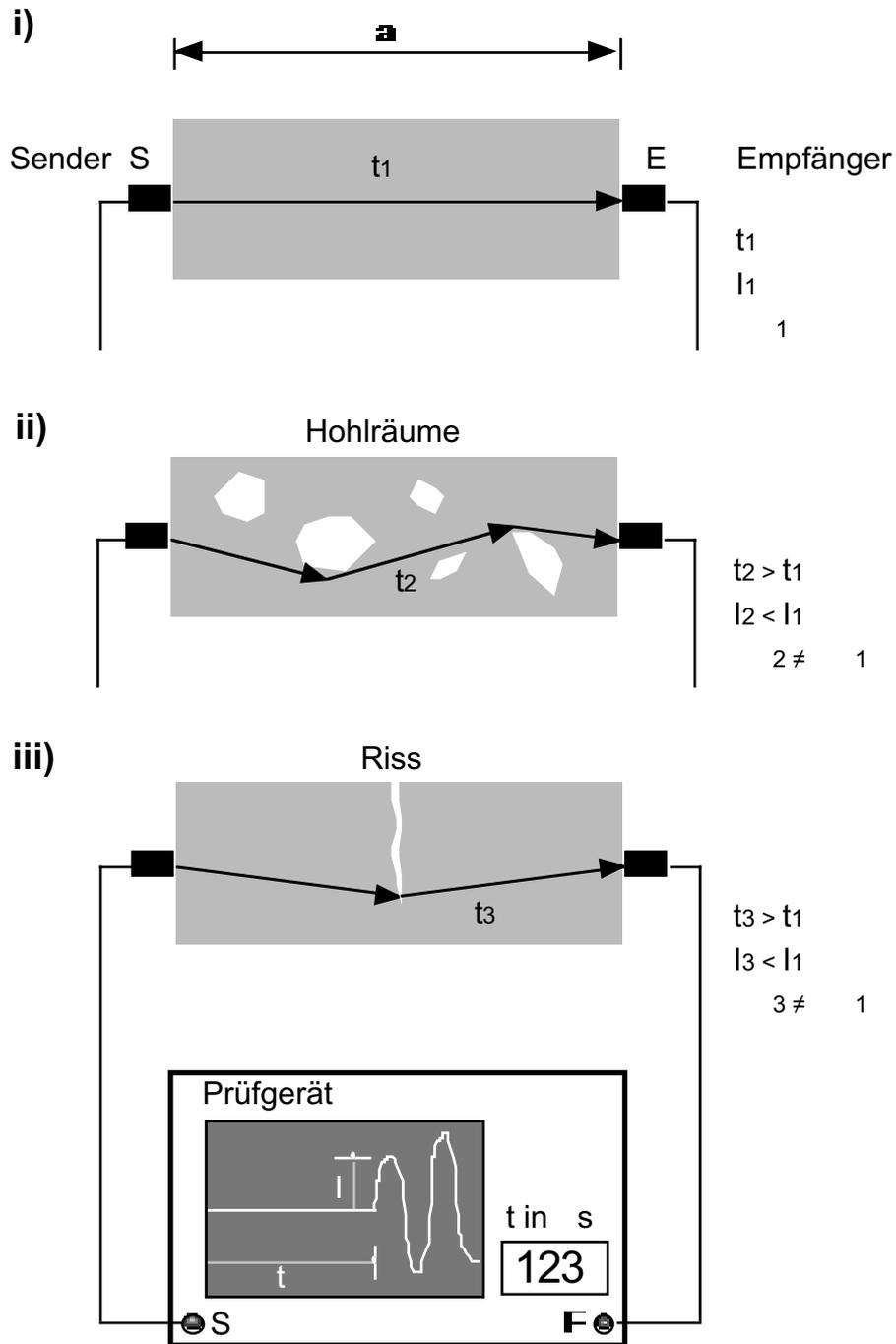
Zur Durchschallung eines Bauteiles erfolgt die Schalleinleitung in den Prüfkörper durch einen Sendeprüfkopf. Das ausgesendete Schallsignal wird auf der gegenüberliegenden Fläche des untersuchten Bauteils durch einen separaten Empfangskopf detektiert. Daher ist i.d.R. das Einmessen eines deckungsgleichen Rasters von Messpunkten auf beiden Flächen erforderlich, d.h. das Bauteil muss zweiseitig zugänglich sein. Das Durchschallungsverfahren ist technisch vergleichsweise anspruchslos, da i.d.R. keine besonderen Anforderungen z.B. bezüglich der Richtcharakteristik der Prüfköpfe oder der elektronischen Messvorrichtung werden müssen. Daher wird dieses Verfahren, nach einigen Voruntersuchungen in den 1930'er Jahren, seit etwa 1960 praktisch eingesetzt (s. z.B. [POHL1965], einen historischen Abriss geben [REHM1973] und [TEODORU1989]). Je nach dem vorrangig ausgewerteten schallphysikalischen Parameter unterscheidet man die nachfolgenden Verfahren.

3.1.1 Ultraschalllaufzeit-Verfahren

Die Impulslaufzeit durch eine Baustoffprobe oder den untersuchten Abschnitt eines Bauteils/Bauwerks hängt von dem geometrischen Abstand Sender-Empfänger sowie von der Art und den Herstellungseigenschaften des Baustoffs (bei Beton i. W.: Zuschlagart und Sieblinie, Zementart, Konsistenz, Verdichtung) und auch von seinem jeweiligen Erhaltungszustand (Fehlstellen, Risse usw.) ab. Das grundsätzliche Messprinzip zeigt BILD 3.1. Das Ultraschall-Prüfgerät generiert zunächst den Anregungsimpuls für den Sendeprüfkopf S und ermittelt dann die Laufzeit t des Ultraschall-Impulses auf seinem jeweils kürzest möglichen Weg durch das Bauteil (vgl. auch DIN/ISO 8047) durch Detektion des transmittierten Signals am Empfangsprüfkopf E. Die Bestimmung der Impulslaufzeit erfolgt dabei visuell oder automatisch anhand der ersten Impulsflanke am Oszilloskopbildschirm, dem so genannten *A-Bild*.

3.1.2 Ultraschallintensitäts-Verfahren

Für den Einsatz des Ultraschallintensitäts-Verfahrens gelten zunächst die gleichen Vorgaben wie beim Laufzeit-Verfahren. Neben der Laufzeit wird hier zusätzlich die Intensität I des empfangenen Impulses ermittelt. Als Messgröße wird häufig die Höhe der ersten Schwingungsamplitude des Empfangsimpulses ermittelt (eingebürgert hat sich dafür der Begriff Intensität, obwohl es sich physikalisch exakt um den Schalldruck handelt (s. KAP. 2.1.3)). Das Prüfgerät muss daher zusätzlich zur Ermittlung der Laufzeit eine Anzeige der Amplitudenhöhe besitzen (Bildschirm, kalibrierter Verstärkungssteller). Die Impulsintensität hängt von der Länge des Schallweges im Baustoff/Bauteil, von Materialeigenschaften/-zustand und entscheidend auch von der Ankopplung, also den Schallverlusten zwischen den Prüfköpfen und der Baustoff-/Bauteiloberfläche ab. Unabdingbare Voraussetzung für auswertbare Messungen ist daher in jedem Fall eine weitgehend *reproduzierbare* Ankopplung, damit das Nutzsignal nicht von Schallverlusten durch die Ankopplung überdeckt wird. Die Impulsintensität reagiert wesentlich empfindlicher auf Fehlstellen (Verdichtungsmängel, Hohlräume) als die Impulslaufzeit. Dieser Vorteil lässt sich aufgrund des großen Einflusses der Ankopplungsbe-



mit:

t Impulslaufzeit

l Intensität

Frequenzbandbreite/-spektrum

BILD 3.1: Durchschallungsverfahren (nach [DGZfP1999])

dingungen auf die Intensität in der Praxis jedoch nur selten nutzen.

3.1.3 Ultraschallfrequenz-Analyse

Das zur Prüfung mineralischer Baustoffe eingesetzte Frequenzspektrum der Ultraschallimpulse liegt i.d.R. zwischen 50 kHz und 250 kHz. Mittels eines Frequenz-Analysators können die Intensitäten der einzelnen Frequenzanteile eines Impulses - also sein Frequenzspektrum - ermittelt werden. Da jeder Baustoff die einzelnen Frequenzanteile in Abhängigkeit von seinem Zustand (z.B. Grad der Erstarrung/Erhärtung) unterschiedlich schwächt, bietet die Ultraschallfrequenz-Analyse eine Möglichkeit, Materialzustände mittels dieser Messgröße zu charakterisieren. Das Verfahren befindet sich z.Z. noch im Forschungsstadium; eine ausführliche Untersuchung hierzu findet sich in [JONAS1996]. Des Weiteren basiert das sog. Impaktecho-Verfahren wesentlich auf einer frequenzanalytischen Auswertung (s. KAP. 3.3)

3.2 Ultraschallecho-Verfahren

Bei nur einseitiger Zugänglichkeit eines Bauteiles müssen Prüfverfahren eingesetzt werden, die nach dem *Echo*-Prinzip arbeiten. Hierbei leitet ein angekoppelter Sendeprüfkopf einen kurzen Ultraschallimpuls in das untersuchte Bauteil. Ein Empfangsprüfkopf, der auf der selben Bauteilfläche angekoppelt ist, detektiert die von Bauteiloberflächen, Konstruktionselementen oder Fehlstellen (Reflektoren) reflektierten Impulsanteile (Echos). Durch Auswertung der Impulslaufzeit t (sowie ggf. weiterer Messgrößen wie Intensität oder Frequenz) können Aussagen über die Tiefenlage und die Ausdehnung der Reflektoren getroffen werden. Vom Prinzip ermöglicht das Echo-Verfahren, den Abstand bis zur ersten Grenzschicht zwischen zwei Medien mit deutlich unterschiedlicher Schallimpedanz (z.B. Stahl Luft, s. KAP. 2.2) zu ermitteln. Ob es sich dabei um die Dicke des Bauteils, eine Ablösung, einen Riss, eine konstruktiv bedingte Trennschicht o.a. handelt, kann den Daten oft nicht direkt entnommen werden. Zur Beurteilung sind dann zusätzliche Randinformationen (z.B. über Werkstoffeigenschaften, Konstruktionsunterlagen) notwendig.

Aufgrund der heute bei Prüfköpfen überwiegend eingesetzten piezoelektrischen Schwingerkeramik (s. KAP. 4.2) dient i.d.R. ein Prüfkopf unter Ausnutzung des reziproken und direkten piezoelektrischen Effektes gleichzeitig als Sender und Empfänger (SE-Prüfkopf). Durch die Verwendung eines SE-Prüfkopfes werden punktuelle Messungen in schneller Abfolge bzw. kontinuierliche Messungen möglich, wodurch Akzeptanz und Handhabbarkeit des Verfahrens erheblich erhöht werden. Solche Ultraschallecho-Verfahren werden z.B. bei der Prüfung von Metallen, insb. Stahl, seit langem als normierte und zertifizierte Standardverfahren eingesetzt (s. KAP. 3.4). Bei der Betonprüfung konnte das Verfahren bis zu Beginn der 1990´er Jahre praktisch nicht mit Erfolg eingesetzt werden, da weder geeignete Prüfköpfe noch aussagekräftige Auswerteverfahren sowie keine hinreichend angepassten Prüfgeräte zur Verfügung standen. Insbesondere ergeben sich bei der Prüfung von Beton folgende, erschwerte Bedingungen gegenüber der Prüfung von Stahl:

- hoher Schallenergieeintrag bei geringer Totzeit

Um der hohen Schallabsorption im Beton entgegenzuwirken, muss durch den Prüfkopf ein Schallimpuls mit möglichst hoher Intensität ausgesendet werden. Da der Prüfkopf jedoch zum Empfang der Echoimpulse innerhalb kurzer Zeit ($< 50\mu\text{s}$) wieder zur Ruhe kommen muss, ist es erforderlich, seine Schwingerkeramik auf mechanischem und/oder elektrischem Wege zu dämpfen. Während Bemühungen, den Prüfkopf auf elektrischem Wege zu dämpfen, nicht erfolgreich waren (s. z.B. [HILLGER1983]), konnten neuartige Prüfköpfe ([DEUTSCH1991], [KRAUTKRÄMER1996]) entwickelt werden, die in ihrer mechanischen Dämpfung speziell an den Werkstoff Beton angepasst wurden. Hierdurch wurde nicht nur ein schallphysikalisch optimaler Energieeintrag (Durchlasskoeffizient $D \approx 1$) in den Beton erreicht, sondern auch Totzeiten z.T. unter $20\mu\text{s}$ realisiert.

- hohe Empfindlichkeit bei Frequenzen zw. 50 - 250kHz

Die starke Schallstreuung an den Inhomogenitäten des Baustoffs Beton erfordert zwingend die Verwendung von Frequenzen unterhalb 250kHz (s. KAP.

2.2). Die zur Prüfung von Stahl verwendeten Prüfköpfe mit Schwingerdurchmessern $D < 1\text{cm}$ weisen schon aus schallphysikalischen Gründen keine nennenswerte Übertragung von Frequenzen unterhalb 250kHz auf. Die neuentwickelten Prüfköpfe zur Betonprüfung mit Schwingerdurchmessern von $D \geq 4\text{cm}$ gewährleisten eine hinreichende Übertragung im relevanten Frequenzbereich bei bauartbedingten Mittenfrequenzen von 50-500 kHz (s.a. KAP. 4.2). Zum Empfang der signifikanten, niederfrequenten Schallanteile ist allerdings i.d.R. zusätzlich eine empfangsseitige Tiefpassfilterung der Frequenzen unterhalb 250kHz erforderlich (s. KAP. 4.1). Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich, im Gegensatz zur Stahlprüfung, auch bei Schwingerdurchmessern von $D \geq 4\text{cm}$ kein Schall-Nahfeld ausbildet, d.h. eine kugelförmige Schallausbreitung stattfindet. Die Schwächung des Schallsignals durch diese geometrische Divergenz mit $1/r^2$ ist physikalisch unvermeidlich und daher durch andere Maßnahmen auszugleichen (Tiefenausgleich, s. KAP. 4.1).

- gleichmäßige Ankopplung an die Betonoberfläche

Um optimal aussagefähige Prüfergebnisse zu erreichen und insb. die Messgröße Intensität einer reproduzierbaren Auswertung zuzuführen, ist eine möglichst gleichmäßige Ankopplung des Prüfkopfes an die Oberfläche erforderlich. Während diese bei der Prüfung von Stahl i.d.R. wenig Probleme bereitet, sind zur Ankopplung des Prüfkopfes an raue Betonoberflächen geeignete Vorbereitungen (z.B. Abschleifen) zu treffen und geeignete Koppelmittel zu finden. Auf diese Besonderheiten wird in KAP. 4 - 6 dieser Arbeit ausführlich eingegangen.

Unter Berücksichtigung dieser genannten Besonderheiten bei der Prüfung von Beton wurde das Ultraschallecho-Verfahren in den letzten Jahren, unter anderem in dieser Arbeit, für zahlreiche Fragestellungen zur Anwendungsreife fortentwickelt. Wegen der unterschiedlichen Aufgabenstellung stehen verschiedene Verfahrensmodifikationen zur Auswahl, die sich hinsichtlich Prüfaufwand und Aussagefähigkeit z.T. deutlich unterscheiden. Zum ausführlichen Studium insb. der technischen Details der einzelnen Verfahren wird auf die u.g. Literaturhinweise verwiesen. Eine weitreichende Übersicht findet sich

in [KRIEGER1998], eine knappe Darstellung in [KRAUSE1995]. Prinzipiell lassen sich die Verfahren nach der Art der Datenaufbereitung einteilen wie folgt.

3.2.1 A-Bild

Für schnelle und vorwiegend punktuelle Messungen kann das technisch weniger aufwendige A-Bild-Verfahren eingesetzt werden. Die Darstellung des Ultraschallsignals erfolgt (wie beim Durchschallungsverfahren) direkt am Oszilloskop bzw. einem vergleichbaren, in das Prüfgerät integrierten Bildschirm. Bei neueren Prüfgeräten dieses Verfahrens ist die Bildaufbereitung vollständig digital, so dass auf einfache Weise automatisierte Laufzeitbestimmungen und Differenzmessungen der Intensität sofort in db erfolgen können. Da sich die verwendeten Prüfgeräte weitestgehend aus den in der Stahlprüfung verwendeten ableiten, bieten sie dem Prüfer eine weitgehend standardisierte Bedienung mit den erforderlichen Einstellmöglichkeiten hinsichtlich Impulsgeneration, Blenden, Frequenzfilterung und Verstärkung. Durch die kompakte und i.d.R. netzunabhängige Bauweise können die Geräte auch auf der Baustelle flexibel eingesetzt werden. Die Arbeitsweise verdeutlicht BILD 3.2.

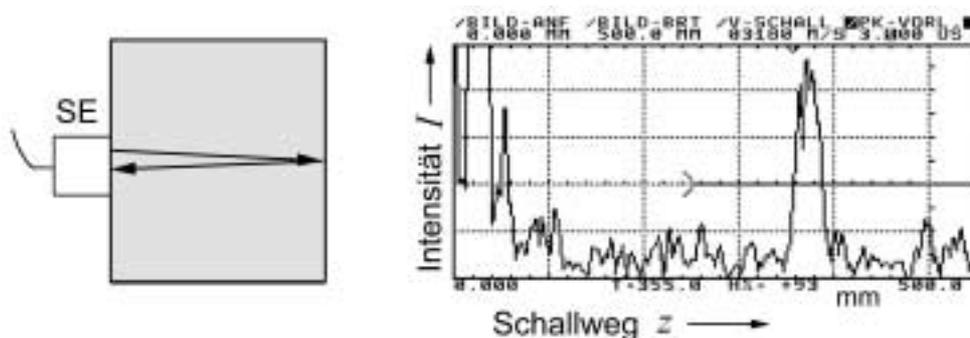


BILD 3.2: A-Bild in „Videodarstellung“ (gleichgerichtet) (Quelle: [DGZfP1999])

Deutlich signifikantere Prüfergebnisse insb. bei der Bestimmung der Wanddicke von massiveren Bauteilen können durch die Auswertung mehrerer A-Bilder von verschiedenen Prüfstellen erreicht werden. Hier finden zwei erweiterte Verfahren Anwendung. Die Array-Technik [KROGGEL1995, KROGGEL1998] verwendet bis zu 16 Prüfköpfe, die gleichzeitig stationär mit Schnellzement an

den Prüfkörper angekoppelt werden. Durch eine rechnergestützte, phasenempfindliche Korrelation der einzelnen A-Bilder können Störanteile bei größeren Schalllaufwegen wirksam minimiert werden, so dass die Bestimmung von Bauteildicken von mehr als 1m möglich wird. Ebenso vorteilhafte Ergebnisse können erzielt werden, wenn die Echosignale einer mit reflektierender Beschichtung versehenen Bauteiloberfläche über einen Laserscanner detektiert werden und über ein aus der RADAR-Technik stammendes Rechenverfahren (L-SAFT, synthetische Apertur) gemittelt werden ([KRAUSE1995-2]). Beide Verfahren erfordern allerdings einen relativ hohen technischen und rechnerischen Aufwand, so dass sich der Einsatz nur dann empfiehlt, wenn die einfache Auswertung eines A-Bildes keine signifikanten Ergebnisse liefern kann. Dieses ist z.B. dann der Fall, wenn bei massiveren Bauteilen das verbaute Größtkorn größer 16mm ist oder engmaschige oberflächennahe Bewehrung das Einzel-A-Bild stark stört.

3.2.2 B-Bild

Für anspruchsvollere Prüfaufgaben am Werkstoff Beton (z.B. Ortung tiefer liegender Defekte ggf. bei störendem Einfluss von Bewehrung) erweist sich die unaufbereitete Darstellung und optische Auswertung einzelner A-Bilder oft als zu wenig aussagekräftig. Daher werden Mess- und Auswerteverfahren benötigt, die zusätzliche Informationen zur Verfügung stellen, aber dennoch eine baustellenpraktische, schnelle Untersuchung ermöglichen.

Daher wurde, insbesondere im Rahmen dieser Arbeit, die rechneraufbereitete Wiedergabe der Messergebnisse im sog. B-Bild fortentwickelt und baupraktisch untersucht (KAP. 4 - 6). Ein B-Bild entsteht durch die Aneinanderreihung und zeitgleiche Darstellung einer Vielzahl von A-Bildern („Schüsse“, single shots), deren Spannungswerte auf der Zeitachse zuvor digitalisiert und in Farb- oder Graustufenwerten auf einem Bildschirm wiedergegeben werden (s. BILD 3.3). Diese Befunddarstellung hat den deutlichen Vorteil, dass dem Prüfer z.B. beim manuellen Verschieben des Prüfkopfes auf der Betonoberflä-

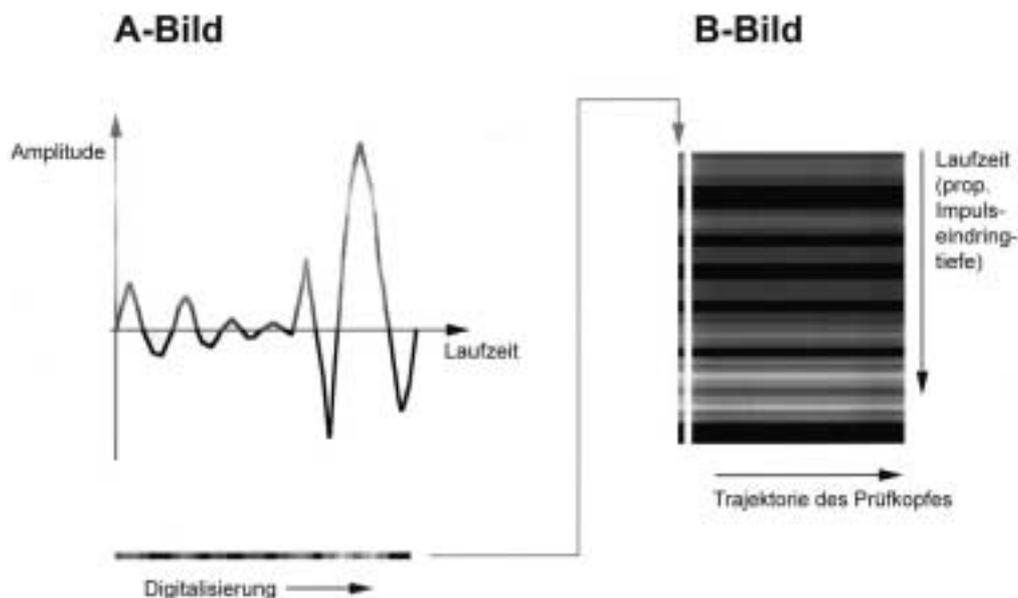


BILD 3.3: Erzeugung eines B-Bildes

che eine Vielzahl von Einzelmessungen benachbarter Prüfstellen gleichzeitig und in anschaulicher Form visualisiert wird. Er wird so in die Lage versetzt, auch Phasen- und Intensitätsparameter relativ zueinander auszuwerten, wodurch z.B. nicht relevante Störungen (Artefakte) sehr viel besser als im Einzel-A-Bild erkannt werden können. Das so erzeugte, zweidimensionale Schnittbild durch den Prüfkörper lässt ggf. zudem eine Abschätzung der Geometrie der untersuchten „Fehlstelle“ (z.B. Hohlraum, Spannkanal) zu, wobei allerdings berücksichtigt werden muss, dass das Reflektorbild aufgrund der kugelförmigen Ausbreitung der Schallwellen hyperbolisch verzerrt erscheint (s.a. KAP. 5).

Gegenüber der A-Bild-Darstellung ist ein erhöhter technischer Aufwand zur Digitalisierung der Signaldaten und Erzeugung des B-Bildes erforderlich. Das erforderliche Prüfgerät wurde daher in mehreren Stufen entwickelt (s. KAP. 4.1). Für den baupraktischen Einsatz wurde insbesondere angestrebt, die B-Bilder vollständig in Echtzeit zu generieren und alle Komponenten des Prüfsystems in ein kompaktes Gerät zu integrieren. Durch die Verwendung von mikroelektronischen Bauteilen, die erst seit Mitte der 1990´er Jahre preiswert

zur Verfügung stehen, konnten diese Anforderungen erfüllt werden. Ein in das Prüfgerät integrierter Standard-Pentium-PC ermöglicht nunmehr durch Einsatz der speziellen Software US-SCAN 2.0 eine Online-Bildverarbeitung mit Falschfarben- oder Grauwertdarstellung in Echtzeit. Durch die Online-Darstellung werden relative Abweichungen im Prüfkörper sehr schnell deutlich und können nach der anfänglich groben Lokalisierung genauer untersucht werden. Der Prüfer kann die Prüfparameter in einem weiten Bereich variieren und der Prüfaufgabe optimal anpassen (Details s. KAP. 4.1 und 5). Die Befunddarstellung im B-Bild erweist sich dabei insbesondere bei der Lokalisation von Defektechos oder im A-Bild unklarer Rückwandechos als vorteilhaft. Für beide Darstellungsarten gilt allerdings, dass die Erfahrung des Prüfers wesentlichen Einfluss auf den Erfolg einer Messung hat. Während beim A-Bild die Schwierigkeit vorwiegend in der richtigen Interpretation desselben liegt, ist beim B-Bild die optimale Justierung der Prüfparameter entscheidend, um einen eindeutigen und aussagefähigen „Scan“ zu erhalten. Zur Erstellung eines signifikanten B-Bildes ist zudem auf eine möglichst gleichmäßige Ankopplung des Prüfkopfes über die Messstrecke zu achten (s. KAP. 4.2f). BILD 3.4 zeigt das am Probekörper **BAM1** (s. KAP. 5.2) gewonnene B-Bild eines leeren Spannkanales in Graustufendarstellung.

Aufbauend auf der Methode des B-Bildes gibt es auch hier ein erweitertes Verfahren, welches unter Verwendung eines SAFT-Algorithmus (Synthetische

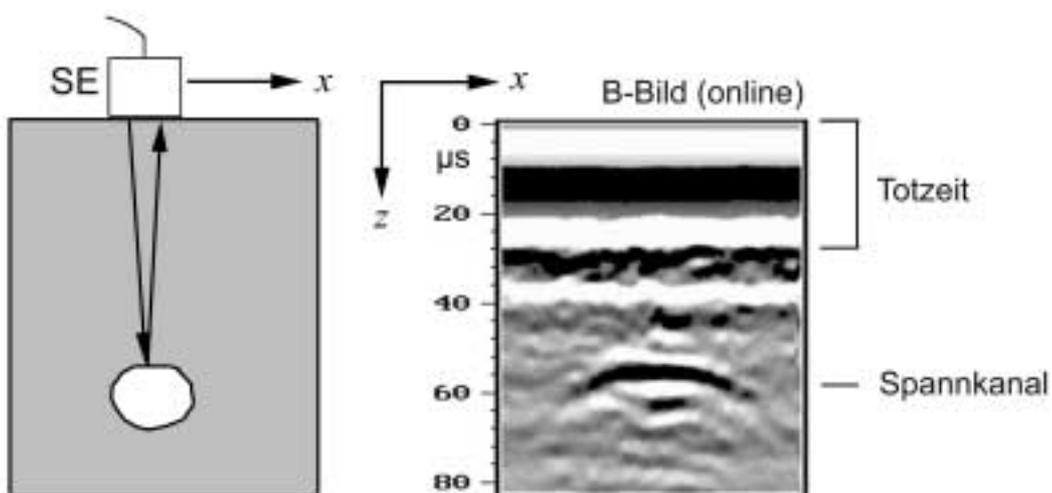


BILD 3.4: Skizze und B-Bild eines Spannkanales in einer Tiefe von ca. 10cm

Apertur) eine nachträgliche, verbesserte Bildrekonstruktion ermöglicht. Dieses kann insbesondere dann eingesetzt werden, wenn das Online-B-Bild keine hinreichend signifikanten Aussagen zulässt ([SCHICKERT1995], [SCHICKERT1996]). Ein Beispielbild mit zwei detektierten Bohrungen ($\varnothing = 55\text{mm}$) zeigt BILD 3.5.

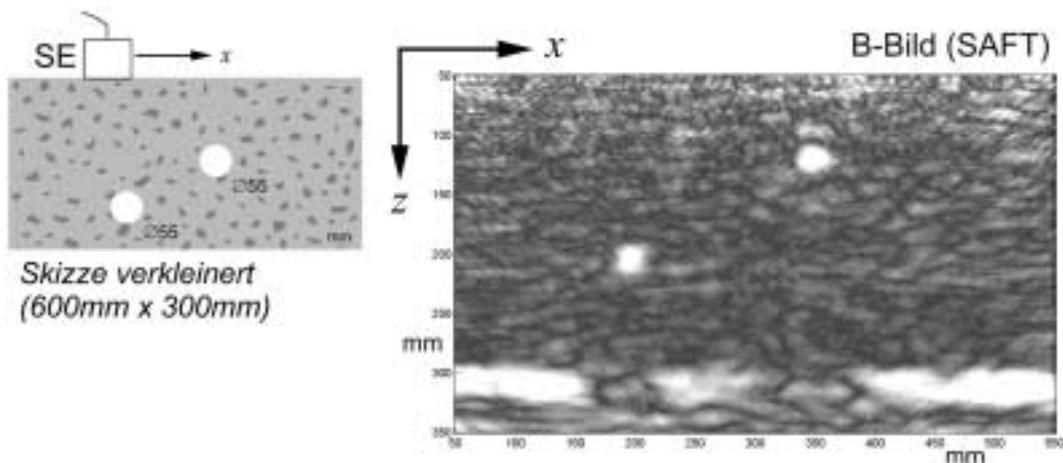


BILD 3.5: B-Bild von 2 Bohrlöchern ($\varnothing = 55\text{mm}$) nach SAFT-Rekonstruktion (Quelle: [DGZfP1999])

3.2.3 Rekonstruktion (C-Bild, D-Bild)

Zur volumenaufgelösten Analyse von Prüfkörpern ist es erforderlich, neben den Messdaten über den Messpfad x mit der Einschallrichtung z zusätzlich über den zu x orthogonalen Messpfad y Daten zu gewinnen. Das Prinzip der so erhaltenen Projektion veranschaulicht BILD 3.6.

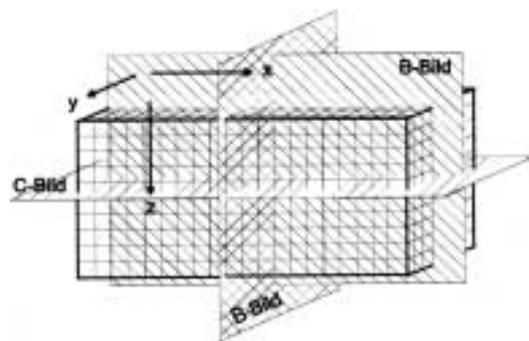


BILD 3.6: Prinzip eines C-Bildes (Quelle: Krause in [KRIEGER1998])

Da jeweils nur 3 Parameter in einer Abbildung aufgetragen werden können, unterscheidet man zwischen C-Bild, sofern die Signalamplitude A zur Aus-

wertung gelangt, bzw. D-Bild, wenn die Signallaufzeit t ausgewertet wird (s. TAB. 3.1). Der Betrag von Amplitude bzw. Laufzeit wird dabei i.d.R. in Farb- oder Grauwerten kodiert. Da

Bildtyp	Flächen-Koordinaten		Signal-Amplitude	Signal-Laufzeit	Art der Datenerfassung
	x	y	A	t	
A-Bild	•		•	•	$A = f(t)$
B-Bild	•		•	•	$A = f(x,t)$
C-Bild	•	•	•		$A = f(x,y)$
D-Bild	•	•		•	$t = f(x,y)$

TAB 3.1: Bildgebende Ultraschallverfahren (nach [MATTHIES1998])

bei der Betonprüfung vom Prinzip nur punktuelle Messungen möglich sind, müssen C- und D- Bild in recht aufwendigen Verfahren im Rechner aus den Einzelmessungen rekonstruiert werden. Aufgrund der kugelförmigen Schallfeldcharakteristik in Beton ist es zusätzlich erforderlich, fortgeschrittene und aufwendige Rechenalgorithmen (z.B. SAFT, [KRAUSE1996]) und ggf. Rechenmodelle (z.B. EFIT [MARKLEIN1996], s.a. [MAYER1990], [MÜLLER1996]) anzuwenden, die hier nicht weiter erläutert werden. BILD 3.7 zeigt ausschnittsweise ein C-Bild des in KAP. 5.2 näher beschriebenen Probekörpers **BASt1** mit einem Spannkanal in ca. 10cm Tiefe.

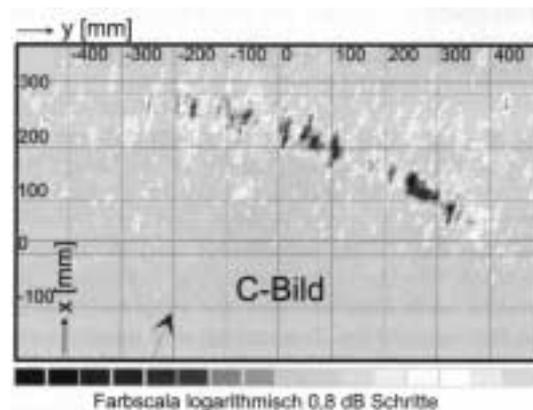


BILD 3.7: C-Bild am Probekörper **BASt1** (Quelle: Krause in [KRIEGER1998])

3.3 Impaktecho-Verfahren

Das Impaktecho-Verfahren (Schlag-Echo) arbeitet ebenfalls in Reflexion und nutzt im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen Verfahren sowohl Ultraschall als auch Hörschall [SANSALONE1989]. Es handelt sich um ein spezielles Schallverfahren, welches hier der Vollständigkeit halber aufgeführt wird. Für das Verfahren gelten vom Prinzip diesselben Zusammenhänge für die Schallausbreitung wie zuvor, insbesondere auch, was die Streueffekte der

Zuschläge und die Erkennbarkeit von Fehlstellen betrifft. Die beim Impactecho-Verfahren zusätzlich ausgewerteten, niedrigeren Prüffrequenzen unterhalb 50kHz (d.h. $\lambda > 8\text{cm}$) reduzieren die Streueinflüsse üblicher Zuschläge, vergrößern jedoch gleichzeitig die für die Erkennbarkeit notwendige Minimalausdehnung eines Defekts oder eines Einbauteils wie z.B. eines Spanngliedes.

Anregung und Nachweis der mechanischen Wellen unterscheiden sich beim Impactecho von der in KAP. 3.1 und 3.2 beschriebenen Technik bei Ultraschalluntersuchungen. Die Schallerzeugung erfolgt durch mechanischen Stoß (z.B. Anprall einer Kugel), der Nach-

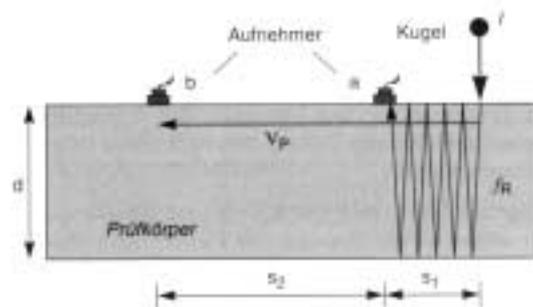
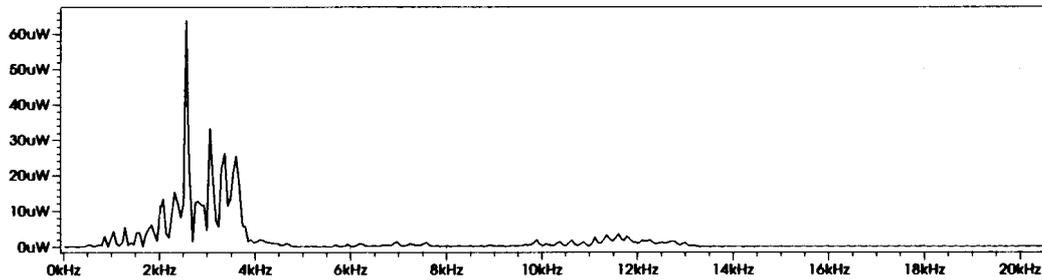


BILD 3.8: Prinzipskizze zum Impactecho-Verf. (Quelle: Köhler in [KRIEGER1998])

weis der reflektierten Welle durch Beschleunigungsaufnehmer mit Punktkontakt zur Oberfläche des Untersuchungsobjekts. Damit entfallen die Probleme der Ankopplung flächenhafter Prüfköpfe, aber auch deren integrierender Effekt für die Heterogenität des Baustoffs Beton. Zuschlagkörner verhalten sich unter Stoßbelastung anders als benachbarte Mörtelbereiche (s. auch DIN 1048, Teil 2, Rückprallhammer).

Das breite Frequenzspektrum der durch Stoß erzeugten mechanischen Wellen regt in der untersuchten Struktur Resonanzen an, wenn mindestens eine kennzeichnende geometrische Abmessung der Struktur in einer festen Beziehung zur Wellenlänge steht. Dies der Fall bei Platten und durch oberflächenparallele Risse abgelöste Plattenschichten sowie insbesondere bei der Bestimmung von Wanddicken.

Die in der Nachbarschaft des Anregungspunktes registrierte Oberflächenbeschleunigung wird daher auf Resonanzen und die zugehörigen Frequenzen untersucht. Die Interpretation der auftretenden Amplitudenmaxima als Funktion der Frequenz stützt sich grundsätzlich auf die Beziehung $f_0 = v/2D_0$,



**BILD 3.9: Impaktespektrum einer Rückwandreflexion bei $d=70\text{cm}$
(Quelle: Köhler in [KRIEGER1998])**

wobei f_0 die Frequenz der Grundresonanz, v die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle im Baustoff und D_0 die Dicke des resonanten Bereichs - im Allgemeinen die gesuchte Größe - bedeuten. BILD 3.9 zeigt als Beispiel die Impaktespektrum-Ortung einer Rückwand am Probekörper **BAS1** (vgl. KAP. 5.2) mit einer Dicke von 70cm.

3.4 Normen, Richtlinien, Merkblätter

Zur Ultraschallprüfung von Stahl besteht in Deutschland ein recht umfangreiches Regel- und Zertifizierungswerk. Allgemeine Begriffe erläutert die

- DIN EN 1330, (ehemals DIN 54119):
Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie
- Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung; Dreisprachige Fassung EN 1330-4:2000.

Zur Zeit werden für die Stahlprüfung auf europäischer Ebene vereinheitlichte Normen erarbeitet. Das Vorgehen bei der Prüfung regelt dabei die

- DIN EN 583, (z.T. Norm-Entwurf):
Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung
- Teil 1: Allgemeine Grundsätze; Deutsche Fassung EN 583-1:1998
- Teil 2: Empfindlichkeits- und Entfernungsjustierung; Dtsch. F. prEN 583-2:1997
- Teil 3: Durchschallungstechnik; Dtsch. F. EN 583-3:1997
- Teil 4: Prüfung auf Inhomogenitäten senkrecht zur Oberfläche; prEN 583-4:1999
- Teil 5: Beschreibung u. Größenbest. v. Unregelmäßigkeiten; prEN 583-5:1998
- Teil 6: Beugungslaufzeittechnik, (...) Inhomogenitäten; ENV 583-6:2000.

Zur Gerätetechnik wird vorbereitet die

- DIN EN 12668, (z.T. (Norm-Entwurf):
Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der
Ultraschall-Prüfausrüstung
 - Teil 1: Prüfgeräte; Deutsche Fassung EN 12668-1:2000
 - Teil 2: Prüfköpfe; Deutsche Fassung prEN 12668-2:1998
 - Teil 3: Komplette Prüfausrüstung; Deutsche Fassung EN 12668-3:2000.

Auch für fortgeschrittene Systeme, die nach dem Ultraschallecho-Prinzip arbeiten, befinden sich Normen in Vorbereitung, z.B.

- DIN IEC 87/81/CDV, (Norm-Entwurf):
Ultraschall - Echtzeit-Impulsechoabtastsysteme
 - Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit (IEC 87/81/CDV:1995)

Für den Bereich der Betonprüfung existieren z.Z. nicht annähernd detaillierte Normen oder Normvorbereitungen. Standardisiert ist lediglich die Bestimmung der Schalllaufzeit in Durchschallung zur Detektion relativer Abweichungen sowie zur groben Abschätzung der Betonqualität in der Norm

- DIN-ISO 8047:
Festbeton
 - Bestimmung der Ultraschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit , Ausgabe:1982-12

und in der daraus abgeleiteten, vorläufigen Norm:

- DIN EN 13296, (Norm-Entwurf):
Produkte von Beton
 - Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit; Dt. Fassung prEN 13296:1998

Auf internationaler Ebene existieren weitere Normen und Richtlinien der jeweils nationalen Standardisierungsinstitutionen wie RILEM (Großbritannien), ASTM (USA) u.a., die [JONAS1996] erläutert. Für den deutschen Raum finden sich in Ergänzung zur DIN1048 (Teil2, Abschn. 5.2 „Bestimmung der

Betondruckfestigkeit mit dem Rückprallhammer) genauere Hinweise zum Einsatz der Ultraschall-Laufzeitmessung und deren empirischen Korrelation mit der Betondruckfestigkeit in

- Heft 422 des „Deutschen Ausschusses für Stahlbeton“ [DAfStB1991].

Eine umfassende und aktuelle Zusammenfassung gibt das 1999 in überarbeiteter Fassung vorgelegte

- Merkblatt B4 der „Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung“
 - Unterausschuss Ultraschallprüfungen des DGZfP-Ausschusses „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (AB)“ [DGZfP1999]:

Merkblatt für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile.

Das Merkblatt wurde unter Mitarbeit der meisten in Deutschland in Praxis und Forschung auf dem Gebiet der Ultraschallprüfung von Beton tätigen Institute und Unternehmen erstellt und bietet einen Überblick und allgemeinverständliche Erläuterungen zum gegenwärtigen Entwicklungsstand. Unter Mitarbeit eines Teiles der Autorengruppe wird derzeit zudem angestrebt, dringend benötigte Normierungsrichtlinien ähnlich den für die Stahlprüfung aufgezeigten zu erarbeiten (vgl. KAP. 7.2).

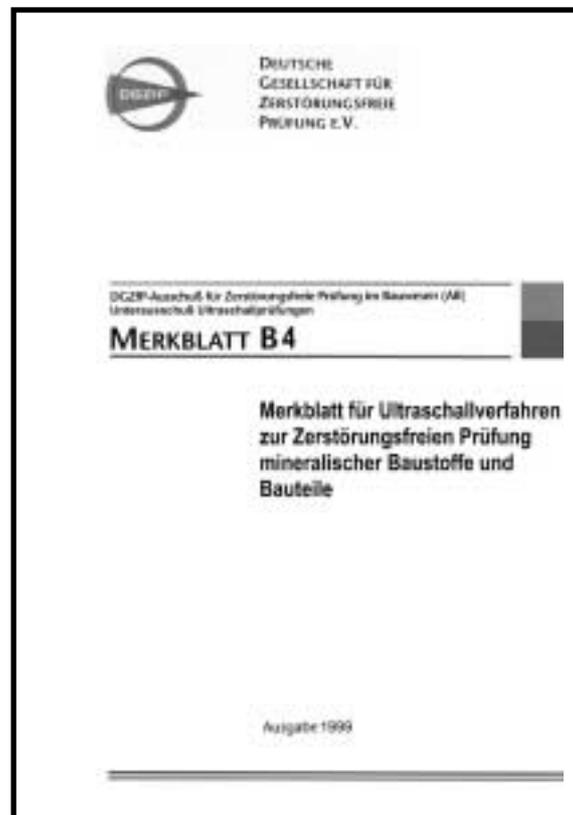


BILD 3.10: Merkblatt B4 der DGZfP

4. Untersuchungen zur Verbesserung der Ultraschall-Prüftechnik

4.1 Aufbau und Modifizierung der Prüfeinrichtung

Für die Ziele dieser Arbeit war es zunächst geboten, eine funktionsfähige und störungsfrei arbeitende Ultraschallecho-Prüfeinrichtung aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Zu diesem Zweck wurde ein bisher im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung an Kunststoffen und Metallen eingesetztes, kommerzielles Hochfrequenz-Ultraschallecho-Prüfgerät (HFUS2000 bzw. NFUS2000, [HILLGER1990]) vom Hersteller dahingehend modifiziert, dass Messungen in dem am Beton sinnvollen Frequenzbereich von ca. 30 - 250kHz möglich wurden. Weiterhin wurde ein kommerzieller, völlig neuartiger Prüfkopf (IE40/0,3-1, [DEUTSCH1991]) erworben, der sich durch seine spezifischen Eigenschaften (s. KAP. 4.2) ideal und in dieser Form erstmalig für die Ultraschallecho-Prüfung von Beton eignete. Der Aufbau der Prüfeinrichtung erfolgte in drei wesentlichen Stufen. Neben dem Erfahrungsgewinn mit der völlig neuartigen Prüftechnik lag der Entwicklungsschwerpunkt der Stufen 1 und 2 in der technischen Umsetzung einer für den Echo-Betrieb möglichst optimalen Signalkonditionierung und -aufbereitung, die Stufe 3 diente anschließend der weitestgehenden Integration der gesamten Prüftechnik in ein einziges „state-of-the-art“-Gerät, um baustellenpraktische Untersuchungen durchführen zu können. Die Entwicklungsschritte werden nachfolgend detailliert.

4.1.1 A-Bild-Darstellung, Laborbetrieb

Für die anfänglichen Untersuchungen wurde das modifizierte Ultraschall-Prüfsystem NFUS2000 mit A-Bild-(Oszilloskop-) Darstellung in Betrieb genommen. Der zunächst noch recht einfache Aufbau sollte einem ersten Erfahrungsgewinn mit der Prüfmethode am Baustoff Beton führen, um dann schrittweise Verbesserungen insbesondere hinsichtlich der Signalaufbereitung durch angepasste Frequenz-Filterung und -Verstärkung zu implementieren.

ren. Diese Weiterentwicklung war erforderlich, um die durch die Materialeigenschaften des Werkstoffes Beton bedingten hohen Streuanteile (vgl. KAP. 2.2) wirksam zu unterdrücken und somit den Informationsanteil im Prüfsignal weitestgehend zu isolieren und hervorzuheben. Einen Überblick über die Messapparatur in der ersten Ausbaustufe zeigt das Blockschaltbild BILD 4.1.

NFUS 2000 v1

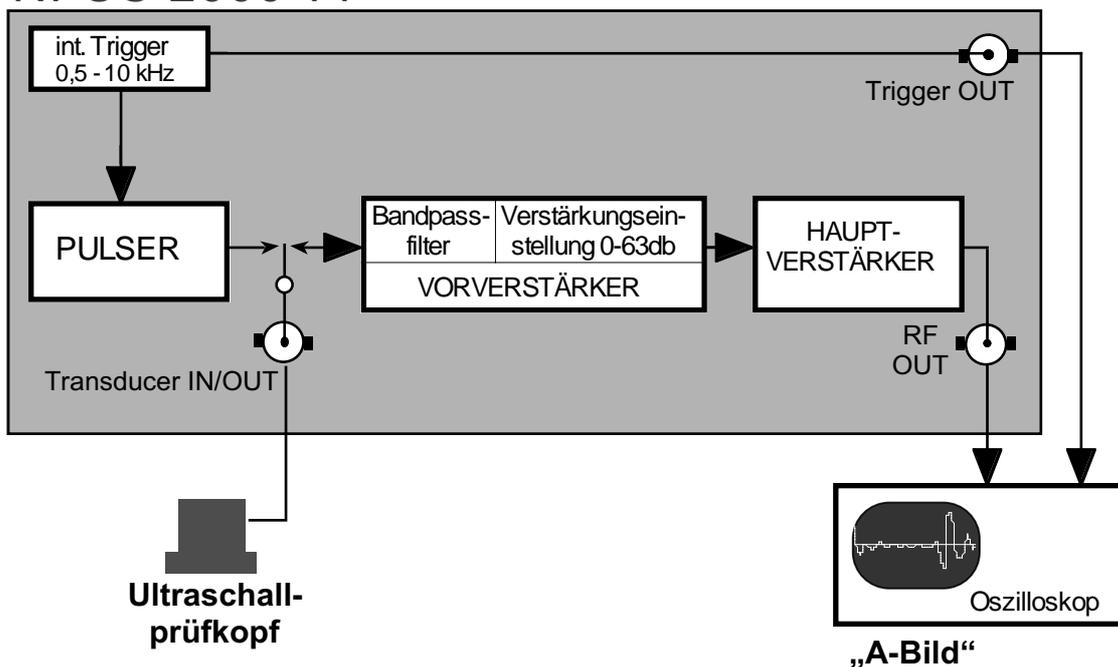


BILD 4.1: Schematischer Aufbau der Prüfeinrichtung mit A-Bild-Darstellung

Über einen im Bereich von 0,5 - 10 kHz stufenweise einstellbaren Trigger wird die Taktrate vorgegeben, mit der die Schallimpulse in den Prüfkörper gesendet werden, somit auch die Anzahl der A-Bilder pro Sekunde. Zur Erreichung einer hellen Anzeige am Oszilloskop ist es von Vorteil, eine möglichst hohe Taktrate zu wählen; allerdings ist sicherzustellen, dass genügend Zeit auch für die erwarteten Echo-Signale zur Verfügung steht (z.B. kann bei einer Triggerfrequenz von $f_{TRIG} = 10\text{kHz}$ (d.h. $T = 100\mu\text{s}$) eine Betonschichtdicke von höchstens 20cm durchschallt werden). Zur Anregung des Prüfkopfes wird von einem Pulsgenerator (Pulser) ein ca. $3\mu\text{s}$ kurzer, breitbandiger Spannungsimpuls mit einer Spitzenamplitude von ca. 300V erzeugt, wobei der nachfolgende Vorverstärker durch eine geeignete Verschaltung gegen die auftre-

tende Spitzenspannung geschützt ist. Nach erfolgtem Anregungsimpuls wird der Vorverstärker freigegeben und gleichzeitig ein Triggerimpuls an das angeschlossene Oszilloskop gesendet. Das



BILD 4.2: Realansicht des NFUS2000v1

Das vom Prüfkopf empfangene Signal wird um 20db vorverstärkt und anschließend linear auf den zur optimalen Oszilloskopanzeige geeigneten Wert verstärkt. Die Einstellung dazu erfolgt durch ein über Tipp - Taster bedienbares Präzisionsdämpfungsglied am Vorverstärker in Schritten von ± 1 bzw. ± 10 db mit einem Dynamikumfang von 63db.

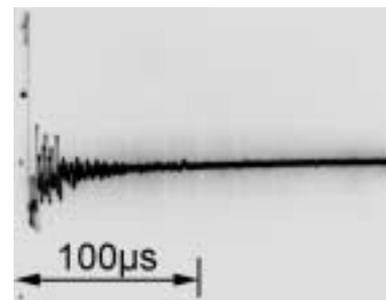
Im Folgenden wurde versucht, die Aussagekraft des Prüfsignals durch eine möglichst optimale Frequenz-Filterung deutlich zu verbessern. Die Abbildungen in BILD 4.3 (und BILD 4.4, s.u.) zeigen qualitativ A-Bilder, die an einem Betonprobekörper (B35, A/B8, fehlerfrei) mit einer Dicke von $d = 20$ cm gewonnen wurden. Die einzelnen Teilbilder dokumentieren schrittweise den Gewinn an Signalqualität.

BILD 4.3i zeigt das A-Bild des breitbandig linear verstärkten Messsignals ohne weitere Signalbeeinflussung (i.F. „Rohdaten“). Nach Abklingen des Anregungsimpulses (linker Bildrand) ist lediglich eine schwache Andeutung des Rückwandechos (Bildmitte) zu erkennen. Um den hochfrequenten, nicht informationstragenden Streuanteil zu unterdrücken, bietet das Prüfgerät die Zuschaltung von Filtern die stufenweise Zuschaltung von Bandpassfiltern mit Mittenfrequenzen von 50, 100, 250, 500 und 1000kHz. BILD 4.3ii zeigt das gefilterte Signal bei einer Bandpass-Mittenfrequenz von 100 kHz. Man erkennt die deutlich bessere Interpretierbarkeit des am Oszilloskop erhaltenen A-Bildes. Als nachteilig erwies sich allerdings die geringe Flankensteilheit des eingebauten Filters. Da beim Werkstoff Beton die an den Grenzflächen reflek-

tierten Echosignale grundsätzlich im unteren Ultraschall-Frequenzbereich (abhängig vom Prüf- beton bis max. 200kHz) liegen und höherfrequentere Signale lediglich als Störanteil betrachtet werden können, wurde zusätzlich ein sehr steilflankiges (-24db/Oktave), stufenlos regelbares Tiefpaßfilter entwickelt. Bei einer Grenzfrequenz von 160kHz konnte nunmehr ein optimal aussagefähiges Signal erzeugt werden.

Zusätzlich ist zu erkennen, dass der Prüfkopf nach seiner Anregung bauart- und schaltungsbedingt für ca. 20µs ausschwingt. In dieser Zeit, welche einer Schall-Eindringtiefe von 4cm entspricht, sind keine sinnvollen Messergebnisse möglich (Totzeit, s.a. KAP. 3.2 und 4.2).

Dennoch erwies sich die visuelle Auswertung von A-Bildern an weiteren, komplexer aufgebauten und dickeren Probekörpern weiterhin teilweise als recht schwierig. Daher wurde die Prüfvorrichtung in einem zweiten Schritt weiter optimiert.



i) Rohdaten, Breitband

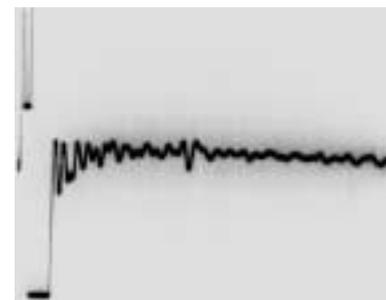
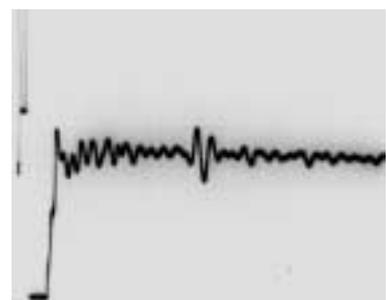
ii) Bandpassfilt. $f_{BP} = 100$ kHziii) Tiefpassfilt. $f_{TP} = 160$ kHz (-24db/Okt.)

BILD 4.3: Signalkonditionierung im A-Bild, Frequenz-Filterung

4.1.2 B-Bild-Darstellung, Laborbetrieb

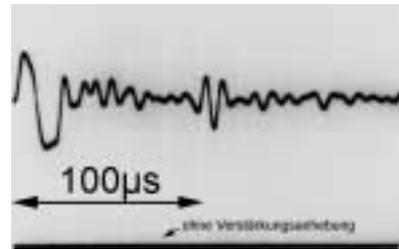
Durch den komponentenweisen Aufbau war es möglich, die in der ersten Ausbaustufe entwickelten Komponenten vollständig weiterzuverwenden und zu ergänzen.

Eine weitere Verbesserung der Auswertbarkeit der Schallsignale konnte durch den elektronischen Ausgleich der hohen Schalldämpfung erzielt werden, die durch die starke Absorption und Streuung der Ultraschallwellen im

Werkstoff Beton und die geometrischen Divergenz des kugelförmige Schallfeldes (s. KAP. 2, [KRAUTKRÄMER1986]) auftritt. Um bei größeren Durchschallungstiefen die Echo-signale etwa der Rückwand überhaupt identifizieren zu können, ist es nötig, sehr hohe Verstärkungen zu verwenden. Bei linearer Verstärkung wird ein Signal aus geringeren Tiefen (z.B. ein Fehlerecho) dann vollkommen übersteuert, da es aufgrund seiner kleineren Laufstrecke entsprechend weniger gedämpft und daher i.d.R. mit einer höheren Amplitude empfangen wird. Das Prüfgerät wird also in solchen Fällen im Nahbereich "blind". Um diesen Effekt auszugleichen, wurde ein sog. Tiefenausgleich implementiert, d.h. eine kontinuierlich regelbare Anhebung der Verstärkung über einen frei zu bestimmenden Bereich des Messintervalls.

Realisiert wurde dieses durch einen spannungsgeregelten Verstärker mit entsprechender Ansteuerung durch einen Rampengenerator. Analog zu BILD 4.3 zeigt BILD 4.4 die so erzielte Signalverbesserung. Auf diese Weise kann ggf. in nur einem Prüfdurchgang sowohl ein lokales Defektecho als auch das ungestörte Rückwandecho des Bauteils detektiert werden. Dabei obliegt es der Erfahrung des Prüfers, Artefakte zu vermeiden.

Zusätzlich wurde es ermöglicht, die Länge des Anregungsimpulses über einen Pulsbreitenregler in 10 Schritten von 1- 5 μ s zu variieren. Ein lang gewählter Impuls ermöglicht einen maximalen (Schall-)Energieeintrag in den Beton, verlängert allerdings auch die Totzeit des Prüfkopfes. Durch die Veränderung des Sendeimpulses hinsichtlich Bandbreite und Impulsenergie lässt sich ein den Prüfbedingungen und den physikalischen Eigenschaften des Prüfkopfes selbst optimal angepasster Wert wählen (s.a KAP. 4.2f). Diese Optimierung kann für jede spezifische Prüfanordnung (Prüfkopf/Koppelmittel/Beton) vom



i) ohne Tiefenanhebung



ii) mit Tiefenanhebung

BILD 4.4 Signalkonditionierung im A-Bild, Tiefenausgleich

Prüfer ohne großen Aufwand vorgenommen werden. Auch die Bauteilstreuung typgleicher Prüfköpfe ist dabei zu berücksichtigen (vgl. KAP. 4.2). Abschließend wurde die oben dargelegte Frequenz-Filterung des Messsignals in den Vorverstärkerteil integriert sowie ein zweiter Empfangskanal implementiert, um zu Forschungszwecken sowohl Messungen nach dem Durchschallungs- als auch nach dem Echo-Verfahren durchführen zu können.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Auswertung von A-Bildern bereiten die aufgrund der natürlichen Inhomogenität des Betons (Zuschlag) auftretenden Streuanteile im Prüfsignal. Im Bereich einer Fehlstelle lässt sich sowohl ein durch Reflexion erzeugter Peak als auch ein lediglich diffus werdendes oder ausbleibendes Rückwandecho mit größeren, vorgelagerten Streuamplituden auffangen.

Für die zweite Ausbaustufe der Prüfvorrichtung wurde daher eine rechnergestützte Aufzeichnung von B-Bildern (s. KAP. 3.3) realisiert. Die Aufbereitung der B-Bilder erfolgt durch einen an das Prüfgerät angeschlossenen, separaten Standard-486-PC unter Einsatz der Anwendungs-Software US-SCAN 2.0

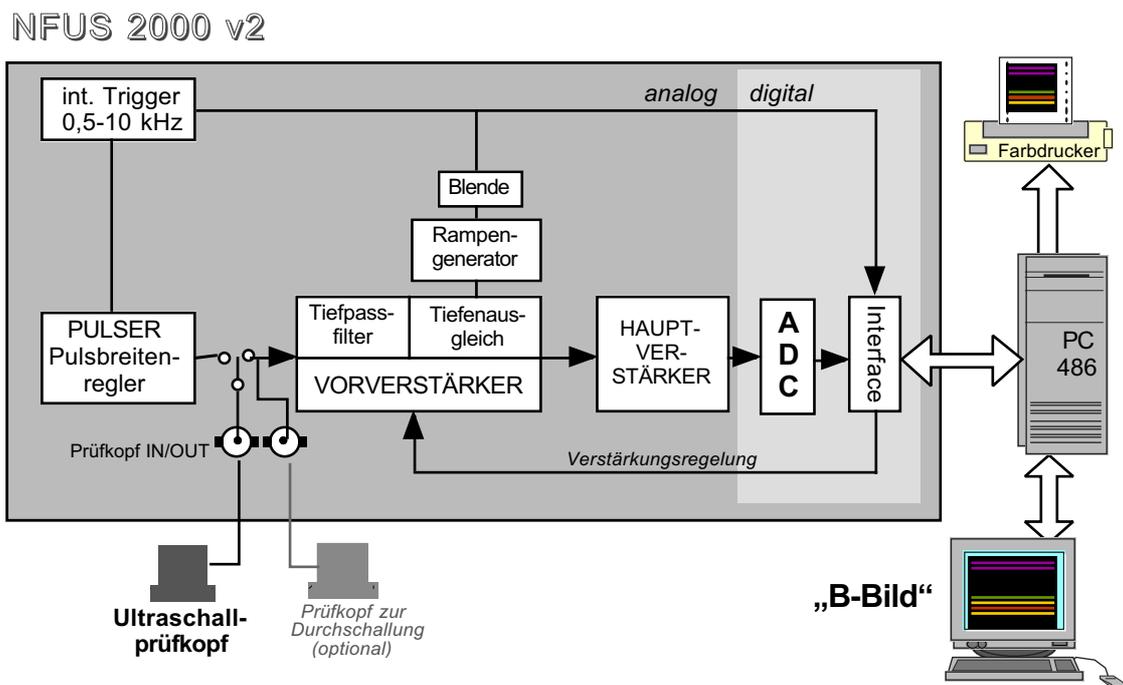


BILD 4.5: Schematischer Aufbau der Prüfeinrichtung mit B-Bild-Darstellung

(s. [BT1993]) in einer vom Hersteller angepassten Version aus dem Bereich der zerstörungsfreien Ultraschall-Prüfung an Metallen und Kunststoffen. Diese ermöglicht eine Online-Darstellung von B-Bildern in Falschfarben- oder Grauwertcodierung



BILD 4.6: Realansicht der Prüfeinrichtung mit NFUS2000v2 und angeschlossenen PC486

Die Prüfung kann zudem durch Abspeichern und Ausdrucken der erhaltenen B-Bilder mit einem dazu gehörigen Prüfprotokoll dokumentiert werden. BILD 4.5 zeigt den schematischen Aufbau der Prüfeinrichtung, BILD 4.6 eine Realansicht.

Die derart erweiterte und optimierte Prüfeinrichtung erlaubte nun weitergehende Laboruntersuchungen an komplexen Prüfkörpern, die in KAP. 5 dargestellt werden. Für baustellenpraktische Einsätze (KAP. 6) war es sinnvoll, das Prüfsystem in einer 3. Ausbaustufe unter Berücksichtigung der gewonnenen Erfahrung in ein einziges Gerät zu integrieren.

4.1.3 Integrierter Aufbau auch für den Praxiseinsatz

Aus den zuvor genannten Gründen wurde die gesamte bis dahin vorhandene Prüfeinrichtung vom Gerätehersteller zu einem einzigen Prüfgerät mit integriertem Pentium-PC und TFT-Flachbildschirm zusammengeführt (Geräteversion NFUS 2300). Dieses vereinfachte die Handhabung des



BILD 4.7: NFUS2300, Realansicht

Prüfsystems ganz entscheidend. Insbesondere wurden nunmehr sämtliche in den Vorversionen noch analog einzustellenden Parameter digital per Software angesteuert und die gesamte Gerätetechnik dem neuesten Stand der Technik angepasst:

- Pulsweite variabel einstellbar von 100ns -20µs in ±100ns - Schritten
- gesamter Dynamikbereich -60db bis +60db digital schaltbar
- steilflankiges Tiefpassfilter mit $f_{TP} = 50, 100, 250, 500$ kHz digital schaltbar
- Tiefenanhebung in digitaler Blende, Verlauf optional frei programmierbar
- erheblich schnellerer Bildaufbau durch schnellere ADC's und CPU

Mit diesen Verbesserungen war der Aufbau des Prüfsystems insbesondere zur Baustellentauglichkeit abgeschlossen. Zur Durchführung einer weitergehenden Untersuchung wurde die Prüfeinrichtung später um weitere Komponenten ergänzt; dieses wird in KAP. 4.3.2.2 erläutert.

NFUS 2300

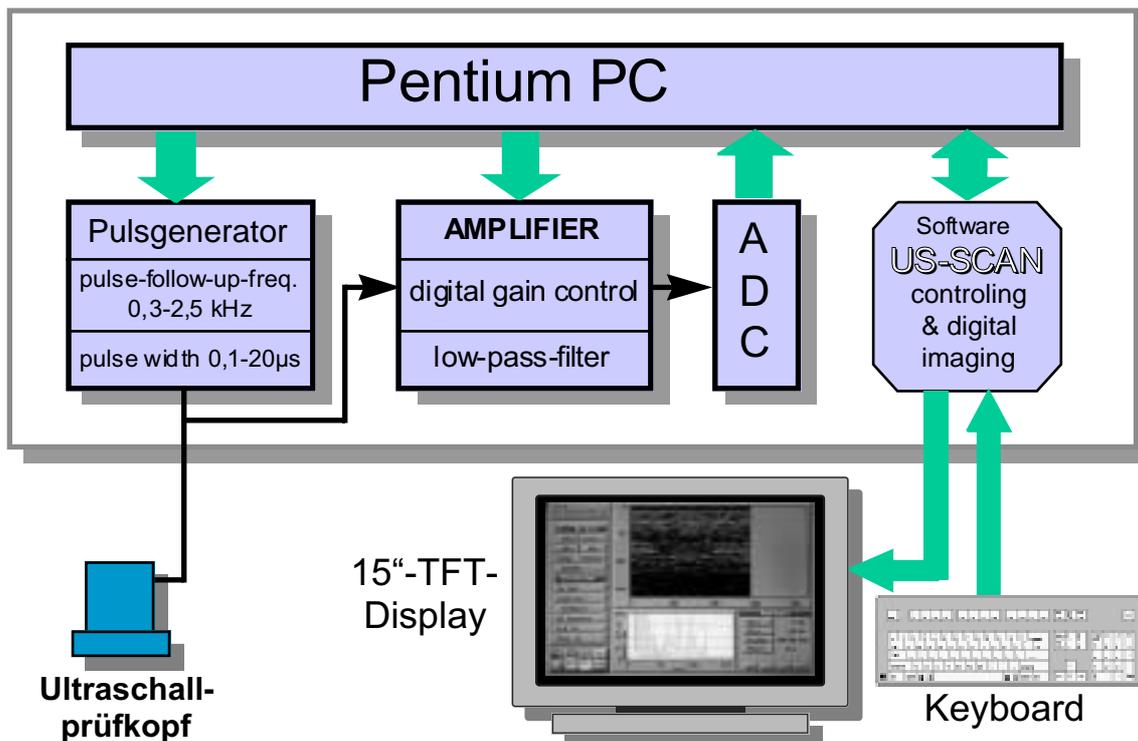


BILD 4.8: Schematischer Aufbau des aktuellen Prüfsystems NFUS2300

4.2 Klärung der Eigenschaften und Eignung handelsüblicher Prüfköpfe

Bereits in den vorstehenden Kapiteln wurde darauf hingewiesen, dass die Bereitstellung neuartiger Prüfköpfe speziell für die niederfrequente Prüfung von Beton entscheidend dazu beigetragen hat, insbesondere das Ultraschall-echo-Verfahren zur Praxisreife fortzuentwickeln. Daher war es erforderlich, die hierfür kommerziell verfügbaren Prüfköpfe über das aus den technischen Unterlagen bekannte hinaus genauer zu testen.

Alle hier verwendeten Prüfköpfe arbeiten im direkten Kontakt zum Prüfkörper, d.h. die verwendeten Koppelmittel (s. KAP. 4.3.1.1) dienen im Wesentlichen dazu, die aufgrund der Rauigkeit der Prüfkörperoberfläche immer vorhandenen, kleinen Luftspalte auszugleichen. Zur Prüfung stark schallschwächender Werkstoffe wie Beton ist es erforderlich, Prüfköpfe einzusetzen, die deutlich höhere Intensitäten als z.B. den für die Stahlprüfung erforderlichen in den Werkstoff einschallen können. Für Prüfungen nach dem Echoverfahren mit einem kombinierten SE-Prüfkopf muss zudem sichergestellt werden, dass das Ausschwingen des Prüfkopfes nach der Impulsanregung möglichst kurz ist, um den Empfang von Echosignalen zu ermöglichen. Zum sinnvollen Einsatz an Beton sollte die sog. „Totzeit“ T_{TOT} unter $30\mu s$ liegen. Neben den resultierenden Anforderungen an das Prüfgerät selbst, muss ein geeigneter Echo-Prüfkopf daher folgende, z.T. gegenläufige Anforderungen erfüllen:

- thermische und elektrische Standfestigkeit des Prüfkopfes für kurze Spannungspulse ($T_{AN} \ll 20\mu s$) bei hohen Spannungsamplituden (U_{AN} bis 300V)
- optimaler elektromechanischer Kopplungsfaktor (hoher Wirkungsgrad)
- hinreichende und für den Werkstoff Beton optimierte mechanische Bedämpfung ($T_{TOT} < 30\mu s$)
- hinreichende Bandbreite zur Aussendung kurzer Sende-Pulse

- hinreichende Übertragung (Empfangsempfindlichkeit) auch von Frequenzen unterhalb 250kHz

Zur Erzeugung und zum Empfang von Ultraschall stehen verschiedene physikalische Methoden und Materialien zur Verfügung (s. z. B. [BERGMANN1961]). Für die Betonprüfung können die genannten Anforderungen heute nur durch piezoelektrische, keramische Schwinger erfüllt werden (Zur Vertiefung der Physik des piezoelektrischen Effektes s. [KRAUTKRÄMER1986], [KUTTRUFF1988]). Neuartige piezoelektrische Werkstoffe wie z.B. Polyvinylidenfluorid (PVDF) auf Kunststoffbasis konnten bisher wg. des zu geringen (Schall-)Energieeintrages für diesen Prüfzweck nicht eingesetzt werden.

Als geeignet zum Einsatz an Beton erwiesen sich Prüfköpfe mit Schwingkeramiken auf Basis der Mischkeramik Bleizirkonattitanat (PZT) bei speziell angepasster Konstruktion ([LACH1996]). Den prinzipiellen Aufbau eines solchen Prüfkopfes zeigt BILD 4.9.

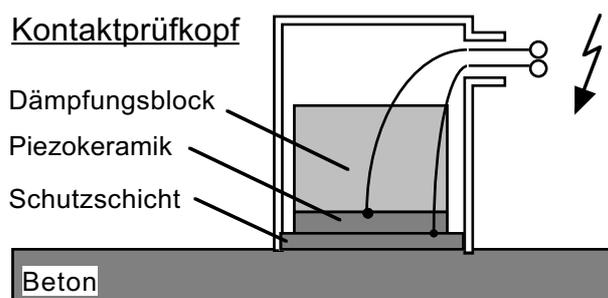


BILD 4.9: Prinzipskizze Kontaktprüfkopf (nach [LACH1996])

Schallphysikalisch befindet sich die Piezokeramik mit dem Schallwellenwiderstand Z_0 (s. KAP. 2.1) zwischen zwei bedämpfenden Medien, dem Dämpfungsblock mit dem Schallwellenwiderstand Z_1 und der Schutzschicht mit schallhart angekoppeltem Prüfkörper mit dem resultierenden Schallwellenwiderstand Z_2 . Eine exakte, physikalische Berechnung des Prüfkopfes ist sehr aufwendig und wird daher hier nicht vertieft (s. [KRAUTKRÄMER1986]). Da sich bereits verschiedene Betone schallphysikalisch deutlich unterscheiden, können Echo-Prüfköpfe für einen bestimmten Prüfzweck stets nur näherungsweise optimiert werden. In der Praxis werden daher verschiedene Prüfköpfe für unterschiedliche Prüfaufgaben eingesetzt (s.u.); weitere Optimierung können zudem dadurch erreicht werden, dass am Prüfgerät die Parameter U_{AN} , T_{AN} , el. Dämpfung, Signalfilterung und Verstärkung(-sverlauf) an den verwen-

deten Prüfkopf und die jeweiligen Bedingungen angepasst werden. Eine wesentliche Aufgabe der untenstehenden Beschreibung ist es deshalb, neben der Darstellung der wesentlichen physikalischen Parameter der verschiedenen Prüfköpfe auch eine empirische Einschätzung der bevorzugten Einsatzmöglichkeiten zu liefern. BILD



BILD 4.10: Moderner Niederfrequenzprüfkopf mit Stapeltechnik [LACH1996]

4.10 zeigt die Ansicht eines modernen Niederfrequenz-Prüfkopfes. Hier sind zur Erhöhung des Schallenergieeintrages in den Prüfkörper n Piezokeramik-Scheiben stapelweise mit wechselnder Polarisierung angeordnet. Hierdurch erzielt man für eine Anregungsspannung U_{AN} näherungsweise einen Schallimpuls, der einer Anregungsspannung von $n \cdot U_{AN}$ entspricht.

Folgende Prüfköpfe wurden untersucht:

- S 40 HB 0,3-1; [DEUTSCH1997-2], 3 Exemplare, interne / Seriennummern: «1»/#2080 (Bezeichnung IE40/0,3-1), «2»/#33095, «3»/#33094
- S 40 HB 0,2-0,6; [DEUTSCH1997-2], 1 Exemplar, interne / Seriennummer: «4»/#63093
- S 40 HB 0,1-3; [DEUTSCH1997-2], 1 Exemplar, interne/Seriennummer: «5»/#73111
- G0,2 R1; [KRAUTKRÄMER1997], 1 Exemplar, interne/Seriennummer: «6»/#58723

Die Prüfköpfe verfügen über effektive Schwingerdurchmesser von 39mm («1» bis «5») bzw. 56mm («6») und können daher kein praktisch nutzbares Nahfeld aufbauen (s. KAP. 2.1.4). Der Schall breitet sich demzufolge kugelförmig um den Sender aus. Dieses Schallausbreitungsverhalten ist aus technischen

und physikalischen Gründen unvermeidlich. Schwinger mit deutlich größeren Durchmessern sind z.Z. nicht produzierbar und darüberhinaus am Prüfkörper für manuelle Prüfungen nicht handhabbar; die Verwendung deutlich höherer Frequenzen oberhalb 250kHz scheidet aus den in KAP. 2 und 3 getroffenen Überlegungen aus.



BILD 4.11: Realansicht der Prüfköpfe «1», «3», «4» und «6» (oben, s.Text) sowie Pr.k. Dungeon S9204 (u.r.)

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Prüfkopfes ist, neben der optimalen Anpassung an den zu prüfenden Werkstoff, das vom Prüfkopf übertragene Frequenzspektrum. Dieses wird beschrieben durch die sogenannte Mitten- oder Nennfrequenz f_N , bei der die maximale Amplitude übertragen wird, sowie die 3dB-Bandbreite B_{-3dB} , die hier durch die obere Grenzfrequenz $f_{O,-3dB}$ und die untere Grenzfrequenz $f_{U,-3dB}$ angegeben wird. Die Grenzfrequenzen $f_{O,-3dB}$ und $f_{U,-3dB}$ sind dabei die Frequenzen, bei denen die Amplitude um jeweils 3dB gegenüber der Amplitude bei der Nennfrequenz f_N abgefallen ist (DIN 54119). Da sich das Frequenzspektrum eines Prüfkopfes durch die elektrische Bedämpfung R_p (i.d.R. am Prüfgerät, in Ohm) beeinflussen lässt, wird der verwendete Wert ebenfalls angegeben.

Zur Charakterisierung der Prüfköpfe «1» bis «5» wurden eigene Messungen verwendet; hierbei wurden ein als Sender arbeitender Prüfkopf direkt an den zu untersuchenden Prüfkopf angekoppelt. Zum Ausgleich des Frequenzganges des Sendeprüfkopfes (hier Pr.k. «2») wurde ein sinusförmiges Sendesignal mittels eines Frequenzgenerators jeweils für die verschiedenen Frequenzen auf eine konstante Amplitude von $4V_{pp}$ justiert und anschließend die Empfangsamplitude des untersuchten Prüfkopfes am Ultraschallprüfgerät

direkt in dB gemessen ($R_p = 50 \Omega$); die Werte sind daher auch vom Betrag vergleichbar. Ein Vergleich mit den vom Hersteller gelieferten Messdaten [DEUTSCH1997-2] zeigte gute Übereinstimmung (s.u.). Die Anwendung geringerer Leistung vermeidet zudem im Leistungsbetrieb ggf. auftretende Nichtlinearitäten. Das Spektrum des Prüfkopfes «6» wurde direkt den Herstellerangaben entnommen ($R_p = 500 \Omega$, [KRAUTKRÄMER1997]). Alle Prüfköpfe weisen, je nach Form und Länge des Anregungsimpulses sowie der zusätzlichen mechanischen Bedämpfung durch einen angekoppelten Prüfkörper, Totzeiten von 15 bis zu $50 \mu\text{s}$ auf. Zur qualitativen Darstellung des Ausschwingverhaltens wird

daher zusätzlich das freie Ausschwingen des nicht angekoppelten Prüfkopfes nach Erregung mit einem breitbandigen Spannungstoß ($U_{AN} = 250\text{V}$, $T_{AN} = 750\text{ns}$ elektrisch) dargestellt (s. BILD 4.12).

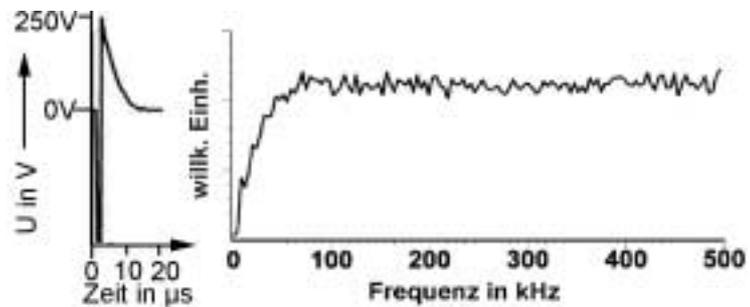


BILD 4.12: Anregungsimpuls und dessen Frequenzspektrum für BILD 4.15, 4.17, 4.19 und 4.21

Ein signifikanter Einfluss der verwendeten Prüfkabel konnte nicht festgestellt werden, sofern abgeschirmte BNC-Kabel (50Ω) mit max. 2m Länge eingesetzt wurden. Nachfolgend werden die Prüfköpfe näher charakterisiert.

- S40HB0,3-1; Prüfköpfe «1», «2», «3»

BILD 4.13 zeigt das mit $R_p = 50 \Omega$ ermittelte Frequenzspektrum des Prüfkopfes «1» mit einer Nennfrequenz von 650 kHz und einer 3dB-Bandbreite $B_{-3\text{dB}}$ von 410 bis 950kHz (Herstellerdaten zum Vergleich in BILD 4.14). Obwohl diese Werte theoretisch außerhalb des für die Betonprüfung optimalen Bereiches von $150 \pm 100\text{kHz}$ liegen, erweist sich der Prüfkopf auch in diesem Bereich als hinreichend empfindlich, um Prüfungen nach dem Echo-Prinzip durchzu-

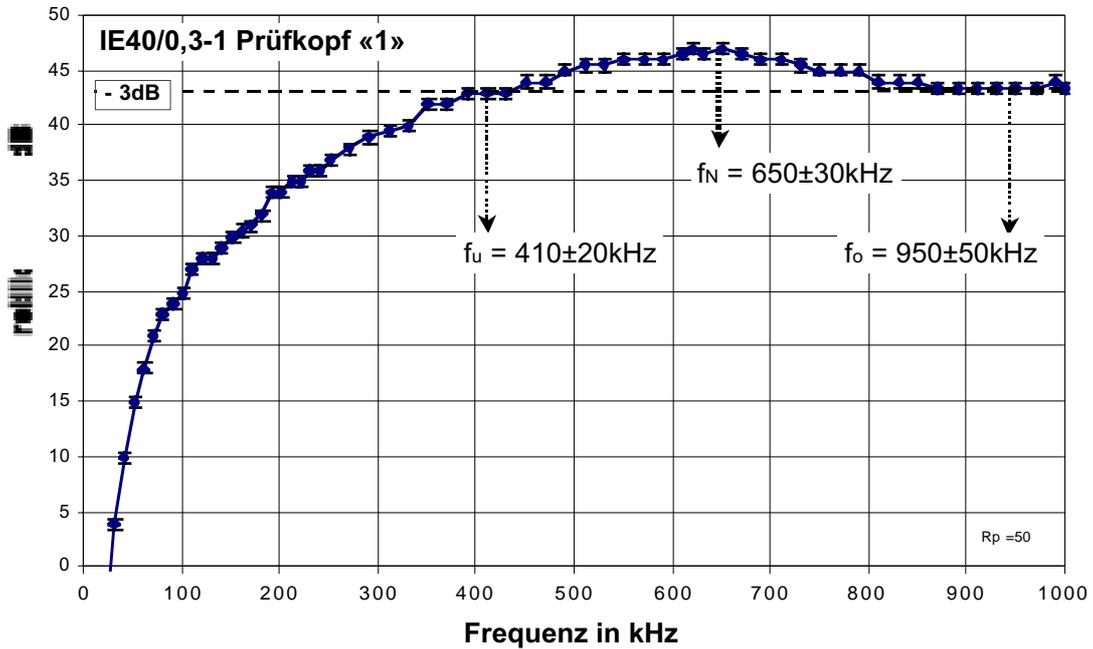


BILD 4.13: Frequenzspektrum des Prüfkopfes «1» IE40/0,3-1

führen. Der Vergleich mit dem untenstehend erläuterten Prüfkopf «4» zeigt, dass im Frequenzbereich von 100 bis 200kHz sogar eine geringfügig bessere Übertragung als beim Prüfkopf «4» erreicht wird, was auch der praktischen Erfahrung mit Prüfkopf «1» entspricht. Durch die vergleichsweise lineare Übertragung von Frequenzen bis 1MHz weist dieser Prüfkopf zudem die kürzeste Ausschwingdauer besonders bei sehr kurzen Anregungsimpulsen auf. Bei minimaler Anregung mit $T_{AN} = 100\text{ns}$ (el.) lassen sich Ausschwingzeiten und somit Totzeiten von nur $15\mu\text{s}$ realisieren. In diesen Fällen ist allerdings die in den Prüfkörper ein-

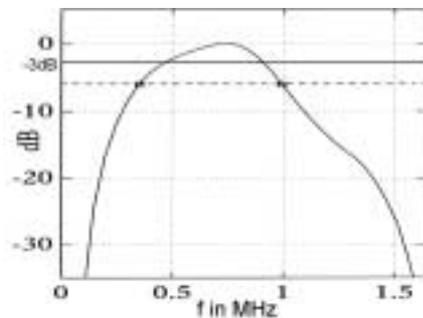


BILD 4.14: wie BILD 4.13, n. Herstellerangabe [DEUTSCH1997-2]

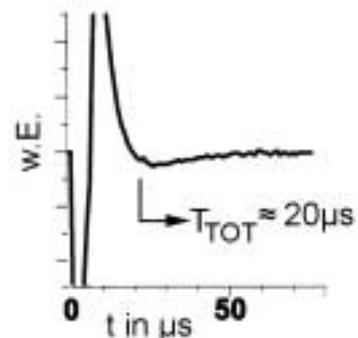


BILD 4.15: Ausschwingverhalten des Pr.kopf «1» (s.Text)

geschallte Energie so gering, dass sich nur oberflächennahe Echos (bis max. $d = 10\text{cm}$) orten lassen. In den meisten Fällen erwies sich $T_{AN} = 3\mu\text{s}$ (el.) als geeignet. BILD 4.15 zeigt das Ausschwingverhalten für den in BILD 4.12 dargestellten Anregungsimpuls mit $T_{AN} = 750\text{ns}$.

Vom Prüfkopftyp S40HB0,3-1 stehen hier 3 Exemplare («1» aus 1992, «2» und «3» aus 1997) zur Verfügung, die sich in den messtechnisch erfassbaren Parametern praktisch nicht unterscheiden. Dennoch machen sich im Prüfbetrieb marginale Unterschiede bemerkbar, die offensichtlich produktionsbedingt sind. Die Prüfköpfe «1» und «3» sind insgesamt in ihrer Dämpfung besser an den Werkstoff Beton angepasst; Prüfkopf «2» kann aufgrund seiner geringeren Bedämpfung für Prüfaufgaben im Oberflächenbereich oder im SE-Betrieb als Sender eingesetzt werden. Aufgrund ihrer höherfrequenten Charakteristik sind die Prüfköpfe «1» und «3» am besten für Prüfaufgaben an Betonen bis zur Zuschlaggröße von max. 16mm geeignet.

- S40HB0,2-0,6; Prüfkopf «4»

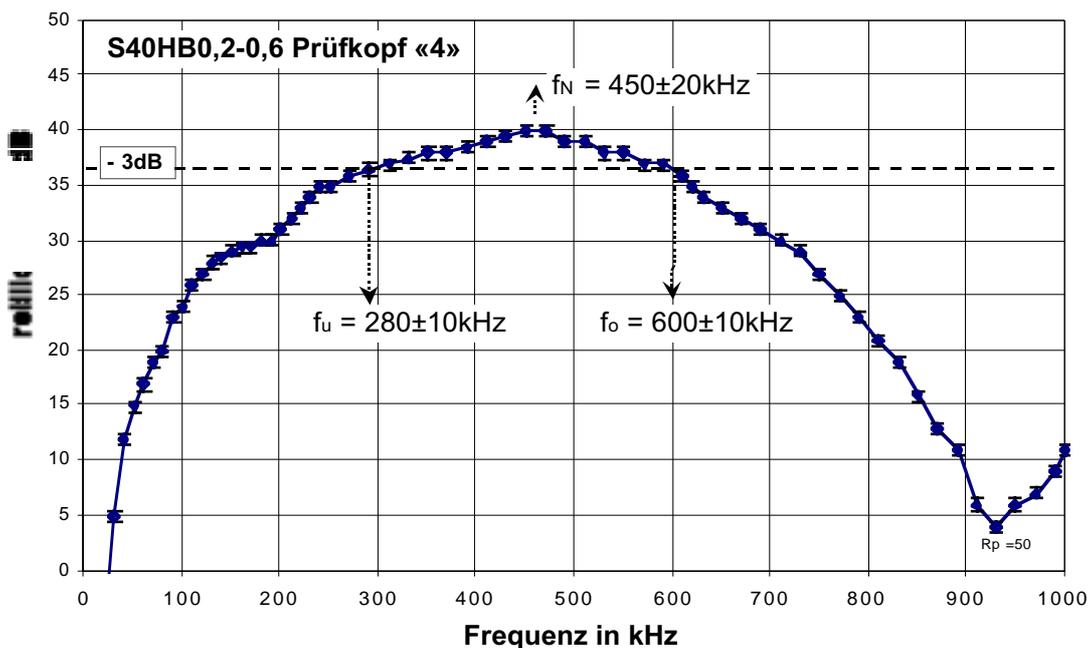


BILD 4.16: Frequenzspektrum des Prüfkopfes «4» S40HB0,2-0,6

BILD 4.16 zeigt das am Prüfkopf «4» S40HB0,2-0,6 [DEUTSCH1997-2] gewonnene Frequenzspektrum mit einer Nennfrequenz von 450 kHz und einer 3dB-Bandbreite B_{-3dB} von 280 bis 600kHz . Das Spektrum erweist sich innerhalb der Fehlergrenzen im Bereich bis 150kHz als praktisch identisch zum Prüfkopf «1». Im Bereich oberhalb 150kHz ist der Prüfkopf insgesamt weniger empfindlich als Typ «1». Da Frequenzen oberhalb von 250kHz bzw. oberhalb von 150kHz je nach Justage durch das Prüfgerät ohnehin ausgefiltert werden, ist eine Unterscheidung der Prüfköpfe IE40/0,3-1 («1» bis «3») und S40HB0,2-0,6 «4» allein vom Frequenzgang in der Praxis nicht sinnvoll. Allerdings erwies sich der Prüfkopf «4» als insgesamt stärker bedämpft, wodurch die Empfangsempfindlichkeit auch für niederfrequente Echosignale geringer ist als bei den Typen «1» bis «3». Die niederfrequente Charakteristik führt darüber hinaus dazu, dass etwas längere Totzeiten auftreten (s. BILD 4.17). Empirisch wird daher der Prüfkopf «4» als weniger geeignet zur Echoprüfung von Beton eingeschätzt.

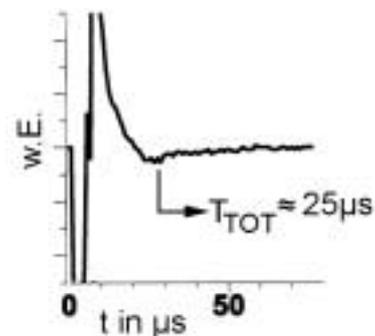


BILD 4.17: Ausschwingverhalten des Pr.kopf «4» (s.Text)

- S40HB0,1-0,3; Prüfkopf «5»

BILD 4.18 zeigt das am Prüfkopf «4» S40HB0,1-0,3 [DEUTSCH1997-2] gewonnene Frequenzspektrum mit einer Nennfrequenz von 240 kHz und einer 3dB-Bandbreite B_{-3dB} von 150 bis 320kHz . Auffällig ist die um ca. 5dB höhere Empfindlichkeit in dem für die Betonprüfung wesentlichen Bereich bis 200kHz gegenüber den Prüfköpfen «1» bis «4». Da die Frequenzcharakteristik insgesamt fast als ideal bezeichnet werden kann, ist nur wenig Nachfilterung des Signals im Prüfgerät erforderlich, da die maximale Empfindlichkeit des Prüfkopfes z.B. für den Tiefpassfilter bei 250kHz noch im Durchlassbereich liegt. Mit dem Prüfkopf «5» konnten daher die besten Prüfergebnisse auch für Betone mit einem Zuschlaggrößtkorn von 32mm und für Echos aus größeren

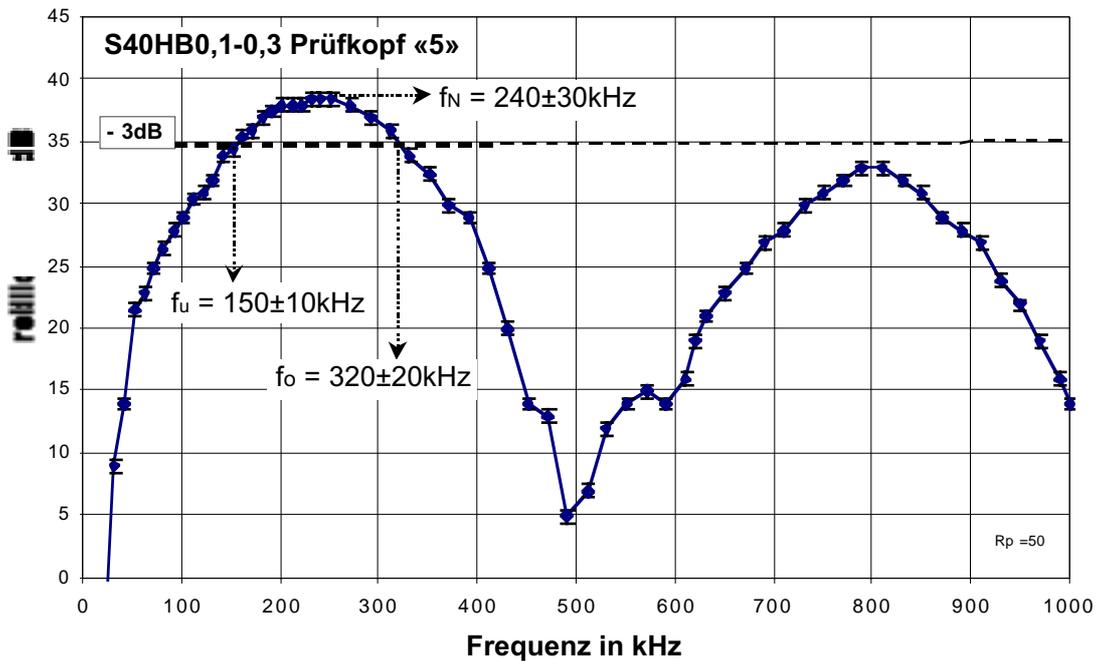


BILD 4.18: Frequenzspektrum des Prüfkopfes «5» S40HB0,1-0,3

Tiefen erzielt werden. Die Frequenzcharakteristik führt zwangsläufig zu längeren Totzeiten (s. BILD 4.19), d.h. der Prüfkopf kann für sehr oberflächennahe Prüfaufgaben nicht eingesetzt werden. Dieser Nachteil kann allerdings leicht durch den Einsatz der dann geeigneteren Prüfköpfe «1» oder «3» ausgeglichen werden.

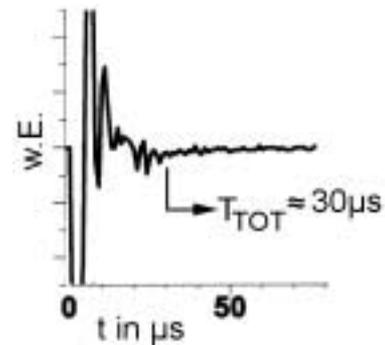


BILD 4.19: Ausschwingverhalten des Pr.kopf «5» (s.Text)

- G0,2R1; Prüfkopf «6»

BILD 4.20 zeigt für den Prüfkopf «6» G0,2R1 das dem Messprotokoll des Herstellers [KRAUTKRÄMER1997] entnommene Frequenzspektrum mit einer Nennfrequenz von 150 kHz und einer 3dB-Bandbreite $B_{-3\text{dB}}$ von 100 bis 260 kHz (Absolutwerte in dB nicht kompatibel zu «1» bis «5»). Das Frequenzspektrum liegt somit ideal im Einsatzbereich für die Betonprüfung. Prüfkopf «6»

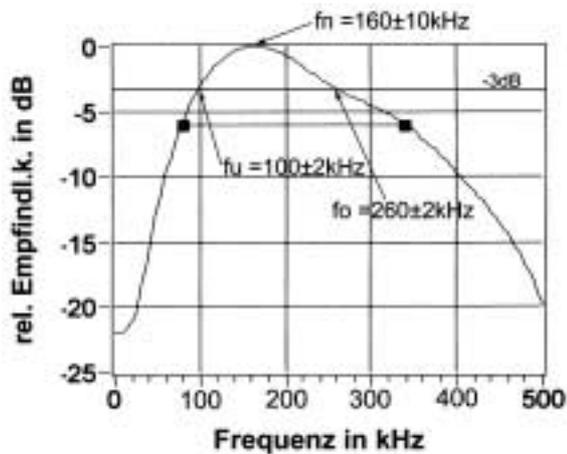


BILD 4.20: Frequenzspektrum des Prüfkopfes «6» G0,2R1; Graph nach Herstellerprotokoll [KRAUTKRÄMER1997]

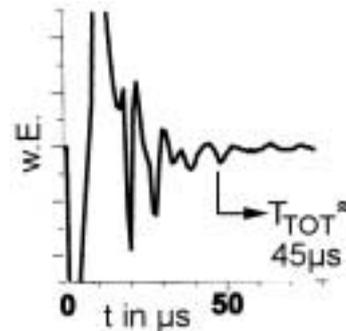


BILD 4.21: Ausschwingverhalten des Pr.kopf «6» (s.Text)

kann daher für ähnliche Prüfaufgaben wie Prüfkopf «5» eingesetzt werden, insbesondere für Betone mit grobem Zuschlag und Defekt-/ Rückwandortungen aus größeren Tiefen. Für die auch hier lange Totzeit (s. BILD 4.21) gilt die Anmerkung des vorangehenden Absatzes. Prüfkopf «6» weist einen effektiven Schwingerdurchmesser von 56mm und ist in einem senderseitig planen Gehäuse mit einem Durchmesser von ca. 62mm montiert (Prüfköpfe «1» bis «5»: 40mm). Die größere Fläche des Schwingers erlaubt insgesamt einen höheren Schallenergieeintrag in den Beton. Allerdings kann es in einigen Fällen durch die vergrößerte Auflagefläche auf dem Prüfkörper bei der Verwendung von Koppelmitteln geringerer Viskosität (insb. Glycerin) zu so hohen Adhäsionkräften kommen, dass ein manuelles Verschieben des Prüfkopfes zur Erzeugung eines B-Bildes sehr erschwert wird. Zum Einsatz an Betonflächen ließen sich herstellerseitig z.B. durch das Abrunden der Einfassung des Schwingers Verbesserungen erzielen.

Zusammenfassend ist zu betonen, dass die Entwicklung und Bereitstellung der hier vorgestellten, neuartigen Prüfköpfe wesentlich zur Realisierung und Anwendbarkeit der Ultraschallecho-Verfahrens insbesondere für den Werkstoff Beton beitragen. Da die Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, wird hier ein deutliches Potenzial zur weiteren Leistungssteigerung des Verfahrens gesehen.

4.3 Klärung der Eignung einer Elektro-Viskosen Flüssigkeit als neuartigem Koppelmittel

Von großem Einfluss auf die Anwendbarkeit und Aussagekraft insbesondere der hier diskutierten, relativen Prüfmethode (B-Bild-Darstellung) ist die Ankopplung der Prüfköpfe an die Baustoff-/Bauteiloberflächen (s. KAP. 2.2, 3.3 und 4.2). Wesentliche Aufgabe des hierfür eingesetzten Koppelmittels ist die Überbrückung der auf rauhen Werkstoffen zwangsläufig entstehenden Luftspalte zwischen Prüfkopf und Bauteiloberfläche, da dort sonst praktisch keine Schallenergie übertragen wird (s.a. KAP. 2.2.2; $R > 99,9\%$).

Im Rahmen dieser Arbeit sollte daher auch der Einfluss des Koppelmittels bei der Prüfung näher untersucht werden. Zentral war dabei insbesondere die Beantwortung der Frage, ob und inwieweit die Verwendung eines in seiner Viskosität regelbaren Koppelmittels zu Verbesserungen bei den in Labor und Praxis anstehenden Ultraschall-Prüfaufgaben führen kann. Zum Einen sollten Untersuchungen für eine sichere Reproduzierbarkeit der Ankopplung durchgeführt werden; zum Anderen sollte erprobt werden, ob dabei eine gleichzeitige Auswertung longitudinaler und transversaler Impulse möglich ist, um so ein mehrparametrisches Prüfverfahren auch für die Ultraschallecho -Technik zur Verfügung zu stellen. Als neuartige Möglichkeit wurde ein elektrisch in der Viskosität regelbares Koppelmittel, eine sog. "Elektro-Viskose Flüssigkeit" (im Folgenden kurz "EVF"), erachtet. Hierbei handelt es sich um eine Flüssigkeit, die durch Anlegen eines äußeren, elektrischen Feldes in ihrer Viskosität zwischen den Zuständen „flüssig“ und „fest“ definiert gesteuert werden kann. Bisher sind derartige Flüssigkeiten, die beispielsweise für Visko-Kupplungen im Maschinenbau entwickelt und eingesetzt werden, noch nicht auf eine ggf. vorteilhafte Anwendung bei der Ultraschall-Ankopplung untersucht worden.

Zunächst war es erforderlich, technische Informationen über das Stoffverhalten von Koppelmitteln allgemein und insbesondere der EVF zusammenzustellen und daraus Folgerungen für das Vorgehen und die genauen Zielsetzungen der Untersuchungen abzuleiten (KAP. 4.3.1). Dementsprechend

musste die bestehende Prüfeinrichtung (vgl. KAP. 4.1.3) zur detaillierten Untersuchung der EVF als Koppelmedium um die erforderlichen apparativen Komponenten wesentlich ergänzt werden (KAP. 4.3.2.2). Die Ergebnisse der Untersuchung werden in KAP. 4.3.2.4 dargestellt.

4.3.1 Voruntersuchungen

4.3.1.1 Herkömmliche Koppelmittel

Die bei der Ultraschallprüfung von Beton bisher verwendeten Koppelmittel lassen sich grundsätzlich in zwei Klassen einteilen:

- flüssige und pastöse Koppelmittel
- feste bzw. erstarrende Koppelmittel
- *Wasser und Wassergele*
- *(Schnell-) Zemente*
- *Vaseline, Öle und ölige Pasten*
- *Gips*
- *Glyzerin*
- *Spezialkleber*
- *wässrige Zuckerlösungen*
- *übersättigte wässr. Zuckerlösungen*

Materialabhängig unterscheiden sich die genannten Koppelmittel wesentlich in den Schallübertragungseigenschaften und Viskositätswerten. Je nach Prüfzweck, Oberflächengegebenheiten und Prüfsituation wird das jeweils bestgeeignete Koppelmittel gewählt. Hierbei erweisen sich flüssige Koppelmittel als flexibler und einfacher handhabbar und lassen in schneller Folge mehrere Messungen von benachbarten Messpunkten zu (B-Bild). Das manuelle Verschieben des Prüfkopfes führt jedoch zu i.d.R. zu nicht konstanten Ankopplungsbedingungen, was die Aussagefähigkeit z.B. von B-Bildern reduzieren kann. Gleichmäßige Ankopplungsbedingungen sind jedoch insbesondere für die Defektoskopie von Vorteil. Allerdings können flüssige Koppelmittel physikalisch allein longitudinale Wellenmoden (s. KAP. 2.2) übertragen; dieses gilt in der Praxis ebenso für höherviskose, pastöse Koppelmittel.

Sofern für erweiterte Prüfverfahren (z.B. [NEISECKE1974]) zusätzlich transversale Wellenanteile im Schallsignal zur Auswertung kommen sollen, die nur

Koppelmittel bei T=20°C, NK	Ultraschallgeschw.		Dichte in kg/dm ³	Schallw.widerst. Z = v _L * in 10 ⁹ *kg/(m ² *s)	Literatur
	long. v _L in m/s	trans. v _T in m/s			
Wasser	1483	-	1	1,5	[MATTHIES 1998]
Vaseline	1420	-	0,84	1,2	[MATTHIES 1998]
Glycerin	1920	-	1,26	2,4	[MATTHIES 1998]
(Schnell-) Zemente	3000	o.A.	2	6,0	
Gips (Halbhydrat)	2000	o.A.	1,1	2,2	
Spezialkleber z.B. EP	2500	1100	1,2	3,0	[KRAUTKRÄMER 1986]
zum Vergleich: Beton	4000	2200	2,3	9,2	[KRAUTKRÄMER 1986]

TAB. 4.1: Schallphysikalische Daten herkömmlicher Koppelmittel (Anhaltswerte)

von festen Koppelmitteln übertragen werden, müssen erstarrende oder aushärtende Stoffe zur Anwendung gelangen, wodurch allerdings entweder punktuelle Messungen mit hohem Zeitaufwand oder Prüfungen z.B. mittels technisch aufwendiger Prüfkopfarrays [KROGGEL 1995] durchgeführt werden müssen.

Grundsätzlich kann der Schallübertrag durch ein Koppelmittel dadurch optimiert werden, dass sich a) die Schallwellenwiderstände von Koppelmittel und Prüfkörper (hier: Beton) möglichst ähnliche Werte aufweisen und b) eine möglichst feste mechanische Verbindung zum Prüfkörper (durch Adhäsion oder Druck) aufgebaut werden kann sowie c) keine oder nur wenig Luftbläschen bzw. -poren vorhanden sind. Unter Berücksichtigung der aus TAB. 4.1 ersichtlichen Schallparameter folgen daher einige Kurzanmerkungen zu den bisher mit gängigen Koppelmittel gemachten Erfahrungen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Verwendung in der Ultraschallecho-Technik an Betonbauteilen.

- Wasser und Wassergele

Das bei der Prüfung von anderen Werkstoffen praktizierte Verfahren mit definierter Wasservorlaufstrecke, welches eine gleichbleibende Ankopplung ermöglicht, scheidet nach den bisherigen Erfahrungen aufgrund des völlig unzureichenden Schallenergieeintrages zur Prüfung von Beton aus. Bei der An-

kopplung im direkten Kontakt zwischen Prüfkopf und Beton erweisen sich rein wässrige Koppelmittel ebenfalls als weitestgehend ungeeignet, da das kapillare Saugen des Betons in kurzer Zeit zum Ankopplungsverlust führt.

- Vaseline

Vaseline ist zur Durchführung von Durchschallungen das geeignete Koppelmittel. Allerdings sind die so ermittelten Intensitäten stark abhängig vom Anpressdruck (s. [JONAS1996]). Aus diesem Grund kann Vaseline bei Ultraschallecho-Prüfungen zwar für einfache Prüfaufgaben, z.B. der Ortung eines nicht zu tiefen Rückwandechos (bis max. $d = 30\text{cm}$), eingesetzt werden, scheidet aber für Prüfaufgaben mit möglichst konstanter Ankopplung, z.B. der Defektoskopie, aus. Darüberhinaus ist der Schallenergieübertrag für die Echo-Ortung oft zu gering.

- Glyzerin

Glyzerin ist für Ultraschallecho-Prüfungen nach den bisher gemachten Erfahrungen in vielen Fällen das beste Koppelmittel. Die Viskosität von Glyzerin ist stark abhängig von der Temperatur und dem immer vorhandenen Wassergehalt (hygroskopisch). Um unter Laborbedingungen eine optimale Viskosität zu erreichen, ist auf die Verwendung von „wasserfreiem“ Glyzerin ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ >99%) und dessen Lagerung in luftfeuchtedichten, kleinen Gebinden zu achten. Bei sehr rauhen Oberflächen erweist sich die Viskosität von Glyzerin allerdings als zu gering; dann sollte auf andere Koppelmittel zurückgegriffen werden. Für kontinuierliche Messungen eignen sich in solchen Fällen honigartige Zuckerlösungen (s.u.).

- (Schnell-) Zemente

Zemente können als Koppelmittel für punktuelle Messungen eingesetzt werden, sofern zwei Vorbereitungen getroffen werden. Zum einen muss der Untergrund vor der Auftragung des Zements gut vorgewässert werden, da sonst eine frühzeitige Austrocknung und somit keine vollständige Erhärtung des Koppelzementes erfolgt. Weiterhin muss die Prüfkopfoberfläche vollständig fettfrei sein, da es sonst durch das geringe Schwinden der Koppelschicht

zum Abplatzen kommen kann. Das Aufbringen einer großflächigen Ausgleichschicht aus Schnellzement auf eine sehr raue Oberfläche, um dann mit Ankopplung über Glyzerin zu prüfen, war in einem Fall (s. KAP. 5.2.1.2) erfolgreich.

- Gips

Gips quillt bei der Erhärtung, wodurch es fast immer zur Abplatzung des Prüfkopfes kommt (s.a. [NEISECKE1974]). Gips ist daher in den meisten Fällen ungeeignet.

- Spezialkleber, z.B. EP

2-Komponenten-Kleber wie Epoxidharze sind für punktuelle Prüfungen vom Prinzip her gut geeignet, bergen allerdings aufgrund der hohen Adhäsion die deutliche Gefahr, den (sehr teuren) Prüfkopf beim Abtrennen oder Reinigen nach der Messung zu beschädigen. Durch diesen hohen Aufwand kann EP nur in Einzelfällen empfohlen werden.

- wässrige Zuckerlösungen

Honigartige, nicht kristallisierte Zuckerlösungen sind als Koppelmittel für Oberflächen mittlerer Rauigkeit, z.B. sorgfältig manuell abgezogene Betonoberflächen, insbesondere dann geeignet, wenn Glyzerin keine ausreichende Kopplung mehr sicherstellen kann. Darüberhinaus kann die Viskosität durch Erhitzen unterschiedlich konzentrierter Zuckerlösungen praktisch frei eingestellt werden, was allerdings den deutlichen Nachteil hat, dass sich die Viskosität nach dem Aufbringen auf die Betonoberfläche durch Abkühlen und kapillares Saugen des Betons undefiniert ändern kann.

Eine erhitzte und übersättigte wässrige Zuckerlösung kann bei der Abkühlung als Modell für ein erstarrendes Koppelmittel betrachtet werden. Daher wurde an diesem Modell eine Voruntersuchung durchgeführt.

4.3.1.2 Erstarrendes Koppelmittel

Mit der Änderung der Viskosität eines Koppelmittels von „flüssig“ nach „fest“ ändert sich das physikalische Schallübertragungsverhalten. Während ein erstarrtes Koppelmittel als Festkörper alle Schwingungsmoden, d.h. longitudinale, transversale und weitere Wellenanteile (s. KAP. 2.2) überträgt, werden im flüssigen Zustand praktisch ausschließlich longitudinale Wellenanteile weitergegeben.

Sofern sich die Schallgeschwindigkeiten sowohl der longitudinalen als auch der transversalen Wellenmoden getrennt bestimmen lassen, ergeben sich interessante, neue Möglichkeiten zur Ermittlung von Materialkonstanten. Insbesondere kann der dynamische E-Modul E_{DYN} zerstörungsfrei und sehr genau bestimmt werden. Auf die Details dieser Methodik und die physikalischen Grundlagen wird im Abschnitt 4.3.1.3 detailliert eingegangen.

Durch eine Voruntersuchung sollte festgestellt werden, ob ein erstarrendes Koppelmittel überhaupt zu signifikanten Signalveränderungen führen würde, um so ggf. eine transversale Welle identifizieren zu können. Als erhärtendes Koppelmittel wurde zunächst Gips eingesetzt, was sich jedoch als ungeeignet erwies, da das beim Erstarrungsprozeß auftretende Quellen dazu führte, dass sich die keramische Prüfkopffläche von der Gipsschicht ablöste und damit die Ankopplung versagte (s.o). Daher wurde als Koppelmittel eine übersättigte, heiße Zuckerlösung gewählt, die durch Kristallisation aushärtet. Die Zuckerlösung war zuvor mit ca. 5 - 10 Vol.% Wasser unter Wärmezufuhr verflüssigt worden.

Um ein gleichmäßiges Auskristallisieren zu gewährleisten, wurden an der Unterseite des Ultraschall-Prüfkopfes unterschiedlich dicke Distanzringe angebracht, welche zu Koppelschichtdicken von 3, 5 bzw. 7mm führten. Probe-weise wurden zunächst nicht kristallisierende Zuckerlösungen als Koppelmittel eingesetzt, um zu überprüfen, ob bei den gewählten Vorlaufstrecken aussagefähige Messergebnisse zu erreichen waren. Dieses war insbesondere bei den kleineren Vorlaufstrecken 3 und 5mm der Fall.

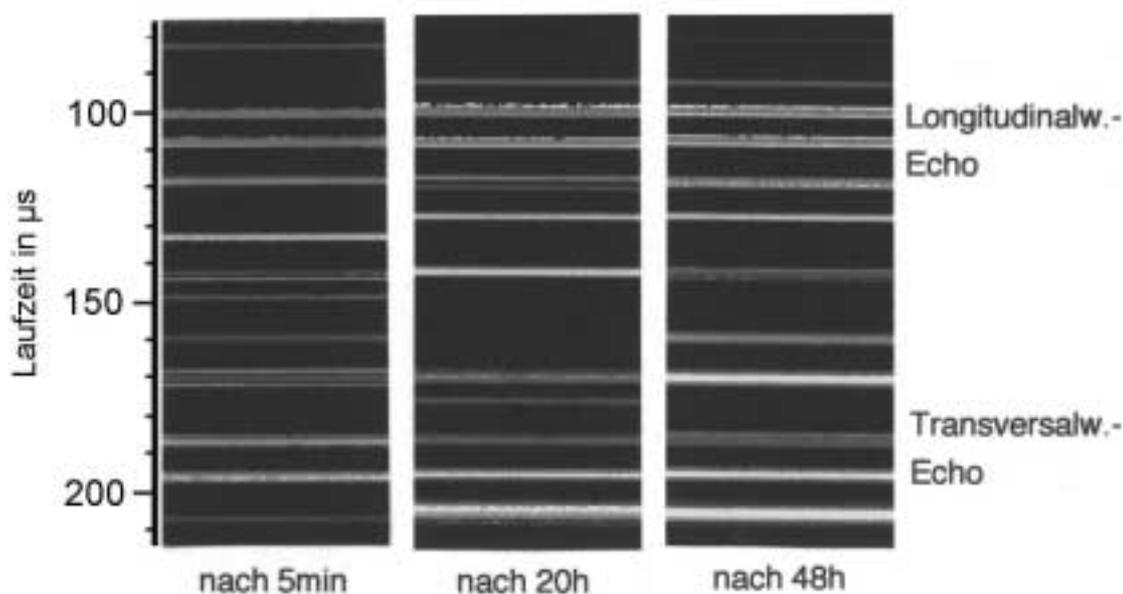


BILD 4.22: Stationäre B-Bilder bei erstarrendem Koppelmittel

Die nachfolgende Messung wurde an einem 20cm dicken, fehlerfreien Beton-Probekörper (B35, A/B8) bei einer Koppelschichtdicke von 3mm durchgeführt. Die (stationären) B-Bilder in BILD 4.22 zeigen das Echobild direkt nach dem Ankoppeln (Koppelmittel flüssig) sowie nach 20 und 48 Stunden (Koppelmittel erstarrt). Im oberen Teil der Scans erkennt man das Rückwandecho der longitudinalen Schallwellen (rote Linien). Dieses bleibt, sieht man von einer leichten Intensitätszunahme ab, während der Erstarrung konstant. Deutlich bildet sich erst mit dem Aushärten des Koppelmittels das Echo der transversalen Schallwellen aus (gelbe Linien im unteren Bereich). Erwartungsgemäß breiten sich die Transversalwellen mit etwa der halben Geschwindigkeit der Longitudinalwellen aus. Für reproduzierbare Messungen war das gewählte Koppelmittel allerdings nicht geeignet, da die jeweils stattfindende Kristallisation des Zuckers i.d.R. ungleichmäßig erfolgt [NEISECKE1974]. Es erschien jedoch erfolgversprechend, differenziertere Aussagen über das Ultraschall-Echosignal mit einer für diesen Prüfzweck erweiterten Messeinrichtung durch die Verwendung eines in seiner Viskosität frei veränderlichen Koppelmittels wie EVF zu gewinnen. Aus diesen Voruntersuchungen konnten nun die genauen Ziele dieser Untersuchung definiert werden.

4.3.1.3 Folgerungen und Zielsetzung

In der Verwendung von EVF als Koppelmittel wurden vorab drei wesentliche Vorteile gesehen, die sich aus der regelbaren Viskosität ergeben können:

- 1.) Reduzierung der Totzeit beim Echo-Verfahren
- 2.) Reproduzierbare Ankopplung, auch bei kontinuierlichen Messungen
- 3.) Ermittlung von Materialeigenschaften durch getrennte Auswertung longitudinaler bzw. transversalen Signalmoden

Diese Annahmen sind wie folgt begründet.

Zu 1.): Bereits in KAP. 4.2 wurden die erst in den 1990´er Jahren entwickelten Prüfköpfe näher charakterisiert, die in ihrer Konstruktion erstmals deutlich besser an die Bedingungen der Ultraschallecho-Prüfung an Beton angepasst wurden. Die wesentlichen Anforderungen an solche Prüfköpfe werden hier nochmals zusammengefasst:

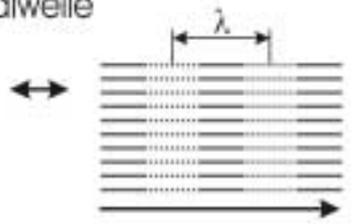
- I. niederfrequente Übertragungscharakteristik
- II. hoher Schallenergieeintrag in den Beton
- III. möglichst geringe Totzeiten, optimal $T_{TOT} < 30 \text{ s}$

Physikalisch bedingt steigt jedoch die Totzeit eines Prüfkopfes sowohl mit abnehmender Mittenfrequenz ($f_N \searrow$) als auch mit zunehmender Energie des Anregungsimpulses ($U_{AN} \nearrow, T_{AN} \nearrow$). Es sollte daher untersucht werden, ob sich ein Prüfkopf nach seiner freien Anregung (d.h. unter Beibehaltung seiner unter I. und II. genannten, optimierten Eigenschaften) durch die Verwendung einer EVF mittels Umschalten derselben in den festen Zustand soweit zusätzlich bedämpfen (d.h. mechanisch abbremsen) lässt, dass sich signifikant kürzere Ausschwingzeiten, d.h. Totzeiten ergeben. Dieses wäre besonders bei der Ortung oberflächennaher Strukturen (Fehlstellen, Konstruktionselemente) von Vorteil.

Zu 2.): Insbesondere bei vergleichenden und kontinuierlichen Messungen ist ein gleichbleibender Schallübertrag vom Prüfkopf in den Prüfgegenstand (und zurück) erforderlich. Bei herkömmlichen Koppelmitteln lässt es sich durch die Oberflächenrauigkeit von Beton i.d.R. nicht vermeiden, dass allein durch die Variation der Koppelmittelschichtdicke schwankende Intensitäten bei ansonsten gleichen Bedingungen detektiert werden. Andererseits ist bei der Betonprüfung eine möglichst gute, d.h. kraft- und damit schallübertragende Ankopplung zwingend erforderlich, um die nötige Signalenergie zu übertragen. Es sollte untersucht werden, ob mittels EVF bei möglichst geringer Koppelmittelschichtdicke eine punktuelle, kurzfristig feste Ankopplung des Prüfkopfes durch kurzes Umschalten in den festen Zustand erreichbar ist. Bei ausreichendem Schallübertrag sollte diese dann weitestgehend reproduzierbar sein und so durch die Beobachtung des gegenüber Materialveränderungen sehr empfindlichen Parameters Intensität genauere Prüfaussagen ermöglichen.

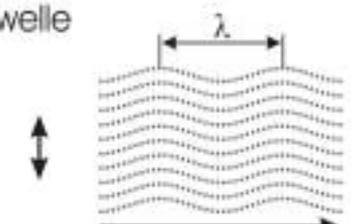
Zu 3.): In KAP. 4.3.1.1 wurde bereits auf die unterschiedliche physikalische Schallübertragung in flüssigen bzw. festen Koppelmitteln hingewiesen. Es ergab sich daher die weitere Aufgabe, zu untersuchen, ob durch das Umschalten der EVF zwischen den Zuständen „flüssig“ und „fest“ die Schallgeschwindigkeiten longitudinaler bzw. transversaler Wellenanteile getrennt ermittelt

Longitudinalwelle



$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \{4.1\}$$

Transversalwelle



$$v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad \{4.2\}$$

E: Elastizitätsmodul
 μ : Querdehnzahl
 ρ : Dichte

BILD 4.23: Elastische Wellen in Festkörpern (aus [DGZFP1999])

werden können. Sofern es gelingt, in einer Prüfanordnung die Schallgeschwindigkeit für longitudinale und transversale Moden, v_L und v_T , getrennt zu bestimmen, kann der dynamische E-Modul E_{DYN} des Werkstoffes exakt zerstörungsfrei bestimmt werden. Dazu nachfolgend noch eine ergänzende Erläuterung.

Der bislang gebräuchliche „Ersatz“-Wert für E_{DYN} , der sog. Ultraschall-E-Modul E_{US} , wird allein aus dem leicht messbaren Wert der Schallgeschwindigkeit v_L der longitudinalen Wellenanteile ermittelt. E_{US} wird dabei mit der eigentlich nur für Dehnwellen gültigen Beziehung $v_D = \sqrt{E/\rho}$ errechnet. Die Werte liegen daher i.d.R. 40-60% oberhalb des in der Baupraxis (mechanisch) ermittelten E-Moduls E_{STAT} . Der vergleichbare, aber zerstörungsfrei zu ermittelnde Wert für den dynamischen E-Modul E_{DYN} folgt unmittelbar aus den Formeln {4.1} und {4.2}:

$$\frac{v_T}{v_L} = \sqrt{\frac{1 - \mu}{2(1 + \mu)}} \quad \left| \begin{array}{l} \text{\{4.3\}} \\ [0...0,707] \end{array} \right.$$

Umstellen ergibt die Poisson-Konstante μ :

$$\mu = \frac{2v_T^2 - v_L^2}{2(v_T^2 + v_L^2)} \quad \left| \begin{array}{l} \text{\{4.4\}} \\ [0...0,5] \end{array} \right.$$

Durch Einsetzen von {4.4} in {4.2} lässt sich der dynamische E-Modul E_{DYN} bestimmen zu:

$$E_{DYN} = 2 \rho v_T^2 \left(1 + \frac{2v_T^2 - v_L^2}{2(v_T^2 + v_L^2)} \right) \quad \text{\{4.5\}}$$

Es ist unbedingt erforderlich, zur getrennten Auswertung der Moden beide Signale „rein longitudinal“ und „longitudinal + transversal“ an ein und derselben Stelle zur Verfügung zu haben. Die Auswertung eines kombinierten Signals „longitudinal + transversal“ allein, z.B. mit einem angeklebten Prüf-

kopf, ist aufgrund der starken Streuanteile im Signal sowie des Ausklings des Anteils „rein longitudinal“ bis deutlich in den Bereich des transversalen Echos nicht möglich. Verrechnet man durch Differenzbildung die Signale „rein longitudinal“ und „longitudinal + transversal“ miteinander, erhält man deutlich den rein transversalen Wellenanteil. Sofern es gelänge, durch das Umschalten der EVF zwischen den Zuständen „flüssig“ und „fest“ beide Schallgeschwindigkeiten v_L und v_T präzise zu messen, wäre dies ein erheblicher Fortschritt zur sicheren Ermittlung von E_{DYN} .

4.3.2 Untersuchungen mit EVF

Im Folgenden werden die wesentlichen physikalisch-technischen Informationen über EVF mit den daraus folgenden Erkenntnissen und Überlegungen zusammengestellt. Die Untersuchungsergebnisse werden in KAP. 4.3.2.4 dargestellt.

4.3.2.1 Hinweise zur EVF und deren Anwendung

Zunächst ist es erforderlich, einige grundsätzliche Hinweise über Aufbau und Eigenschaften der EVF sowie die daraus folgenden Anwendungsbedingungen zu geben. In diese Hinweise gehen, neben den theoretischen Informationen, bereits Erkenntnisse aus der praktischen Handhabung ein.

Bei der hier zur Verfügung stehenden EVF handelt es sich um eine Suspension von polaren alumosilikaten Feststoffen eingebettet in eine Siliconöl-Basis [OPPERMANN 1990, 1991]. In der aufgerührten Suspension liegen die Silikatteilchen zunächst regellos angeordnet vor. Hierdurch ergibt sich bei dem hier verwendeten Siliconöl eine Konsistenz, die etwa der Konsistenz von Wasser entspricht ($H_2O(20^\circ C, NK) \approx 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). Nach Anlegen einer ausreichenden Hochspannung (s.u.) ordnen sich die polaren Teilchen regelhaft zwischen Anode und Kathode an. Die angelegte Hochspannung verstärkt durch Ausbildung von Ionenwolken um die Teilchen deren Polarität. Es bilden sich, ähnlich den von polymeren Kunststoffen bekannten Makromolekülen, ketten-

förmige Teilchenanordnungen, die der EVF nunmehr feststoffartigen Charakter verleihen. Die wirksame Bindung ist allerdings nur auf das angelegte E-Feld zurückzuführen, d.h. physikalisch, und klingt nach Abschalten des Hochspannungsfeldes rasch ab. Den prinzipiellen Wirkmechanismus verdeutlicht BILD 4.24.

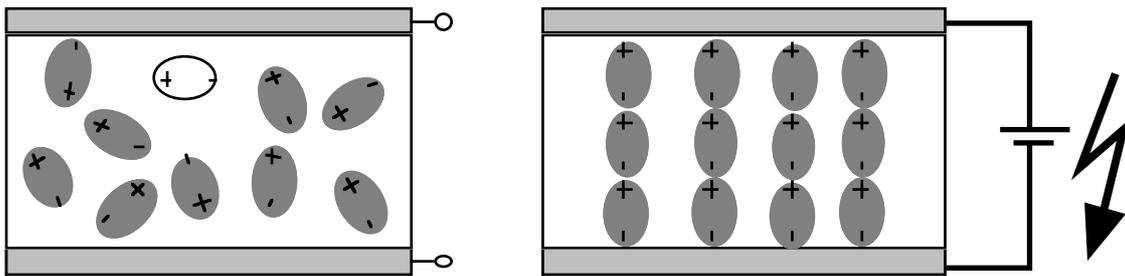


BILD 4.24: Ausrichtung der EVF-Teilchen im elektrostatischen Feld

Die Viskosität ist naturgemäß eine dynamische Größe. Allgemein definiert man die (dynamische) Viskosität einer Flüssigkeit durch den Differentialquotienten der übertragenen Schubspannung und dem in der Flüssigkeit vorliegenden Geschwindigkeitsgefälle D (s. BILD 4.25). Für geringe Scherbelastungen erhält man die *Nullviskosität* η_0 durch Grenzwertbildung mit $D \rightarrow 0$.

Bei der eingesetzten EVF sind folgende Einflussgrößen für die sich einstellende Viskosität maßgeblich [OPPERMANN1990, 1991]:

- 1.) die mechanischen u. elektrischen Eigenschaften der eingesetzten EVF
- 2.) die anliegende elektrische Feldstärke E [kV/mm]
- 3.) die Frequenz des anliegenden Feldes [Hz]
- 4.) die Schergeschwindigkeit D [1/s] {keine Newtonsche Flüssigkeit}
- 5.) die Temperatur T [°C]

Für die vorliegenden Untersuchung reduzieren sich die Einflussparameter deutlich. Da aufgrund der stationären Prüfkopfkopplung keine dynamischen Belastungen auftreten und bei praktisch gleichbleibenden Temperaturen im Labor gemessen wird, bleiben die Einflussgrößen 4.) und 5.) konstant. Da aus praktischen Gründen (s.u. KAP. 4.3.2.3) nur mit Gleichspannung, d.h. $f = 0$ Hz, gearbeitet werden kann, gilt dieses in gleicher Weise für Pkt. 3.).

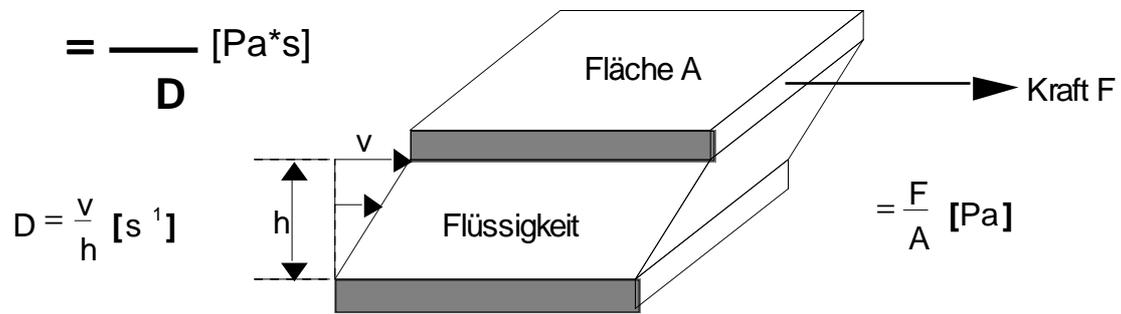


BILD 4.25: Zur Definition der dynamischen Viskosität

Wesentlich für die Untersuchung der Anwendbarkeit der EVF als Ultraschall-Koppelmedium ist, neben ihren spezifischen Eigenschaften, also die tatsächliche Abhängigkeit der Viskosität von der elektrischen Feldstärke, kurz $\eta = f(E)$. Den vom Hersteller angegebenen, qualitativen Funktionsverlauf [OPPERMANN1991] zeigt BILD 4.26.

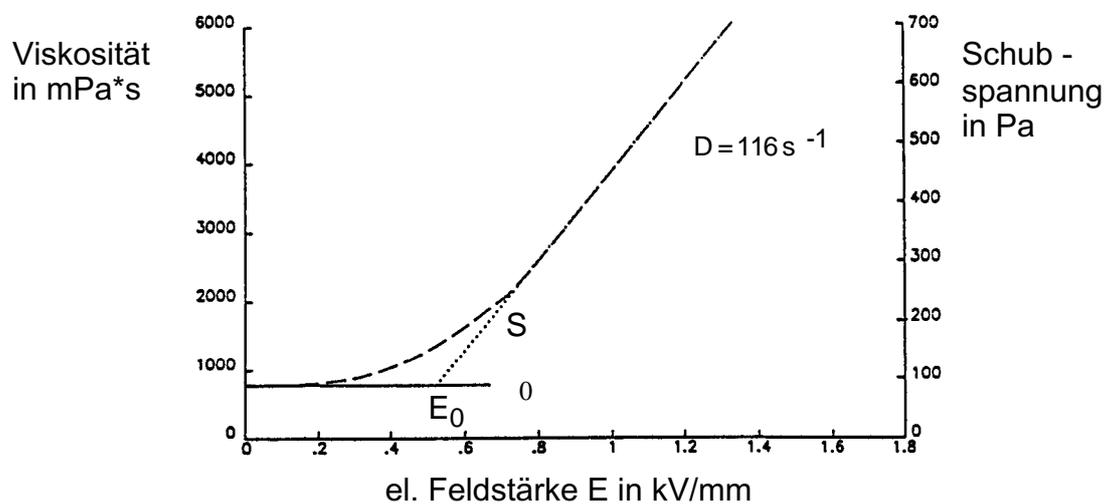


BILD 4.26: Viskosität der EVF in Abhängigkeit zur Feldstärke [OPPERMANN1991]

Unterhalb einer Schwellfeldstärke E_0 besitzt die EVF eine gleichbleibende Grundviskosität η_0 , typische Werte sind heute $E_0 = 1,5 \text{ kV/mm}$ und $\eta_0 = 1000 \text{ mPas}$. Oberhalb E_0 steigt η praktisch linear mit E bis zum Erreichen der maximal zulässigen Feldstärke E_{max} , die durch die elektrische Durchschlags-

festigkeit der EVF bestimmt ist. Unter Normalbedingungen sollte die Feldstärke $E_{\max} = 4 \text{ kV/mm}$ nicht überschritten werden. Die lineare Steigung S , mit der die Schubspannung (und somit auch nach die Viskosität) gegen E steigt, auch absoluter elektroviskoser Effekt genannt, beträgt unter Normalbedingungen etwa 800 Pa/(kV/mm) . Bei Feldstärken ab 3 kV/mm gilt dann $\tau > 1000 \text{ Pa}$, was für die Anwendung der EVF als stationäres Koppelmedium ($D = 0 \text{ s}^{-1}$) einem feststoffartigen, gummielastischen Verhalten gleichkommt. Durch die Regelung der Feldstärke lassen sich im Zwischenbereich die gewünschten Werte für τ kontinuierlich einstellen. Die Umschaltzeit der EVF zwischen den Zuständen flüssig \rightarrow fest liegen dabei nach Herstellerangaben im Bereich einiger 10 Millisekunden. Dieses konnte, wie in KAP. 4.3.2.4 gezeigt wird, bestätigt werden. Allerdings benötigt der umgekehrte Vorgang fest \rightarrow flüssig mehrere Sekunden, was offensichtlich an der erst allmählich eintretenden Depolarisierung der Teilchen und der umhüllenden Ionenwolken liegt. Daher musste festgestellt werden, dass die zu Beginn der Untersuchungen gedachte "Impulslängenregelung" zur schnellen Abdämpfung des Anregungsimpulses am Prüfkopf durch die EVF (s. KAP. 4.3.1.3, Pkt.1.) nicht realisierbar war. Die dafür erforderlichen, kurzen Schaltzeiten (Viskositätsänderungen) von nur wenigen μs lassen EVF bisher prinzipiell nicht zu (s. u.). Dieser Nachteil kann jedoch durch die inzwischen vorliegenden, speziell für die Betonprüfung weiterentwickelten Prüfköpfe vollständig ausgeglichen werden.

Die beschriebene, langsame Relaxation aus dem erstarrten Zustand deutet auf eine weitere Schwierigkeit im Umgang mit EVF hin. Da es sich um eine Suspension handelt (Festkörperteilchen in Flüssigkeit), besteht eine nicht unerhebliche Neigung der EVF zur *Sedimentation*. Dieser Absetzneigung wird herstellerseitig durch eine geeignete Abstimmung der flüssigen und festen Phase der EVF sowie einer thixotropen Grundkonsistenz entgegengewirkt und ist für den hochdynamischen Anwendungsbereich, für den EVF entwickelt wurden (Visko-Kupplung, Schwingungsdämpfer) unkritisch. Allerdings zeigte sich bei der hier verwendeten EVF eine starke Absetzneigung. Schon nach wenigen Wochen einer ruhigen Lagerung war es erforderlich, mittels einer mechanischen Rührvorrichtung die ursprüngliche Gleichmäßigkeit wieder-

herzustellen. Aus diesem Grund wurde die EVF während der Untersuchungen dauerhaft auf einem Magnetrührer bei geringer Umlaufzahl gelagert, wodurch die unerwünschte Sedimentation vermieden wurde.

Eine erhebliche Schwierigkeit für die Anwendung als Ultraschall-Koppelmedium entsteht durch den *elektrophoretischen Effekt*, d.h. durch die langsame Wanderung der elektrisch geladenen Festkörperteilchen (hier) zur Kathode. Ein angelegtes, starkes elektrostatisches Feld beschleunigt die so hervorgerufene Sedimentation dramatisch, sofern sich die beaufschlagte EVF in Ruhe befindet. Innerhalb ca. 1 min nach Anlegen der Hochspannung entmischt sich die EVF deutlich, d.h. die klare Siliconölphase schwimmt auf den weißen Silikatteilchen sichtbar auf. Bei anderen Anwendungen kann dieser Effekt durch die Verwendung eines Wechselfeldes bspw. mit 50Hz Netzfrequenz unterbunden werden. Im hier allein anwendbaren Gleichspannungsfeld konnte der Effekt erst dadurch unterbunden werden, dass a) eine Vorrichtung gebaut wurde, die kurze Hochspannungsimpulse ($<100\text{ms}$) mittels eines Tasters ermöglichte und b) die Energie der eingesendeten Ultraschallimpulse so hoch gewählt wurde (Länge des Anregungsimpulses $T_{\text{PULS}} = 15\mu\text{s}$ bei 300V), so dass nunmehr das Ultraschallsignal selbst für eine zusätzliche, mechanische Durchmischung der EVF sorgte.

Wie bereits dargestellt, benötigt die EVF zum Umschalten zwischen den Zuständen flüssig – fest Feldstärken von 0 bis max. 4 kV/mm. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit von Beton können die erforderlichen Elektrodenabstände (Prüfkopf – Beton) nicht wesentlich kleiner als 1mm gewählt werden. Bei geringeren Abständen führt die Oberflächenrauigkeit des Betons sehr schnell zu elektrischen Durchschlägen.

Hieraus folgt, dass bei der Untersuchung mit Spannungen im Bereich von mehreren kV zu arbeiten war. Es waren daher, soweit möglich, die Sicherheitsbestimmungen und Unfallverhütungsvorschriften gem. DIN VDE 0411 Teil 100 zu berücksichtigen. Hier wird u.a. wesentlich vorgeschrieben, dass in der Nähe ungeschützter elektrischer Anlagen oder Installationen (was im Labor- und Testbetrieb insbesondere an großen Prüfteilen wie Betonprobekör-

pern nicht zu vermeiden ist) in keinem Fall größere Kurzschlussströme als 12 mA (bei Gleichspannung) fließen dürfen. Zwar ist das hier verwendete Hochspannungsgerät [HEINZINGER1993] spannungs- und strombegrenzt, diese Regelung ist jedoch im Falle eines Kurzschlusses kurzfristig unwirksam, da zuerst die zur Spannungstabilisierung im Gerät nachgeschalteten Kondensatoren entladen werden. Daher war es zwingend erforderlich, in den Hochspannungsausgang des HV-Netzgerätes einen 2M Ω -Schutzwiderstand einzuschleifen, der in jedem Falle (auch bei max. Spannung $U_{DC} = 20kV$) den Strom auf $I_{max} = 10mA$ begrenzt. Dieses wird hier auch deshalb erwähnt, weil dieser Schutzwiderstand im Falle des regulären Einsatzes einen Spannungsteiler mit dem eigentlichen Verbraucher (EVF-Elektroden am Prüfkörper) darstellt und sich als großes Hindernis beim Aufbringen der erforderlichen Spannungen erwies.

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass die EVF selbst keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen erfordert. Genaue Angaben können dem Sicherheitsdatenblatt des Herstellers entnommen werden [OPPERMANN1990].



BILD 4.27: Hochspannungsquelle mit Taktgenerator u. Steuereinheit

4.3.2.2 Aufbau einer erweiterten Prüfeinrichtung

Zur Untersuchung der Eignung von EVF für die Ankopplung von Ultraschall-Prüfköpfen insbesondere für das Ultraschallecho-Verfahren musste die vorhandene Prüfeinrichtung (s. KAP. 4.1.3) um die für den Untersuchungszweck benötigten Komponenten ergänzt werden. Die wesentlichen technischen Ergänzungen waren:

- regelbare Hochspannungsquelle 20kV
- Pentium-300 PC mit Messdatenerfassungskarte / Software
- regelbarer Taktgenerator

Die zum Betrieb der EVF erforderliche Hochspannung wurde durch einen kommerziellen Hochspannungsgenerator mit regelbarem Strom- und Spannungsausgang bereitgestellt [HEINZINGER1993]. Damit standen maximal -20kV stabilisierter Gleichspannung bei einem nominalen Stromfluss von maximal 3mA zur Verfügung. Als sehr wichtig erwies sich nachfolgend die Möglichkeit, über eine Datenschnittstelle Ausgangsspannung und -strom mit einer Anstiegszeit von nur 10ms auf von 0 V bzw. 0 mA auf die gewünschten Werte zu setzen. Mit den am Gerät vorhandenen 10fach-Drehpotentiometer allein sind nur kontinuierliche Änderungen möglich. Wie sich herausstellte, waren aber gerade schnelle Änderungen zwischen den Zuständen Hochspannung -AN und -AUS erforderlich, um den durch die EVF verursachten Effekt noch detektieren zu können.

Zusätzlich war es nötig, eine hochempfindliche Messeinrichtung mit größtmöglicher Flexibilität der Auswertemöglichkeiten aufzubauen. Das vorhandene Ultraschallgerät erzeugt zwar exzellente Signale, diese konnten jedoch mit Hilfe des Gerätes selbst nicht genauer auf ihre physikalischen Parametern (z.B. hinsichtlich des Frequenzspektrums) untersucht werden. Für eine genaue Einschätzung des von den EVF hervorgerufenen Effektes war es zudem erforderlich, eine Reihe von Parameter *gleichzeitig* zu erfassen, auszuwerten und abzuspeichern:

- präzise Erfassung des Ultraschallsignals (Rohdaten)
- Erfassung e. beliebigen Ausschnittes der Rohdaten mit hoher Auflösung
- Berechnung eines Differenzsignales z.B. für EVF „flüssig“- „fest“
- Frequenzspektrum (FFT) eines beliebigen Signalausschnittes
- Effektivwert (RMS) eines beliebigen Signalausschnittes

- Abspeichern und Ausdrucken der gewonnenen Daten.

Diese Optionen wurden realisiert durch den Aufbau eines Messsystems, welches zentral aus einem schnellen Pentium300-PC mit einer integrierten 1-Kanal 12bit/64MHz Datenerfassungskarte Typ DAS-4100 [KEITHLEY1995-1] besteht. Zu dieser Karte wurde die objektorientierte Programmiersoftware „TestPoint 3.2“ [KEITHLEY1995-2] erworben, die das Erstellen eigener, genau auf den Prüfzweck zugeschnittener Software erlaubt. Auf diese Weise wurde das Anwenderprogramm "US-Interaktiv" erstellt, welches die Erfassung und Berechnung der oben genannten Messgrößen in Echtzeit erlaubt. Durch den modularen Aufbau des Programms sind zudem Modifikationen und Erweiterungen für andere Prüfzwecke jederzeit komfortabel möglich (s. [RIEFORTH1999]). BILD 4.28 zeigt die Bedienoberfläche, die nun kurz erläutert werden soll.

Im Bereich **A** wird die Karte angesteuert. Einstellbar sind hier die Sampling-Rate von 0,5 bis 64MHz (somit die Zeitauflösung von $2\mu\text{s}$ bis $\sim 16\text{ns}$), der Spannungsmessbereich ($\pm 0,1$ bis $\pm 4\text{V}$) und die Anzahl der aufgenommenen Messwerte ("pro Schuss"), zusätzlich wird die laufende Zeit seit Prüfbeginn in Sekunden angezeigt. Die mit diesen Parametern erhaltenen Daten werden im Fenster **B** "Rohdaten" dargestellt und entsprechen i.d.R. dem vom Ultraschallgerät erhaltenen A-Bild. Im Bereich **G** können wahlweise zusätzliche, digitale Hoch- und Tiefpass-Filter zwischen 10 und 500 kHz zugeschaltet werden, die kombiniert als regelbarer Bandpass wirken. Im Fenster **C** "Kallibriersignal" wird nach Betätigen der Taste "Kallibrieren" jeweils genau ein "Schuss" aufgenommen, der für alle folgenden Darstellungen als Differenz verrechnet wird. Das Differenzsignal wird in Fenster **D** dargestellt und kann dort mit einem Schieberegler ("Posttrigger" vglb. einer "Zoom"-Funktion) genauer betrachtet und analysiert werden. Von dem dort ausgewählten Signal (-teil) wird in Fenster **E** mittels FFT das Frequenzspektrum und in Fenster **F** der Effektivwert (RMS = root mean square) berechnet. Die Optionen **H** ermöglichen das Abspeichern als Excel-Datei und Ausdrucken der angezeigten Daten.

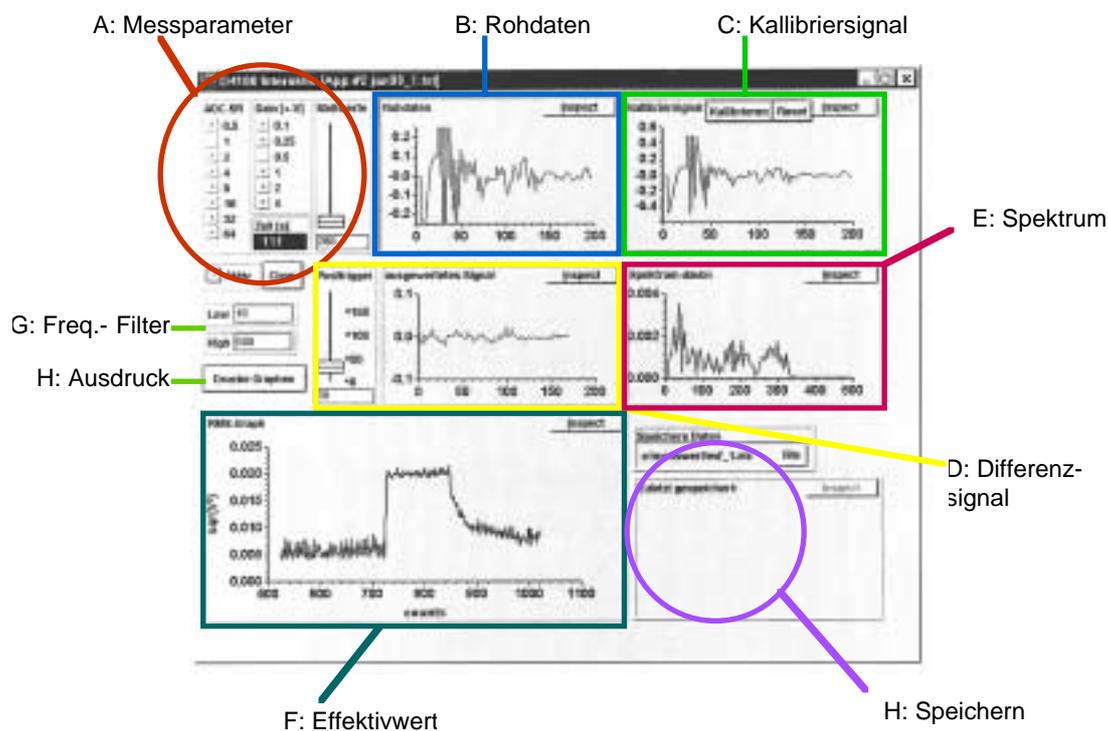


BILD 4.28: Bedienoberfläche des Programms „US-Interaktiv“

Die Funktion "Kallibrieren" soll nachfolgend noch genauer erläutert werden. Die Betätigung dieser Funktion erlaubt es, kleinste Veränderungen, wie sie z.B. beim Erstarren der EVF mit zunehmender Feldstärke auftreten können, sehr genau zu messen. Nach einem "Kallibrier-Schuss" im spannungslosen Zustand (der EVF) wird jede Veränderung beim Anlegen der Hochspannung als Differenzsignal in Fenster **D** angezeigt. Die Fenster **D** und **F** (Effektivwert) sind darüberhinaus so eingestellt, dass die Skalierung der Abszissen automatisch erfolgt. Auf diese Weise bleiben Änderungen im Millivolt-Bereich erkennbar. Ein anderer Nutzen der Kallibrierfunktion ist, dass es beim Ultraschallecho-Verfahren möglich wird, den ausklingenden Anregungsimpuls, der je nach Einstellung Prüfkopf-Totzeiten von bis zu $30\mu\text{s}$ hervorruft, rein rechnerisch aus dem Nutzsignal zu entfernen und so klarere Darstellungen zu ermöglichen.

Selbstverständlich müssen alle bislang erwähnten Komponenten (Ultraschallgerät, Hochspannungs-Gerät, Datenkarte) der erweiterten Prüfeinrichtung beim gemeinsamen Messbetrieb aufeinander abgestimmt, d.h. gleichzeitig getaktet werden. Da alle Komponenten über externe Takteingän-

ge verfügen, wird der "Master"-Takt über einen zusätzlichen, externen Frequenzgenerator erzeugt, der allen Komponenten dasselbe, in seiner Frequenz regelbare TTL-Signal zur Verfügung stellt. Die Anzahl der Messungen

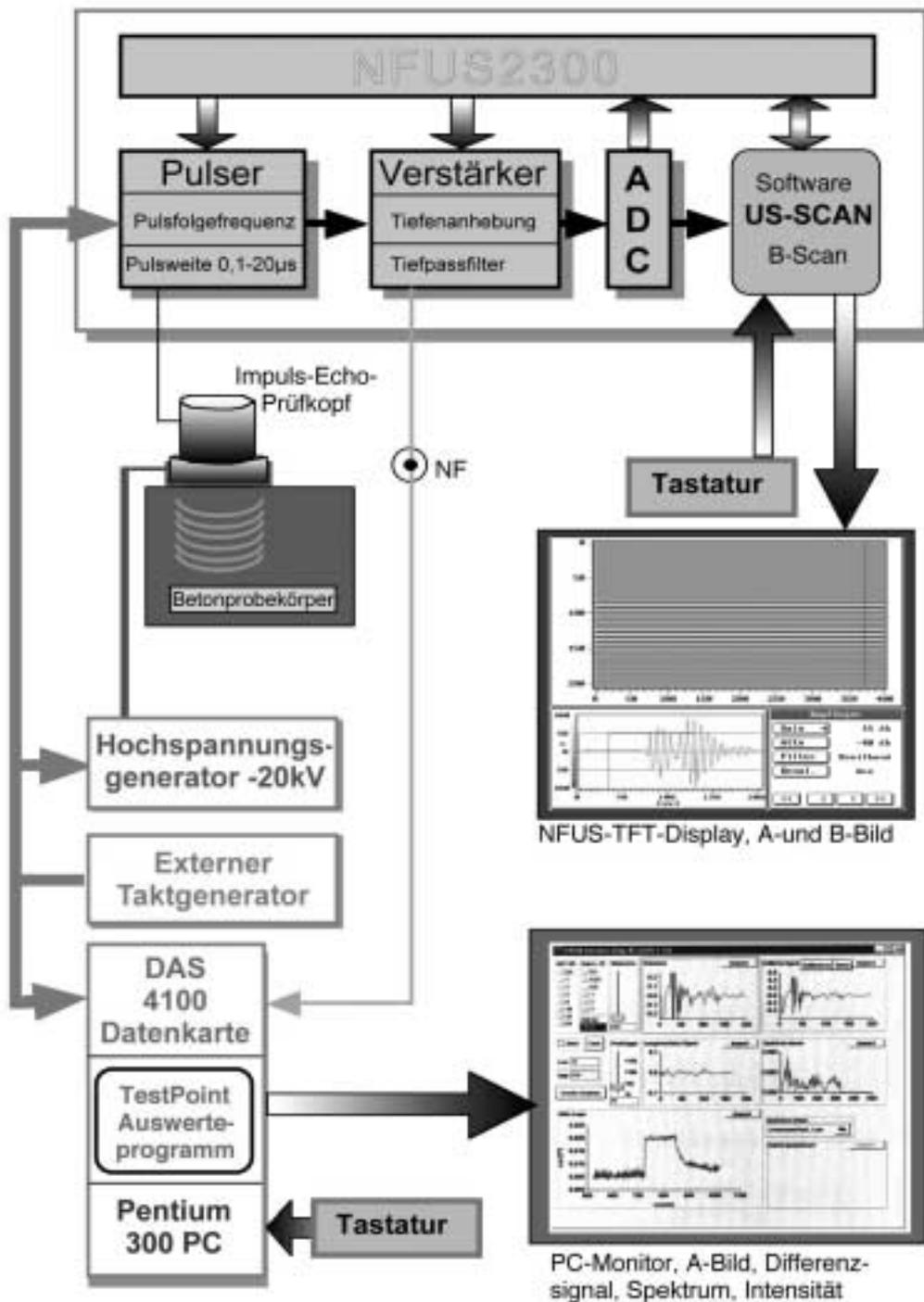


BILD 4.29: Schematischer Aufbau der erweiterten Prüfeinrichtung

pro Sekunde kann somit völlig frei geregelt und dem Prüfzweck genau angepasst werden. Einen schematischen Überblick über die erweiterte Prüfeinrichtung gibt BILD 4.29.

4.3.2.3 Versuchsaufbau und erkannte Probleme

Aufbauend auf den zuvor vorgestellten Ergebnissen und Überlegungen war ein geeigneter Aufbau zur Untersuchung der EVF als Koppelmittel zu finden. Als Probekörper wurde ein Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 20cm und einem Größtkorn von 16mm gewählt. An diesen wurde unterseitig ein

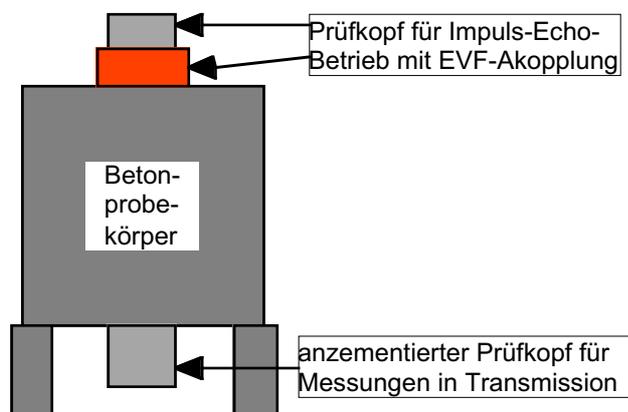


BILD 4.30: Schema des Prüfaufbaus

Empfangsprüfkopf für Messungen in Transmission mit Schnellzement dauerhaft angebracht und oberseitig ein Prüfkopf mit einem Vorsatz zur Aufnahme der EVF und entsprechender Spannungsversorgung angekoppelt (beide Prüfköpfe baugleich vom Typ IE40/0.3-1, vgl. KAP. 4.2):

BILD 4.31 zeigt den zu Beginn der Untersuchung vorab geplanten Aufbau des für den Betrieb mit EVF als Koppelmittel umgerüsteten Prüfkopfes. Hier sollte durch das Aufbringen einer zusätzlichen, metallbedampften Keramikplatte das erforderliche E-Feld zwischen dieser und dem auf Masse belassenen Beton erzeugen. Diese Ausführung erschien deshalb sinnvoll, da sowohl der Prüfkopf gehäuseseitig als auch (i.d.R.) der Betonprobekörper an Masse liegen. Weitere Voruntersuchungen ergaben jedoch, dass durch das Aufkleben von Keramikplatten verschiedener Dicken der verwendete Prüfkopf jedesmal in unkontrollierte Eigenschwingungen geriet, die das Messsignal völlig über-

schrieben und unbrauchbar machten. Die hier verwendeten, speziell für Beton entwickelten (und erforderlichen) Prüfköpfe sind in ihrer Eigenbedämpfung sehr aufwändig und genau auf die Schallübertragungsverhältnisse an Beton abgestimmt und lassen daher nach der heute vorliegenden Erfahrung eine solche, nachträgliche Manipulation nicht zu.

Da die Piezokeramik der Prüfköpfe «2» bis «6» (s. KAP. 4.2) in Stahl gefasst ist, auf Masse liegt und dadurch mit der gesamten

Prüfeinrichtung masseseitig verbunden ist, war es zwingend notwendig, den Aufbau des Prüfkopf-Vorsatzes soweit zu ändern, dass weiterhin alle mit der Prüfeinrichtung verbundenen Teile auf Masse lagen (was schon deshalb von Vorteil ist, um die empfindlichen Computerkomponenten zu schützen) und nunmehr die sich betonseitig mit EVF in Berührung befindliche Fläche zur Aufnahme des Hochspannungspotenzials vorgesehen wurde. Dieses erschien wenig kritisch, da

- nur Potenziale und keine Ströme übertragen werden sollten,
- (trockener) Beton eine nur geringe Leitfähigkeit besitzt, und
- die erforderliche Oberflächenleitfähigkeit leicht über Leitlack o.ä. herzustellen war.

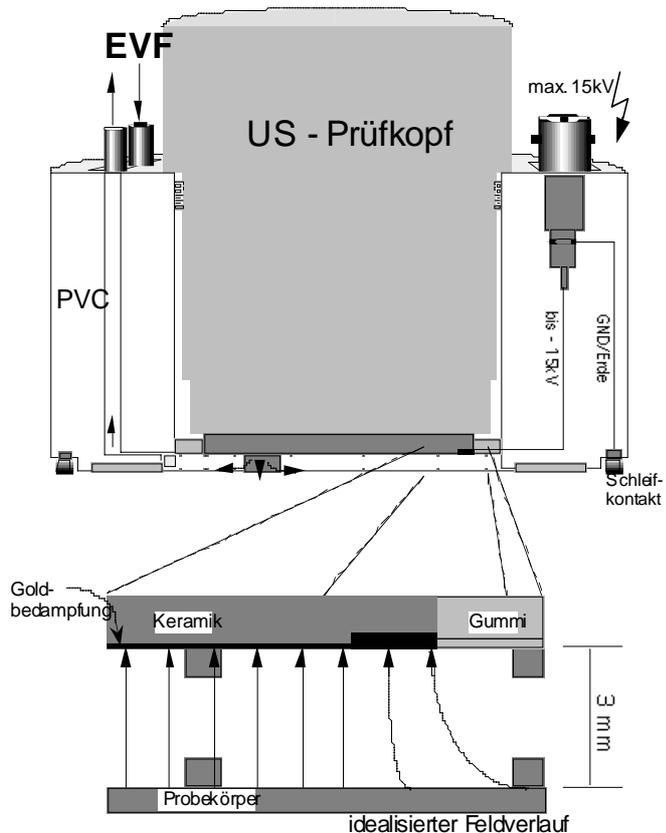


BILD 4.31: Vorab geplanter Prüfkopfaufbau

Es wurde daher zunächst der Versuch unternommen, sowohl den Prüfkopf als auch die Betonoberfläche mit einer dünnen, polierten Zink-Leitlackschicht zu überziehen und mittels eines geeigneten Distanzringes das erforderliche E-Feld aufzubauen. Als Distanzringe standen 3 verschiedene Ringe aus PVC zur Verfügung, die den Prüfkopf in 1, 2 bzw. 3mm über der Betonoberfläche positionieren sollten (BILD 4.32).

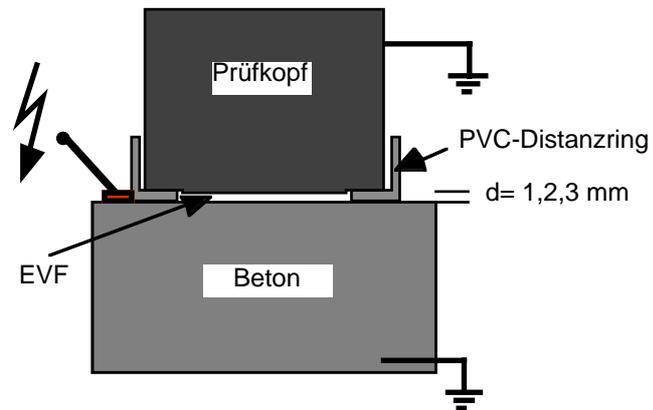


BILD 4.32: Schema des ersten Probeaufbaus

Zunächst wurden an diesem Aufbau einige Messungen in Transmission und Echo-Betrieb ohne anliegendes Hochspannungspotenzial unternommen. Die äußerst dünne Leitlackschicht beeinflusste das Ultraschallsignal nicht signifikant; in Transmission war ein klares Schallsignal zu empfangen. Allerdings zeigte sich bereits hier, dass die für den Ultraschallecho-Betrieb unbedingt erforderliche, gute Ankopplung mit dem erforderlichen hohen Energieeintrag des Ultraschallsignals in den Beton durch eine flüssige Koppelschicht (Impedanzsprung) auch von nur 1mm Dicke stark reduziert wird. Ein Rückwandecho konnte daher auch allenfalls undeutlich und nur nach Hin- und Herbewegen des Prüfkopfes geortet werden.

Anschließend wurde, hier zunächst über eine aufgeklebte Plattenelektrode, das Hochspannungspotenzial an die Betonoberfläche gelegt. Es stellte sich heraus, dass durch die Erdung des gesamten Versuchsaufbaus keine nennenswerten Potenziale aufgebaut werden konnten. Selbst nach der vorübergehenden Entfernung des in KAP. 4.3.2.1 erläuterten Schutzwiderstandes konnte auf der Betonoberfläche kein Potenzial über 500V (über einen speziellen Hochspannungstastkopf) nachgewiesen werden, obwohl die angeschlossene Hochspannungsversorgung bei 5kV mit dem Maximalstrom von 3mA be-

trieben wurde. Außerdem konnte die Hochspannung wegen zahlreicher Überschläge und Entladungsvorgänge gegenüber der Raumluft nicht stabilisiert werden (die Durchschlagsfeldstärke von trockener Luft liegt bei 2,4 KV/mm [HASENPUSCH1991]). Da auf diese Weise keine Erstarrung der EVF erzielt werden kann, mußte der Versuchsaufbau in einem zweiten Schritt abgeändert werden. Folgende Punkte wurden dabei berücksichtigt:

- Verwendung einer Ringelektrode,
 - a) zur Beschränkung der Elektrodenflächen auf den minimalen Bereich,
 - b) zum möglichst homogenen Potenzialeintrag,
- Verwendung eines neuen, werksseitig vollständig metallgekapselten Prüfkopfes (S40HB0,3-1; Prüfköpfe «2» und «3»),
- Reduzierung der Leitfähigkeit durch extrem dünnen Graphitauftrag nur im Elektrodenbereich,
- Vollständige Isolation des Betonprobekörpers gegen Masse/Erdung.

Um die Wirksamkeit dieser Maßnahmen zu überprüfen, wurden die Änderungen schrittweise vorgenommen und bei jedem Schritt das in der Elektrodenmitte aufgebaute Potenzial mit der Hochspannungssonde überprüft. Es zeigte sich, dass durch diese Maßnahmen nunmehr bei geringem Stromfluss und vorgeschaltetem Schutzwiderstand Potenziale bis maximal 4kV in der Elektrodenmitte aufgebaut werden konnten. Daraus folgt für die nachstehend in KAP. 4.3.2.4 erläuterten

Messungen, dass der Elektrodenabstand, d.h. der Abstand von Prüfkopf zur Betonoberfläche, nicht mehr als 1mm betragen darf, um ein Erstarren der EVF zu gewährleisten. Das am Prüf-

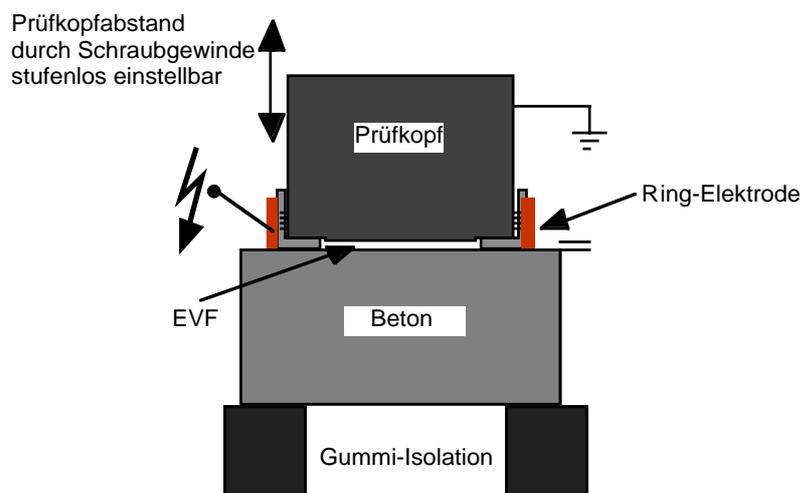


BILD 4.33: Schema des Untersuchungsaufbaus

kopf befindliche Schraubgewinde wurde deshalb so mit dem Prüfkopf-Vorsatz verbunden, dass durch Drehen des Prüfkopfes der Abstand zur Betonoberfläche stufenlos von 0,3 bis 2mm eingestellt werden konnte. Nach dem Einbringen der EVF erhöhte sich der Stromfluss nur geringfügig, d.h. die gemessenen Potenziale wurden auch beim Einsatz der EVF erreicht.

Abschließend muß jedoch als Resultat aus diesen vorbereitenden Schritten auf einen schwerwiegenden Nachteil hingewiesen werden, der schon an dieser Stelle deutlich werden lässt, dass die Verwendung von EVF am Bauwerk nicht möglich sein wird. Die o.g. vollständige Isolation des Probekörpers gegen Masse (Erdung) ist zwar im Labor, nicht jedoch am Bauwerk möglich, da dieses naturgemäß geerdet ist. Zwar lassen sich bei entsprechender Dimensionierung der Potenzialquelle immer die erforderlichen Potenziale aufbauen, diese sind dann aber vom Sicherheitsstandpunkt nicht mehr vertretbar. Bereits im Labor zeigt der gewählte Aufbau den noch nicht explizit erwähnten Nachteil, dass Durchschallungs-Messungen unmöglich werden, da der unterhalb des Probekörpers angebrachte Empfangsprüfkopf bei Betrieb gehäuseseitig an Masse liegt, was zum Schutz der Prüfeinrichtung zwingend erforderlich ist. Die Überprüfung ergab, dass die aufgebrachten Potenziale sofort zusammenbrechen, sobald der Empfangsprüfkopf mit der Prüfeinrichtung verbunden war, obwohl dieser über 20cm trockenen Beton von der Hochspannungselektrode getrennt war.

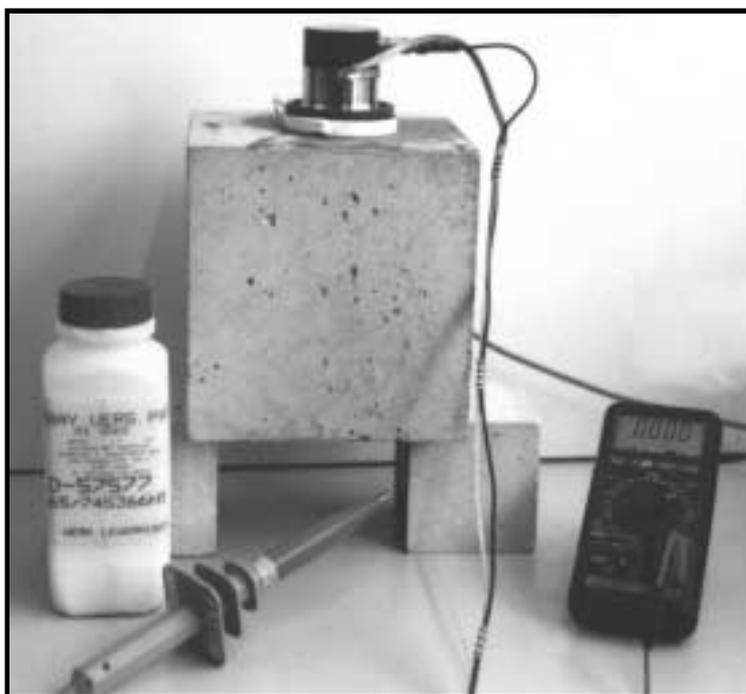


BILD 4.34: Realansicht des Prüfaufbaus

4.3.2.4 Nachweis des mit EVF erzielbaren Effekts

Für die folgenden Messungen wurde der in BILD 4.33 und 4.34 dargestellte Prüfaufbau verwendet. Um einen minimalen Prüfkopf Abstand d zur Betonoberfläche bei größtmöglicher Spannung U zu erreichen, wurden zunächst bei nicht angeschlossener Prüfvorrichtung die optimalen Werte durch Probieren (Drehen des Prüfkopfes im Befestigungsgewinde bzw. Verstellen der Hochspannung) ermittelt. Die erhaltene Feldstärke wurde so gewählt, dass gerade ein elektrisches Durchschlagen an irgendeiner Stelle der Messeinrichtung sicher unterblieb. Auf diese Weise konnten zuverlässig Feldstärken bis $E = 4\text{ kV/mm}$ aufgebaut werden, was zum Verfestigen der EVF ausreicht.

Als Ultraschallecho-Prüfkopf wurde der niederfrequente S40HB0,1-0,3

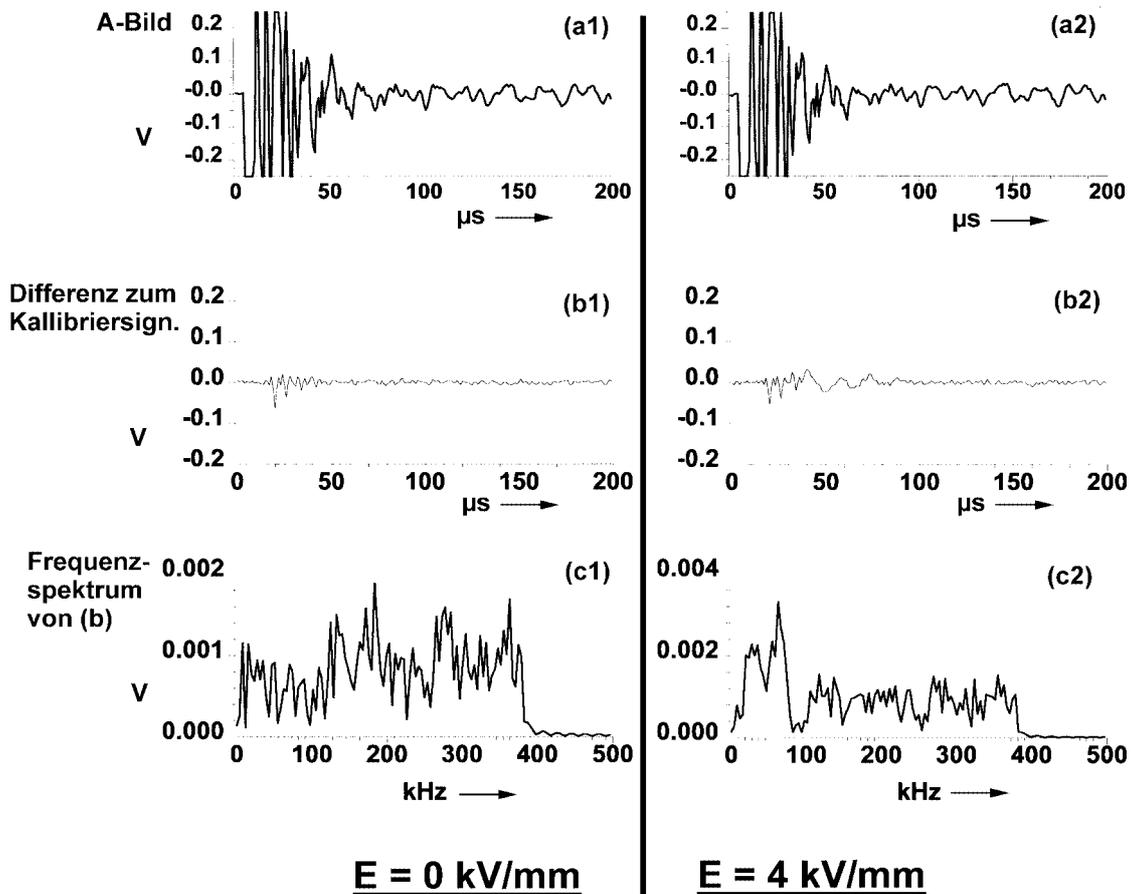


BILD 4.35: Messdaten mit Anregungsimpulslänge $T_{PULS} = 3\mu\text{s}$

(Prüfkopf «5») mit einer Bandbreite von 100-300kHz eingesetzt (s. KAP. 4.2). Erfahrungsgemäß liefert dieser Prüfkopf die besten Resultate bei einer Anregungsimpulslänge von $T_{PULS} = 3\mu s$, so dass dieser Wert eingestellt wurde. Die gesamte Prüfeinrichtung wurde bei ausgeschalteter Hochspannung optimal eingestellt.

BILD 4.35 zeigt das Prüfergebn auf der linken Seite ohne, auf der rechten Seite mit angelegtem Feld von 4kV/mm jeweils (untereinander) als A-Bild, Differenzbild zum Kallibriersignal und dem daraus erhaltenen Frequenzspektrum. Die Abweichung in (b1) von der Nulllinie ist auf das Rauschen des Messsignals zurückzuführen. Lediglich im Frequenzspektrum (c2) ist hier ein Einfluss der geänderten Viskosität zu bemerken, da hier Frequenzen unterhalb ca. 100kHz geringer bedämpft werden.

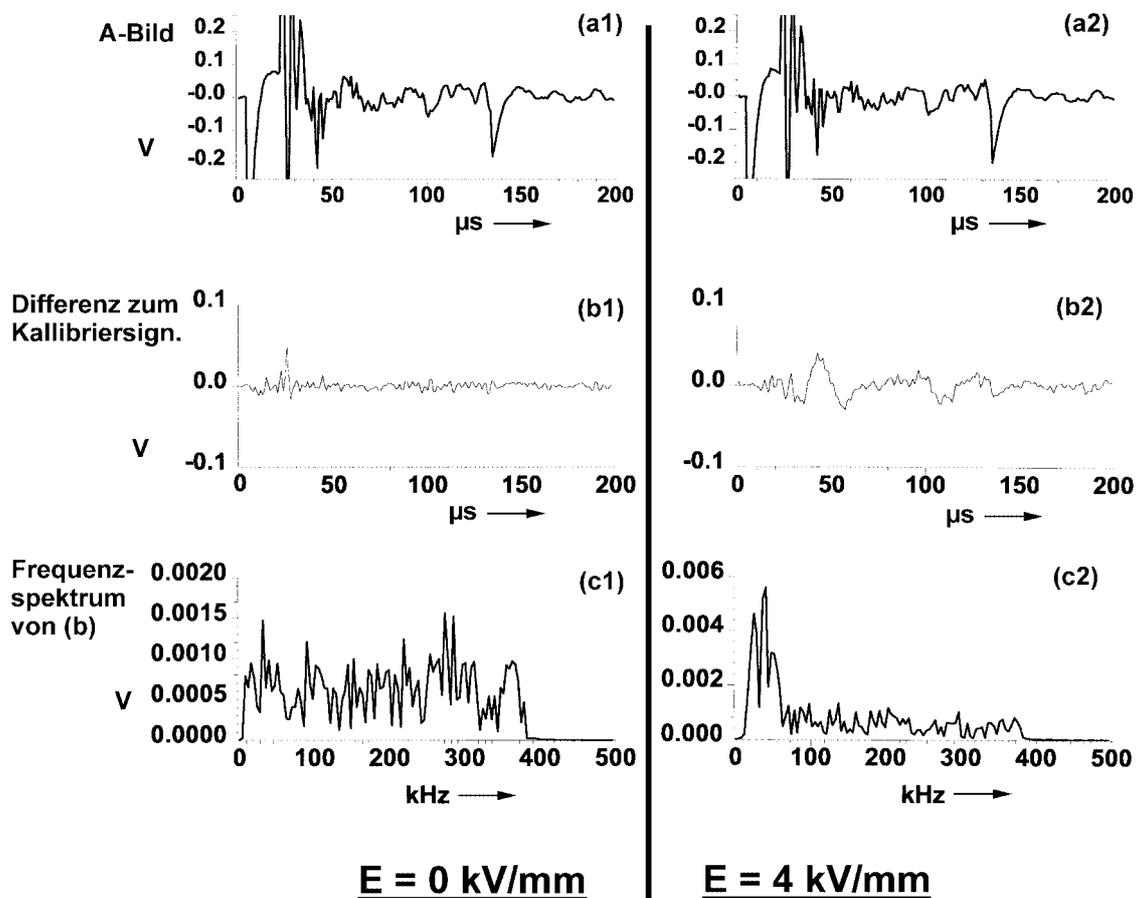


BILD 4.36: Messdaten mit Anregungsimpulslänge $T_{PULS} = 15\mu s$

BILD 4.36 zeigt eine Messung, bei der nunmehr die Anregungsimpulslänge bei $T_{PULS} = 15\mu s$ lag. Hier wird im Frequenzspektrum erstmals recht deutlich, dass niederfrequente Signalanteile unterhalb 100kHz besser übertragen werden, was auf transversale Moden hindeuten könnte. Leider ist es jedoch nicht möglich, in (b2) das Einsetzen eines Transversalwellenecho zu detektieren (der Peak bei $t \approx 130\mu s$ in (a1) und (a2) ist ein messtechnisches Artefakt und wird im Differenzsignal kompensiert).

Zur Verdeutlichung, wie klein der Effekt auf das Nutzsignal tatsächlich ist, zeigt BILD 4.37 eine Auswertung nicht über das Differenzsignal, sondern über das direkt erhaltene Signal. Hier sind A-Bild und Frequenzspektrum praktisch nicht unterscheidbar, lediglich beim Effektivwert bewirkt die zusätzliche

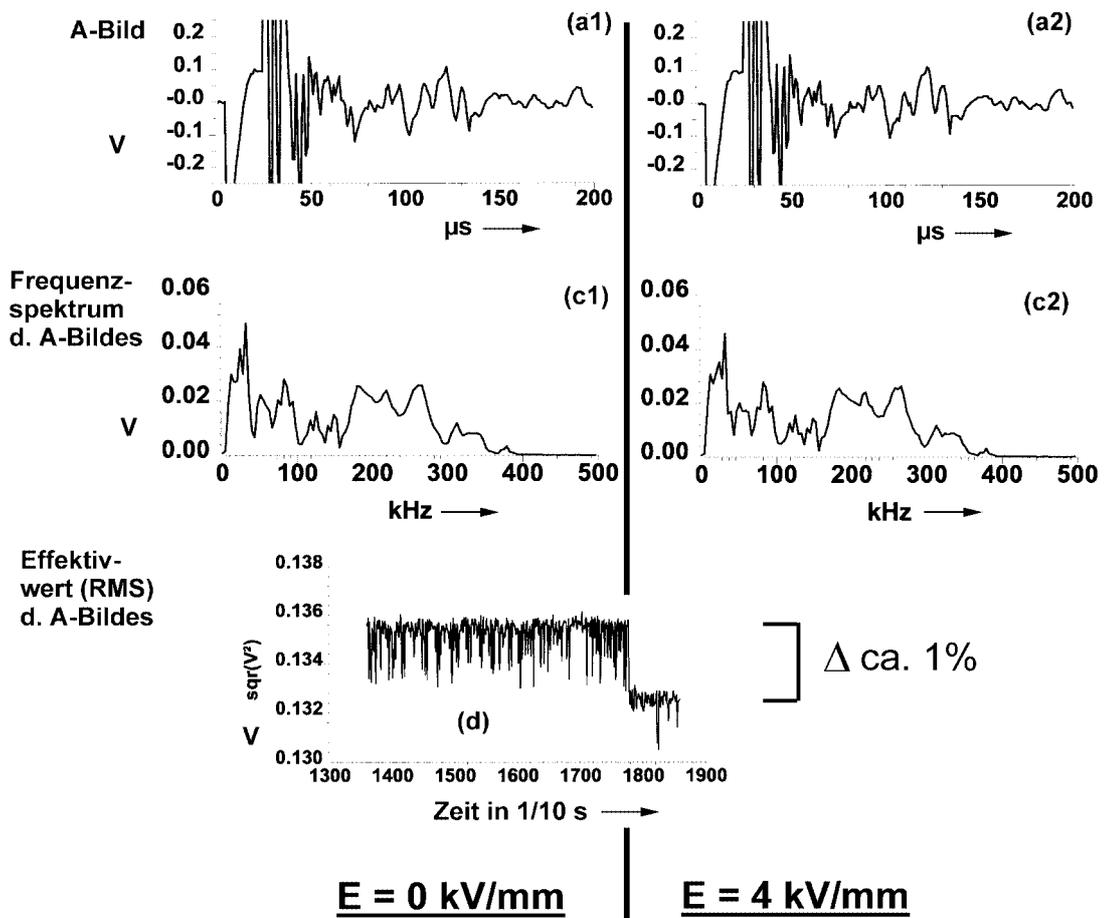


BILD 4.37: Messdaten mit $T_{PULS} = 15\mu s$, Intensitätsänderung des Gesamtsignals

Dämpfung einen Abfall um ca. 1%, der nur knapp außerhalb des Rauschens liegt.

Wählt man einen geeigneten Bereich des Signals, z.B. den Bereich der Laufzeit von 30 - 180µs, lässt sich über die Bestimmung des Effektivwertes des Differenzsignals die Reaktion der EVF nach Anlegen des Feldes gut beobachten. BILD 4.38

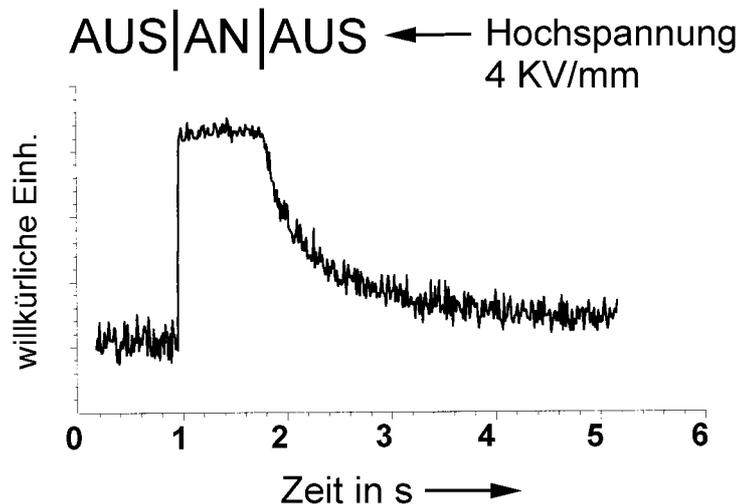


BILD 4.38: Intensitätsänderung des Differenzsignals in einer Laufzeit-Blende von 30-180µs

zeigt die spontane Zustandsänderung und

das vergleichsweise langsame Abklingen der elektroviskosen Wirkung deutlich (die Auftragung erscheint aufgrund des Rechenalgorithmus des Differenzsignals invertiert).

In Abschnitt 4.3.2.3 wurde dargelegt, dass aufgrund der Erdung des Empfangskopfes keine Messungen in Transmission mit den Standard-Prüfköpfen möglich waren. Allerdings konnte ein (nur für Transmissionsmessungen geeigneter) Prüfkopf gefunden werden (Typ S9204, vgl. [JONAS1996]), der schwingerseitig keine leitenden Teile aufweist. Daher wurde mit diesem als Empfänger zusätzlich

untersucht, ob ein Einfluss der EVF auf die Signalübertragung zu finden ist. Zwar stellte die Durchschallung selbst erwartungsgemäß kein Problem dar

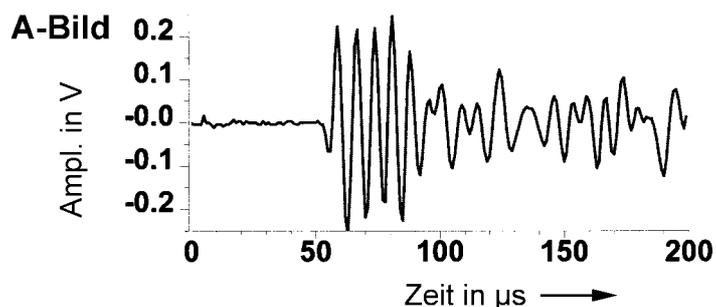


BILD 4.39: Empfangssignal in Transmission

(s. BILD 4.39), allerdings konnten auch bei der Auswertung des Differenzsignals keinerlei Unterschiede für die unterschiedlichen EVF-Zustände gefunden werden. Die Dämpfung wirkt offensichtlich in erster Linie direkt mechanisch auf den mit der EVF in Kontakt befindlichen Prüfkopf, jedoch praktisch nicht auf den Schalldurchgang.

BILD 4.40 zeigt abschließend die Auswirkung im B-Bild, wenn ein kurzer 4KV-Spannungsimpuls auf die EVF wirkt. Hier wird nochmals die schlagartige Signaländerung und das langsame Abklingen deutlich. Ebenfalls deutlich wird, dass der Effekt insgesamt sehr klein ist, da gerade das B-Bild für kleinste Änderungen in Intensität und Phase empfindlich ist.

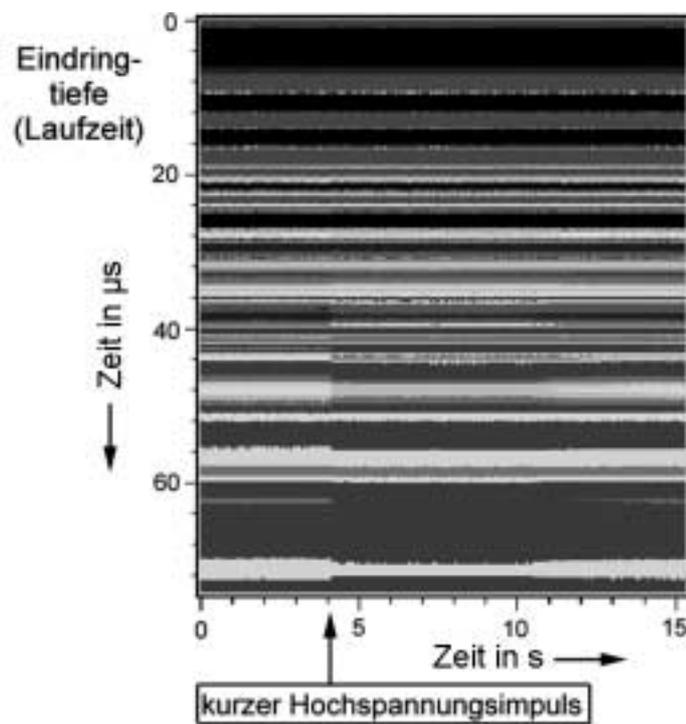


BILD 4.40: B-Bild vor und nach einem kurzen Spannungsimpuls von 4kV/mm

4.3.3 Beurteilung der Eignung von EVF als Koppelmittel

In den voranstehenden Abschnitten konnte mit Hilfe der eingesetzten, äußerst genauen Messmethodik nachgewiesen werden, dass bei der Verwendung einer EVF als Koppelmittel für Ultraschall-Prüfköpfe folgende Effekte beim Übergang vom flüssigen zum erstarrten Zustand auftreten:

- 1.) der Prüfkopf wird durch die erstarrte EVF nur geringfügig bedämpft
- 2.) Frequenzanteile unter 100kHz werden geringfügig besser übertragen
- 3.) die Reflexion einer rein transversalen Mode ist nicht nachweisbar
- 4.) in Transmission ist kein Effekt nachweisbar

Der beobachtete Abfall des Effektivwertes um ca. 1% entspricht einer Dämpfung von weniger als 0,1dB ($=20 \cdot \log(0,99)$). Der gesamte Dynamikbereich des Ultraschallgerätes beträgt 120dB; für praktische Untersuchungen wird der Erfahrung nach ein Dynamikbereich von 60dB genutzt. Berücksichtigt man die logarithmische Skalierung der Einheit dB, wird ersichtlich, wie gering der von den EVF verursachte Effekt gegenüber anderen Einflussgrößen (z.B. der Betonoberflächenstruktur) ist. In der Praxis erzielt man Unterschiede von mehreren dB leicht durch geringfügige Änderung des Anpressdruckes des Prüfkopfes oder die Verwendung unterschiedlicher Koppelmittel; z.B. kann der Unterschied in der Signalankopplung bei Verwendung von Glycerin anstelle von Vaseline bis zu 10dB betragen. Eine Änderung von 0,1dB ist zwar, wie gezeigt, unter statischen und idealen Laborbedingungen nachweisbar, wird in der praktischen Prüfung jedoch durch Parameter überschrieben, die einen um Größenordnungen stärkeren Einfluss ausüben. Da in Transmission kein Effekt nachgewiesen werden konnte, wird die beobachtete Dämpfung wesentlich als mechanischer Natur beurteilt, d.h. als "bremsender" Einfluss auf die schwingende Piezokeramik. Diese Dämpfung ist vom Prinzip gewünscht, da auf diese Weise eine kürzere Totzeit des Prüfkopfes erzielt wird, wird jedoch durch eine mechanisch möglichst feste Ankopplung des Prüfkopfes an den Beton deutlich besser erreicht.

Dass sich mit einer EVF kein für den Labor- oder Praxiseinsatz verwertbarer Vorteil bei der Ankopplung von Ultraschall-Prüfköpfen ergab, lässt sich nunmehr nach Auswertung aller durchgeführten Untersuchungen wie folgt erklären. Der Materialzustand der EVF in erstarrtem Zustand ist mit dem eines elastomeren Kunststoffes ("Gummi") vergleichbar. Prüfkopf-Vorsätze mit elastomeren Schutzschichten von ca. 1mm Dicke sind aus der Stahlprüfung bei den dort verwendeten Prüfköpfen bekannt. Auch bei der Stahlprüfung führen

diese Vorlaufschichten zu einer deutlichen Reduktion des Gesamtsignals, sind dort aber i.d.R. wegen der sehr viel geringeren Schallabsorption und -streuung im Prüfmaterial und der deutlich höheren Prüffrequenz weniger kritisch. Das Vorschalten einer solchen "Schutz"schicht bei der Ultraschallprüfung an Beton, sei es durch Verwendung einer Folie oder einer erstarrten EVF, reduziert jedoch die Aussagekraft des Messsignals unzulässig stark. Dieses konnte durch den probeweisen Einsatz einer aus dem Bereich der Stahlprüfung stammenden Schutzfolie bestätigt werden. Für die Ultraschall-echo-Prüfung ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Entwicklung unerlässlich, eine möglichst enge Ankopplung der Prüfköpfe zum Beton sicherzustellen. Hierfür ist entweder ein direkter Kontakt des Prüfkopfes zum Beton notwendig, so dass das Koppelmittel lediglich die rauhen Unebenheiten der Oberfläche ausgleicht (Glyzerin/Vaseline o.ä.), oder es muß ein festes Koppelmittel verwendet werden, das in seinen mechanischen (somit schallübertragenden) Eigenschaften denen des Betons nahe kommt (z.B. Schnellzement). Nur dieses gewährleistet zusammen mit den heute speziell für die Betonprüfung entwickelten Prüfköpfen die unbedingt erforderliche, ideale Abstimmung des Systems von Prüfkopf und Prüfmaterial.

Die Detektion des Echoimpulses einer rein transversalen Mode erscheint beim Ultraschallecho-Verfahren prinzipiell sehr problematisch. Wie erläutert wird das Messsignal mit zunehmender Eindringtiefe/Laufzeit immer stärker durch Störanteile überlagert. Diese Störanteile werden durch die Inhomogenitäten des Betons, wesentlich den Zuschlag und die Luftporen erzeugt. Dieses führt gleichzeitig zu einer ständigen Umwandlung der verschiedenen Wellenmoden. Da ein Transversalwellenecho (von der Theorie) erst bei fast der doppelten Laufzeit des Longitudinalwellenechos ($v_T = 40-60\% v_L$) zu erwarten ist, muß die Nichterkennbarkeit eines solchen transversalen Echos auch bei der Differenzbetrachtung für flüssiges und erstarrtes Koppelmittel wesentlich darauf zurückgeführt werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die auch hier eingesetzten, modernen Prüfköpfe für die Betonprüfung darauf optimiert sind, praktisch ausschließlich longitudinale Moden zu senden und zu empfangen. Diese Konstruktionseigenart, die wesentlich für eine klar erkennbare Detek-

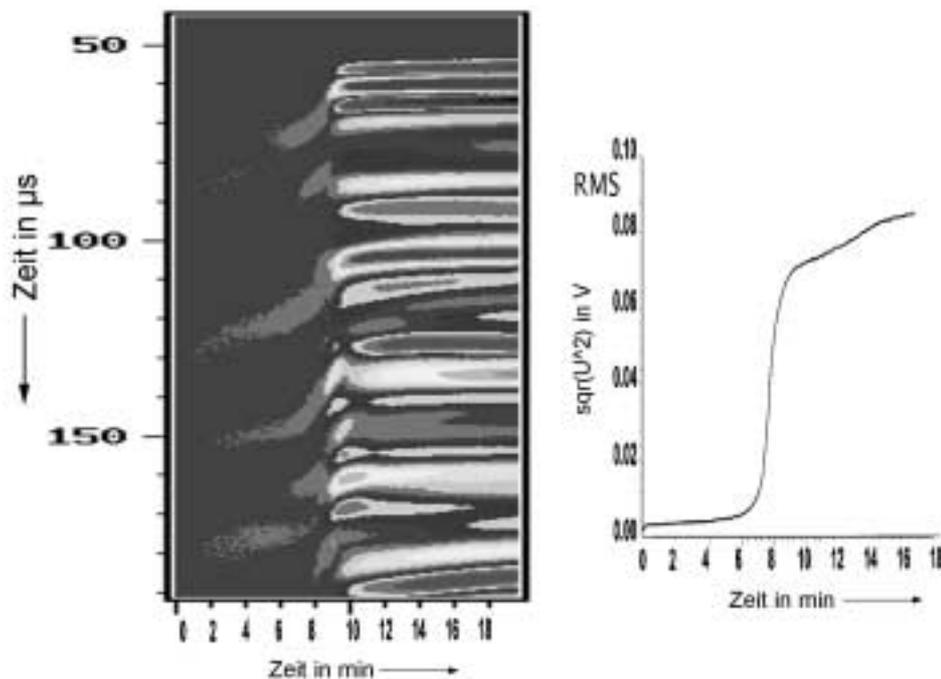


BILD 4.41: B-Bild und Intensitätsverlauf mit erstarrendem Schnellzement als Koppelmittel

tion von Echosignalen bei der Prüfung von Beton erforderlich ist, reduziert auf der anderen Seite den Empfang transversaler Moden erheblich. Diese Interpretation bestätigt sich, wenn statt EVF ein Schnellzement als erhärtendes Koppelmedium eingesetzt wird (s. BILD 4.41). Während hier im flüssigen Zustand praktisch kein Schalldurchgang erfolgt, werden mit einsetzender Erstarrung innerhalb von 2 Minuten alle Moden gleichzeitig, d.h. nicht unterscheidbar empfangen. Beim anschließenden Erhärtungsvorgang treten keine wesentlichen Signalveränderungen mehr auf.

Zusammenfassend kann aufgrund der vorstehenden Messergebnisse und Überlegungen, verbunden mit dem messtechnischen und sicherheitsrelevanten Aufwand, durch den Einsatz von EVF als Koppelmedium keine Verbesserung der Aussagefähigkeit für das Ultraschallecho-Verfahren zur Prüfung von Beton erzielt werden. Damit ist die Frage nach der Eignung von EVF für die Ankopplung von Ultraschall-Prüfköpfen auf Betonoberflächen abschließend geklärt.

5. Einsatz des Prüfverfahrens unter Laborbedingungen

5.1 Ermittlung des Auflösungsvermögens

Eine exakte Abschätzung des Auflösungsvermögens einer spezifischen Prüfeinrichtung ist aufgrund der Vielzahl der einwirkenden Parameter sehr aufwändig (s. KAP. 2.2). Beschränkt man jedoch die Untersuchung durch Vorüberlegungen wesentliche Parameter, kann man durch Messungen an geeigneten Prüfkörpern erste Anhaltswerte experimentell bestimmen. Laterale und Tiefenauflösung sind hierbei aufgrund unterschiedlicher Auswerteverfahren getrennt zu beurteilen.

5.1.1 Laterale Auflösung

Durch die Verwendung niedriger Frequenzen von 50 - 250kHz und die aus praktischen und technischen Gründen geringen Schwingerdurchmesser um 4cm kann sich im Baustoff Beton kein Ultraschallnahfeld mit Richtcharakteristik ausbilden (vgl. KAP. 2), der Ultraschall breitet sich also in konzentrischen Kugelwellen um den Sender herum aus. Bereits durch diese zunächst rein geometrische Divergenz (Strahlöffnung) nimmt die auf eine gleichbleibende Fläche treffende Schalleistungsdichte I (Intensität) mit $1/r^2$ ab (s. KAP. 2.1). Zusätzlich wird die Schallwelle auf ihrer gesamten Laufstrecke vielfach an den Inhomogenitäten des Betons gestreut und im Werkstoff absorbiert (s. KAP. 2.2). Daher wird sich ab einer gewissen *Defekttiefe* das reflektierte Signal nicht mehr signifikant vom Streuanteil unterscheiden und ist somit nicht mehr auflösbar.

In stark schallschwächenden Medien (wie Beton) sind die Materialeigenschaften der wesentliche Parameter, der das Auflösungsvermögen beeinflusst. Intensität und Frequenzband des Streuanteils hängen wesentlich von der Größe und Art der Streuzentren ab. Wesentlich zu berücksichtigende Parameter am Baustoff Beton sind daher das *Größtkorn* des verwendeten Zuschlags, dessen Kornform (Kies oder Splitt) sowie der Luftporengehalt.

Unterschiedliche Druckfestigkeiten baustellenüblicher Normalbetone (B25 bis B45) üben dagegen keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis einer Ultraschallecho-Prüfung aus.

Nachfolgend werden Messungen im B-Bild an zwei geometrisch gleichen Probekörpern mit je 3 flächigen Fehlstellen unterschiedlicher lateraler Ausdehnung (2, 4 und 6cm; vgl. BILD 5.1.i und 5.1.ii) vorgestellt. Die Probekörper unterscheiden sich lediglich im Größtkorn des verwendeten Zuschlags (Regelsieblinien A/B16 bzw. A/B32, Zuschlagart: Sand/Kies). Durch die maschinelle Verdichtung auf dem Rütteltisch lag der Luftporengehalt bei 2%. Beide Probekörper wurden jeweils von zwei Seiten geprüft, so dass die Fehlstellen in einer Tiefe $d_1 = 10\text{cm}$ bzw. $d_2 = 20\text{cm}$ lagen. Bei allen Messungen beträgt die Ausdehnung der Fehlstellen senkrecht zur Prüfrichtung 10cm. Die Flächen der Defekte betragen demzufolge $2 \times 10\text{cm}^2$, $4 \times 10\text{cm}^2$ und $6 \times 10\text{cm}^2$. Eine Überlegung zur Korrelation des Auflösungsvermögens mit der gesamten Defektfläche und -geometrie folgt unten.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen die B-Bilder in Bild 5.1. In Tiefe $d_1 = 10\text{cm}$ konnten alle Fehlstellen bei beiden Probekörpern klar geortet werden (BILD 5.1 iii und v). In der Tiefe $d_2 = 20\text{cm}$ sind beim Probekörper A/B16 nur noch die beiden größeren (BILD 5.1 iv), beim Probekörper A/B32 nur noch die größte Fehlstelle ortbar (BILD 5.1 vi) Aus diesen Messungen kann man eine vereinfachte, empirische Formel des hier erreichten lateralen Auflösungsvermögens $R_{l, \text{spez}}$ für das verwendete Prüfsystem angeben:

$$R_{l, \text{spez}} \geq \text{Größtkorn [cm]} \cdot \frac{d [\text{cm}]}{10\text{cm}} \quad \text{FORMEL \{5.1\}}$$

mit:

- $R_{l, \text{spez}}$: spezifisches laterales Auflösungsvermögen (in cm)
- *Größtkorn*: größter verbauter Korndurchmesser (gerundet in cm)
- d : Defekttiefe = einfacher Abstand zw. Oberfläche und Defekt (in cm, >5 cm)

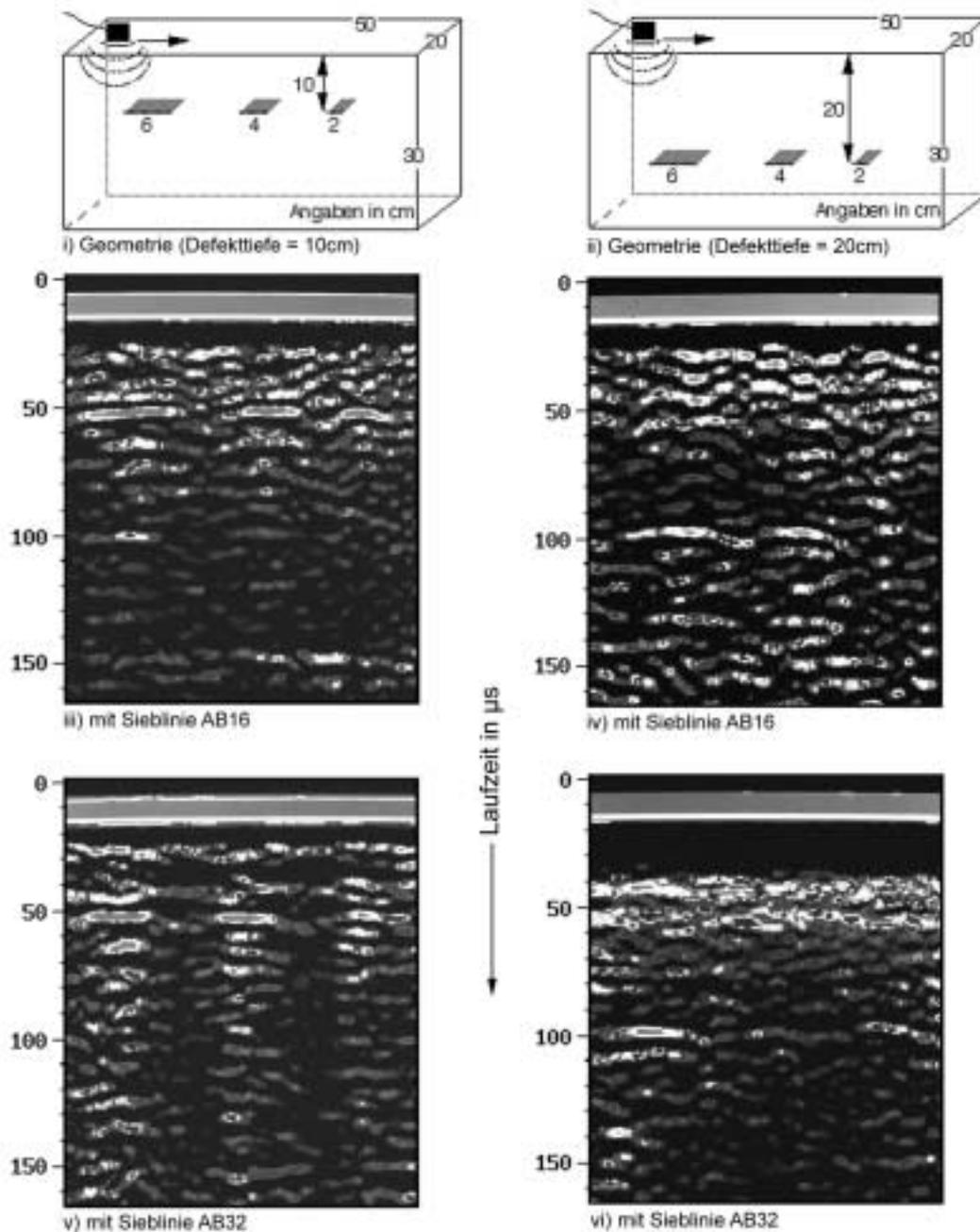


BILD 5.1: B-Bilder zur Bestimmung des lateralen Auflösungsvermögens

$R_{l, \text{spez}}$ darf jedoch nur als Anhaltswert für diese Prüfeinrichtung, für die untersuchte Zuschlagsart und die untersuchte, flächige Fehlstellenart gewertet werden. Die empirische Formel gilt insbesondere nicht für den oberflächennahen Bereich bis 5cm Tiefe, da hier die Prüfkopftzeit keine Messung ermöglicht (s. KAP. 3.3). Weitere Untersuchungen auch an anderen Probekör-

pern haben indes gezeigt, dass diese Abschätzung gute Anhaltswerte liefert.

Ein Defekt kann in der Regel frühestens dann erfasst werden, wenn seine mittlere Projektionsfläche parallel zum Prüfkopf in mindestens einer Dimension $R_{l, \text{spez}}$ überschreitet. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Lage und Form der Fehlstelle wesentlich die Darstellung des Defektes im B-Bilder beeinflussen. Vorwiegend parallel zur Oberfläche liegende Defekte sind durch ein direktes Defektecho zu orten, während schräg angeordnete Defekte sich eher durch einen Verlust des Rückwandechos zeigen. Eine interessante Zwischenstufe ist die Ortung sphärischer Defekte wie die eines Spannkanales (s. KAP. 5.2). TAB. 5.1 zeigt Anhaltswerte des experimentell bestimmten Auflösungsvermögens für einen zur Wellenausbreitung orthogonalen, ebenen Reflektor.

Tiefe in cm	$R_{l, \text{spez}}$ in cm x cm	$R_{l, \text{spez}}$ in cm x cm
	bei Zuschlag AB16	bei Zuschlag AB32
10	2 x 2	3 x 3
20	4 x 4	6 x 6
30	6 x 6	9 x 9
40	8 x 8	12 x 12
50	10 x 10	15 x 15
70	14 x 14	21 x 21

TAB. 5.1: Laterales Auflösungsvermögen aus FORMEL {5.1} für Zuschlagsieblinien A/B16 und A/B32

5.1.2 Tiefenauflösung

Eine Tiefenauflösung kann nur dann sinnvoll beschrieben werden, wenn bei einer Messung ein direktes Echo eines Defektes oder der Rückwand auftritt. Ausgeklammert werden in dieser Betrachtung die Messfehler, die durch von der Eichung lokal abweichende Schallgeschwindigkeiten im Beton oder Schwierigkeiten in der Ankopplung entstehen.

Die Messung der Tiefe / Laufzeit eines Echos erfolgt hier durch die Bestimmung der Impulsflanke im A-Bild. Dieses Verfahren ist einer Bestimmung im B-Bild vorzuziehen, da durch die Bildaufbereitung die Impulsflanke je nach ihrer (zufälligen) Phasenlage oft nicht genau erkannt werden kann. Das Prüfsystem stellt daher für dieses Vorgehen beide Darstellungen auf einem Bildschirm online zur Verfügung. Die Form des Echsignals im A-Bild wird dabei wesentlich durch die erforderliche Tiefpassfilterung bestimmt; Dispersionseffekte können für alle praktischen Anwendungen vernachlässigt werden. Die Tiefenauflösung lässt sich daher in guter Näherung als Funktion der eingesetzten (Filter-) Maximalfrequenzen beschreiben. Experimentell setzt man als Auflösung die in Weg umgerechnete Laufzeit der ersten Impulsflanke zwischen 10 und 90% ihrer Intensität an (entsprechend ca. 1/4 der empfangenen Impulswellenlänge). Da das Messsignal wesentlich durch das vorgeschaltete Tiefpassfilter beeinflusst wird, erhält man eine theoretische Untergrenze für die Tiefenauflösung $R_{d, spez}$ die durch das eingesetzte Filter bestimmt ist. Sie berechnet sich daher zu

$$R_{d, spez} \geq k \frac{v_{BETON} \frac{cm}{s}}{4 f_{TP}} \quad \text{FORMEL \{5.2\}}$$

mit:

- $R_{d, spez}$: spezifische Tiefenauflösung (in cm)
- v_{BETON} : Schallgeschwindigkeit im Probekörper (in cm/s)
- f_{TP} : Grenzfrequenz des Tiefpassfilters (in Hz)
- k : empirischer Korrekturfaktor (ohne Korrektur $k = 1$)

Der Korrekturfaktor k wurde nach überprüfenden praktischen Messungen hinzugefügt, um den Formelausdruck den gemessenen Werten anzupassen, die durch die Ablesegenauigkeit und Rauschen beeinträchtigt werden. Experimentell findet man für k Werte zwischen 1,5 und 2. Bei Verwendung des Filters 100kHz liegt folglich die errechnete Tiefenauflösung ($k = 1,5$, $v_{US, BETON} \approx$

4000m/s) bei 1,5cm. Zur Erreichung einer maximalen Genauigkeit sollten zusätzlich für jede neue Prüfanordnung (Prüfkopf / Geräteeinstellung) Vor- und Elektroniklaufzeiten (i.d.R. $t_{\text{VORLAUF}} \leq 1\mu\text{s}$) berücksichtigt werden (Kallibrationstabelle).

BILD 5.2 veranschaulicht das Auflösungsvermögen im Beispiel eines B-Bildes an einem stufenförmigen Probekörper.

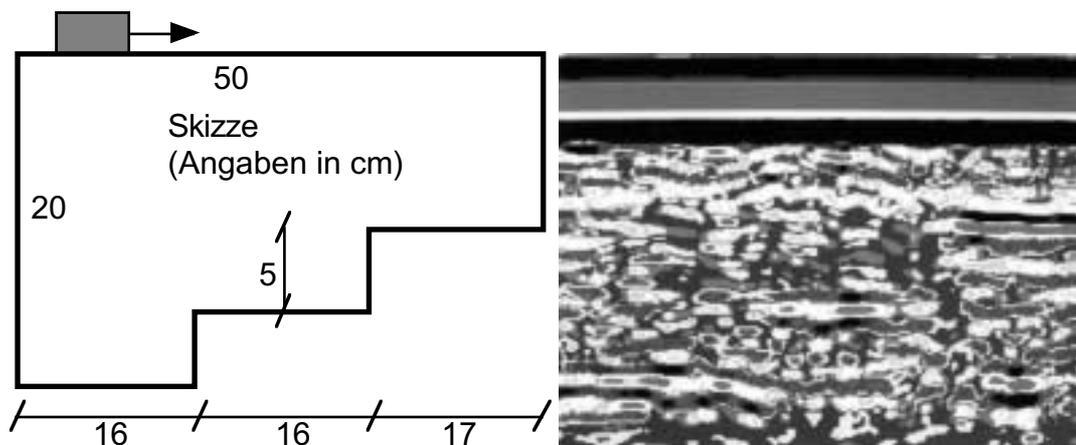


BILD 5.2: Skizze (l.) und B-Bild (r.) eines stufenförmigen Probekörpers mit Zuschlag A/B16

5.2 Untersuchungen an praxisnahen Labor-Probekörpern

Bundesweit arbeiten in der Zeit, als diese Arbeit entstand, eine Reihe von Forschungseinrichtungen und Unternehmen an der Weiterentwicklung von Echo-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Beton. Da z.T. recht unterschiedliche physikalische und elektronische Mess- und Auswerteverfahren zum Einsatz kommen, weisen die verschiedenen Verfahren jeweils systembedingte Vorteile, allerdings auch Einschränkungen auf. In der Absicht, diese Verfahren einem praxisnahen Vergleichstest zu unterziehen, erfolgte im Jahr 1994 die Gründung einer bundesweiten "Nutzergruppe Betonprüfung". In den 9 beteiligten Gruppen kamen neben verschiedenen Ultraschallecho-Verfahren auch Impaktech- und Radarverfahren sowie Simulationsrechnungen zur Anwendung.

Seinerzeit wurde gemeinsam von allen Beteiligten (s. [KRIEGER 1998]) beschlossen, in einer ersten Versuchsreihe vergleichende Messungen mit definierten Prüfaufgaben an zwei Probekörpern der Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung in Berlin (i.F. BAM) durchzuführen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Projektes sowie eine Übersicht über die Resultate dieser Messreihe (s. KAP. 5.2.1) finden sich in [KRAUSE1995]. Ebenso wird dort auf die konstruktiven und betontechnologischen Spezifikationen der Probekörper genauer eingegangen.

Nach Abschluss dieser ersten Versuchsreihe wurde von allen Beteiligten 1996 ein Folgeprojekt mit Förderung der Bundesanstalt für Straßenwesen (i.F. BAST) erarbeitet (s. KAP. 5.2.2). Die Prüfziele wurden hierbei entsprechend der in der ersten Versuchsreihe gemachten Erfahrungen präzisiert und ausgeweitet (s.u.). Insbesondere sollten die Prüfergebnisse im "Blindversuch", d.h. ohne Vorangaben, erzielt werden. Zudem wurden die zwei zu untersuchenden Probekörper praxisnäher und somit für die Prüfung anspruchsvoller gestaltet. Die genauen Details hierzu sowie die Ergebnisse aller beteiligten Gruppen können dem Bericht "Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken" [KRIEGER1998] der BAST entnommen werden.

Die wesentlichen Prüfziele der ersten Untersuchungsreihe waren:

- Bestimmung der Wanddicke der Probekörper
- Ortung und Tiefenbestimmung eines Spannkanals (von beiden Seiten)
- Untersuchung des Spannkanals auf Verpressmängel.

In der zweiten Untersuchungsreihe sollte zusätzlich untersucht werden:

- Ortung von Hohlstellen
- Ortung von Kiesnestern.

Die Mitwirkung des Autors an diesen beiden Programmen ergab sich zwangsläufig auch aus der Zielsetzung dieser Arbeit. In beiden Programmen

bot sich die Möglichkeit, das Prüfsystem hinsichtlich seiner Aussagefähigkeit weitergehend an sehr praxisnah konstruierten Probekörpern zu kontrollieren. Über die Untersuchungen und Ergebnisse wird in den nachfolgenden Abschnitten berichtet.

5.2.1 Untersuchungen an Probekörpern der Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung in Berlin

Die Untersuchung erfolgte an zwei zu diesem Zweck an der BAM hergestellten Beton-Probekörpern **BAM1** und **BAM2** jeweils gleicher Abmessung von 2 x 1,5 x 0,5 m³. Die Probekörper unterschieden sich lediglich in der verwendeten Zuschlag-Sieblinie (A/B8 bzw. A/B32, beide B35 aus CEMIII/A 32,5). Zur Erweiterung der Untersuchungsmöglichkeiten waren die Probekörper zudem unsymmetrisch aufgebaut:

- Vorderseite A: geschalte, glatte Oberfläche, Tiefe des Spannkanals ca. 10cm (Ø = 85mm)

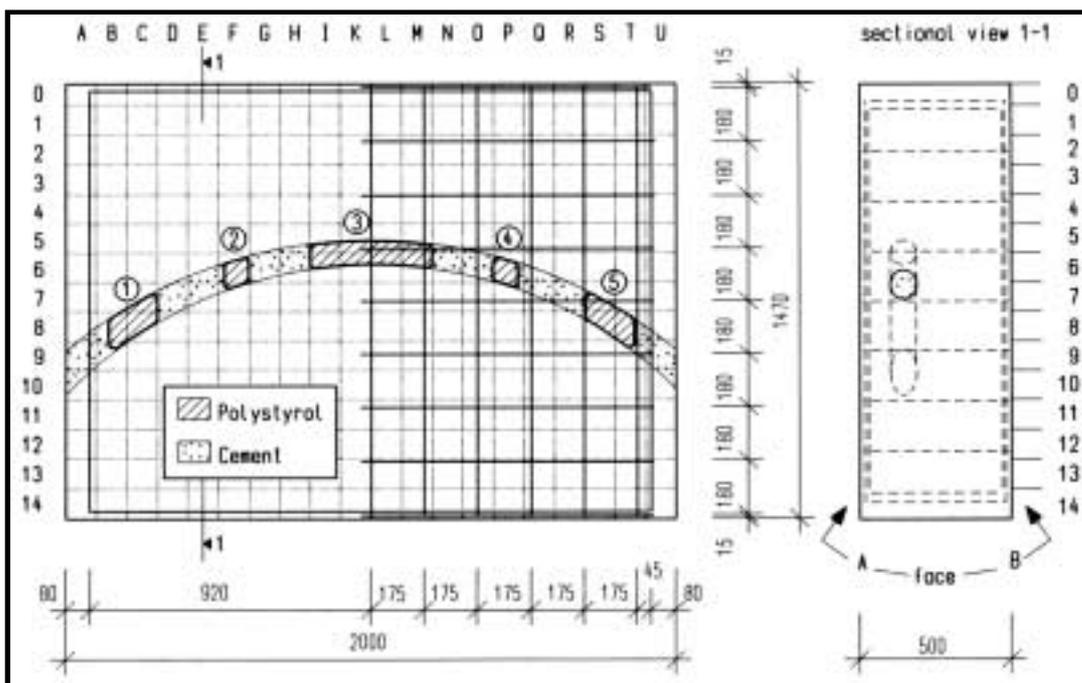


BILD 5.3: Konstruktionsskizze des BAM-Probekörpers, rauhe Seite (aus [KRAUSE1995])

- Rückseite B: abgezogene, rauhe Oberfläche
Tiefe des Spannkanals ca. 32cm
- (Linke) Hälfte 1: ohne Bewehrung
(Rechte) Hälfte 2: schlaaffe Bewehrung (Maschenweite 180mm)
- Simulierte Verpressmängel im Spannkanal (Schaumstoff) (s. BILD 5.3)

Die Details sind der Konstruktionsskizze BILD 5.3 zu entnehmen. Für die Untersuchungen standen effektiv 2 Arbeitstage zur Verfügung.

5.2.1.1 Bestimmung der Wanddicke

An beiden Probekörpern sollte die Wanddicke von 500mm an zwei vorgegebenen Positionen **D1** und **D2** (Angaben s. BILD 5.6) mittels Ultraschallecho-Verfahren bestimmt werden. Hierzu wurde zunächst die Ultraschallgeschwindigkeit im Prüfbeton separat in Durchschallung ermittelt (**D1**: $v_D = 4240 \pm 50\text{m/s}$; **D2**: $v_D = 4290 \pm 50\text{m/s}$). Das Prüfsystem ermöglicht diese Messung durch einfaches Umschalten zwischen den Betriebsmodi IE (Impuls-Echo) und D (Durchschallung). Da Anregungsimpulslänge und -form, die eingesetzten Prüfköpfe und auch die wesentlichen Systemeinstellungen der Empfangseinheit in beiden Modi unverändert bleiben, wird eine hohe Messgenauigkeit erzielt.

Probekörper **BAM1** (Zuschlag A/B8) zeigte bei Echo-Betrieb ein klares Rückwandecho bei einer Laufzeit von $239 \pm 0,5\mu\text{s}$ (Pos. **D1**) bzw. $238 \pm 0,5\mu\text{s}$ (Pos. **D2**), woraus sich die mittlere Wanddicke der Probe zu $d_{IE} = 509\text{mm}$ bei einer Tiefenauflösung von 15mm (s. KAP. 5.1) bestimmen ließ. Am Probekörper **BAM2** (Zuschlag A/B32) konnte insbesondere an den vorgegebenen Positionen kein signifikantes Rückwandecho detektiert werden. Da die größten Abmessungen der Streuzentren (Zuschlag-Größtkorn 32mm) hier bereits deutlich im Bereich der verwendeten Ultraschallwellenlängen (20-80mm) liegen, ergeben sich über den langen Schallweg von $l_{IE} = 1\text{m}$ stark auflaufende Streu- und Absorptionseffekte, die eine Bestimmung der Wanddicke sehr erschweren. An zusätzlich geprüften, anderen Positionen konnten zwar Andeutungen eines Rückwandechos gefunden werden, die jedoch als nicht hinreichend

signifikant verworfen werden mussten. Versuchsweise wurde zusätzlich ein ähnlicher Probekörper (Sieblinie A/B16, Wanddicke = 700mm) durchschallt, bei dem die Detektion des Rückwandechos im B-Bild möglich blieb.

5.2.1.2 Ortung des Spannkanals

Die Untersuchungen des Spannkanals wurden auf den Probekörper **BAM1** beschränkt. Hier konnte der Spannkanal (teilweise verfülltes Stahlhüllrohr) von der glatten Oberfläche klar in seiner lateralen Position an 16 Positionen durch B-Bilder geortet werden. BILD 5.4 zeigt beispielhaft das Erscheinungsbild des Hüllrohres im B-Bild an einer nicht bewehrten Stelle. Die B-Bild-Darstellung erwies sich bei dieser Prüfaufgabe als sehr vorteilhaft, weil bereits kleine Abweichungen der Laufzeit oder von Intensität und Phasenlage des Empfangssignals von unterschiedlichen Positionen deutlich auf dem Bildschirm hervortreten. Insbesondere erzeugt die sphärische Geometrie des Hüllrohres lediglich einen sehr kleinen Bereich minimaler Laufzeit und maximaler Intensität im B-Bild, wodurch die laterale Position bei dieser Messung auf ca. $\pm 5\text{mm}$ bestimmt werden konnte. Ebenso erhält man einen groben Eindruck von der Geometrie des Hüllrohres, welche allerdings durch das Schallausbreitungsverhalten hyperbolisch verzerrt erscheint. Nachdem die laterale Position durch B-Bilder hinreichend bestimmt wurde, konnten die Werte für die Laufzeit des Echosignals wie in KAP. 5.1 beschrieben aus den zugehörigen A-Bildern bestimmt werden. Mit der zuvor durch die Durchschallungsmessungen an den Pos. **D1** bis **D3** (s. BILD 5.6) festgelegten, mittleren Ultraschallgeschwindigkeit von $v_{\text{US,D}} =$

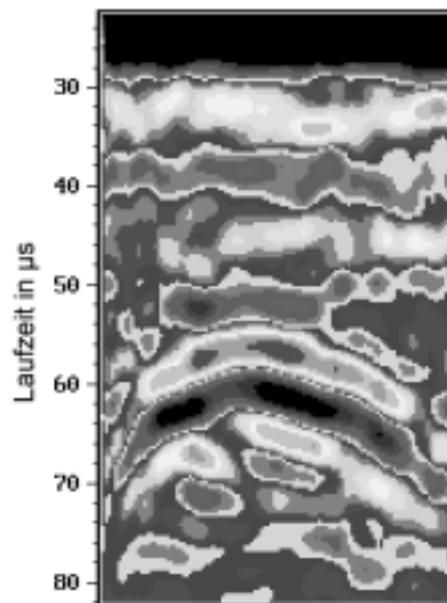


BILD 5.4: B-Bild des Hüllrohres in Probekörper BAM1 (unbewehrte Seite)

4260 ± 50m ergaben sich die in BILD 5.6 (Sektoren A-K) bezeichneten Tiefen für den Spannkanal mit einer Messungengenauigkeit von 15mm. Diese maximale Messungengenauigkeit resultiert aus dem für $R_{D, \text{spez}}$ bei der hier verwendeten Tiefpassfilterung mit $f_{\text{TP}} = 100\text{kHz}$ (vgl. KAP. 5.1) erhaltenen, prinzipiellen Wert, der die sonstigen Fehler (z.B. durch Ablesung, rechnerischer Fehler) weit überschreitet ("worst case").

In den Sektoren L-M des Probekörpers **BAM1** war zudem schlaffe Bewehrung mit einer Maschenweite von 18cm verbaut (s. BILD 5.3). Zur Vereinfachung der Ultraschall-Ortung des Spannkanals in diesem Bereich war es sinnvoll, mittels eines Bewehrungssuchers zunächst die oberflächennahen Stäbe zu lokalisieren. Da Ortungen direkt oberhalb eines Bewehrungsstabes i.d.R. nicht möglich sind, wurde die Tiefe des Spannkanals zwischen den Maschen bestimmt. Trotz teilweise massiver Interferenzen ließ sich durch die feinen, relativen Veränderungen des Signals Rückschluss auf dessen Position ziehen (s. BILD 5.5). Da gerade die Darstellung im B-

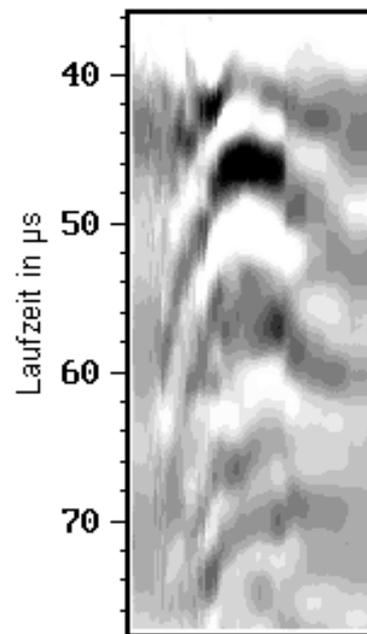


BILD 5.5: B-Bild des Hüllrohres in Pr.k. BAM1 (bewehrte Seite)

Bild feinste Änderungen von Intensität und Phase des Echosignals verdeutlicht, erwies sich diese Datenaufbereitung hier als sehr hilfreich. Insbesondere konnte aus dieser Prüfung folgende, wichtige Erfahrung gewonnen werden. Die Interpretation von A-Bildern obliegt i.d.R. der spezifischen Erfahrung des Prüfers. In Grenzfällen entscheidet somit die Subjektivität des Prüfers. Führt man jedoch, unter Beachtung z.B. möglichst konstanter Ankopplungsbedingungen, einen B-Scan gleichmäßig und unbeachtet der aktuellen Anzeige im A-Bild (Oszilloskop) durch, können Strukturen identifiziert werden, die zuvor nicht erkennbar waren. Die Online-Visualisierung im B-Scan ermöglicht damit z.B. Ortungen von Konstruktionselementen direkt vor Ort. Für eine Erweiterung dieses Verfahrens bieten sich ebenfalls rechnergestützte Verfahren

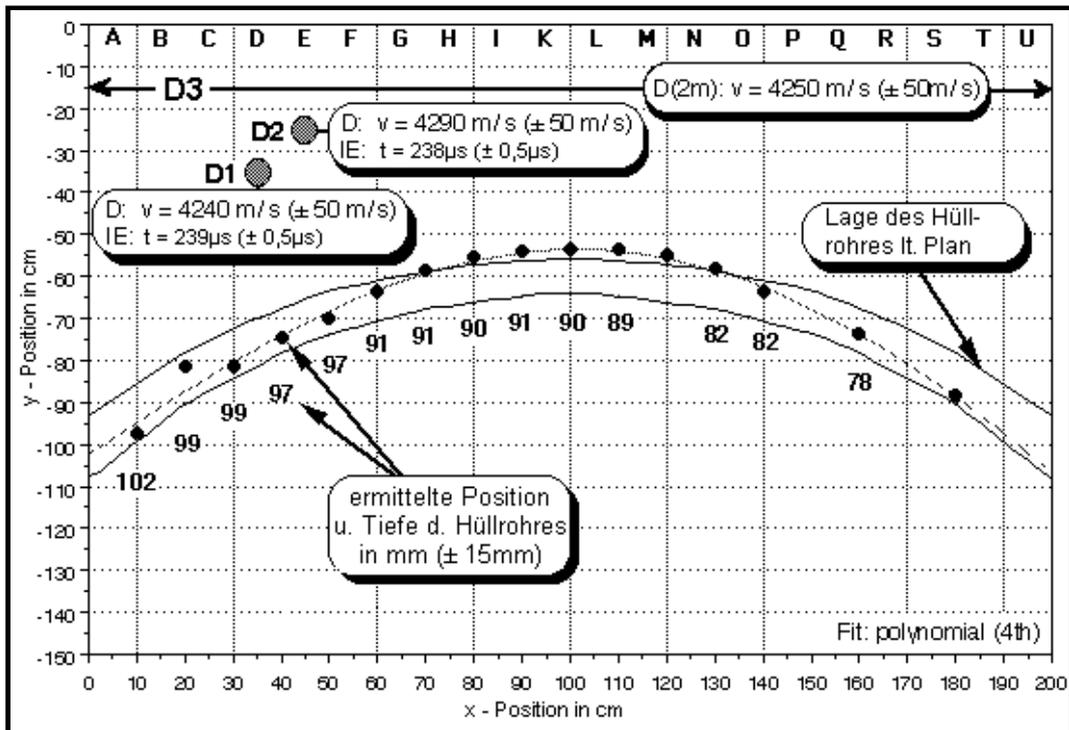


BILD 5.6: Zusammenfassung der Ergebnisse für Probekörper BAM1, glatte Seite

an (z.B. SAFT, [SCHICKERT1995]). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse mit Angaben zur Tiefenlage des Spankanals zeigt BILD 5.6.

Die erkennbare Lage des Spankanals weicht deutlich von der vorgesehenen Konstruktionsplanung ab. Sowohl die stärkere Krümmung als auch der Versatz in der Tiefe von 102mm bis 78mm konnte nachgewiesen werden.

Zur Beurteilung einer Ortung des Spankanals von der anderen, rauhen Seite (Tiefenlage des Spankanals $d \approx 32\text{cm}$) sind einige Vorüberlegungen erforderlich. Es muss berücksichtigt werden, dass sich über den dann deutlich längeren Schallweg weitere Effekte aufaddieren, die die Signifi-

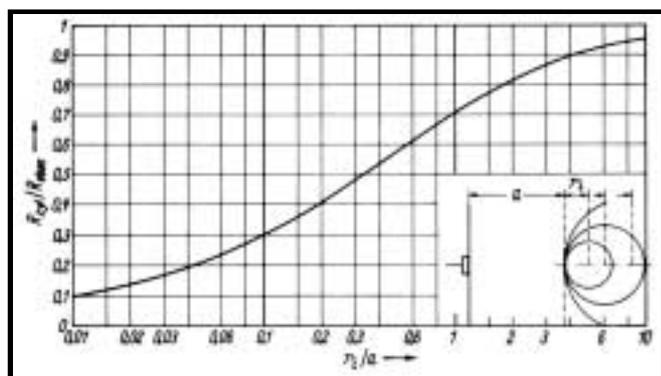


BILD 5.7: Verhältnis der Reflexionsfaktoren $R_{\text{Zyl}}/R_{\text{Eben}}$ von zylindrischem zu ebenem Reflektor für einfallende Kugelwelle (aus: [KRAUTKRÄMER 1986])

kanz eines Echossignals z.T. erheblich reduzieren. Neben der immer auftretenden Schallschwächung aufgrund von Strahlöffnung, Streuung und Absorption bewirkt die Form des Spannkans als zylindrischer Reflektor eine Zerstreuung des reflektierten Signals, wobei zusätzliche Oberflächeneffekte durch die Riffelung des Stahlhüllrohres noch nicht berücksichtigt sind. BILD 5.7 (nach [KRAUTKRÄMER1986]) liefert eine Abschätzung für einen idealen Zylinderreflektor.

Eine weitere Abschwächung des Gesamtsignals von -10db kann der Erfahrung nach für die hier vorliegende, sehr raue Oberfläche angenommen werden. TAB. 5.2 fasst die schallschwächenden Einflüsse näherungsweise zusammen. Hierbei wurde das reflektierte Signal am Hüllrohr von der glatten Seite ($d \approx 10\text{cm}$) willkürlich zu 100% gesetzt. Demgegenüber ergibt sich für einen Ortungsversuch von der rauhen Seite eine Reflexion von unter 2% (-35db) der von der glatten Seite erhaltenen Reflex-Amplitude des Spannkans.

Schallschwächender Effekt	Berechnung nach	RSPK, d = 10cm	RSPK, d = 32cm	RSPK, d = 32cm in db
Strahlöffnung	{2.23}: $p \cdot 1/d$	100%	32%	-10 db
Streu. & Abspt. (A/B8, $= 50\text{db/m}$)	{2.24}: $p \cdot \exp(-d)$	100%	28%	-11 db
Zylindrischer Reflektor	BILD 5.7	100%	ca. 65%	-4 db
Rauhe Oberfläche	Erfahrungswert	100%	32%	-10 db
Reflexion R gesamt:		100%	<2%	-35 db

TAB. 5.2: Vergleich der Reflexionsfaktoren R für das Echo des Spannkans von der glatten (d=10cm) bzw. rauhen (d=32cm) Seite des Probekörpers BAM1

Dennoch wurden Ortungsversuche auch von der rauhen Seite im unbewehrten Bereich K - A des Probekörpers BAM1 unternommen. Aus dem nunmehr (von der glatten Seite) bekannten Verlauf konnten die Prüfbereiche präzise vorbestimmt werden. Um einen ausreichenden Energieübertrag zum Beton zu gewährleisten, wurde die Oberfläche durch Glätten mit einem Bandschleifer und Aufbringen einer Schicht aus Schnellzement (Dicke ca. 3mm) vorbehandelt. Hierbei ergab sich das Problem, dass die Schicht aus Schnellzement, trotz vorherigen Wässerns der Betons, an mehreren Stellen nach kurzer Zeit zur Ablösung neigte. An einer Stelle (I5-6, s. BILD 5.8) konnte der Spann-

kanal allein im B-Bild erfolgreich in einer Tiefe von $d = 360 \pm 20\text{mm}$ geortet werden (BILD 5.9). Die Bestimmung der Tiefe musste hier erstmals im B-Bild erfolgen, da eine Echoflanke im A-Bild nicht mehr signifikant identifiziert werden konnte; die Messgenauigkeit liegt hier daher bei $\pm 20\text{mm}$. Die Abweichung vom rechnerischen Wert $d = 329 \pm 15\text{mm}$ ($d_{\text{glatte Seite}} = 91\text{mm}$ zzgl. $d_{\text{Hüllrohr}} = 80\text{mm}$) kann durch die Zunahme der Schalllaufzeit aufgrund von Dispersionseffekten im Werkstoff sowie durch die erhöhte Vorlaufzeit in der Schnellzement-Koppelschicht hinlänglich erklärt werden. Weiterhin stimmen beide Werte im Rahmen der Fehlergrenzen überein.

5.2.1.3 Ermittlung des Verfüllzustandes des Spannkanals

Eine weitere Prüfaufgabe bestand in der Ermittlung des Verfüllzustandes des nur teilweise verpressten Spanngliedes. Die unverpressten Bereiche (s. BILD 5.8) wurden in den Probekörpern durch das Einbringen von Polystyrolkörpern realisiert.

Aus KAP.2.2 können die Reflexionsfaktoren bei verpresstem bzw. nicht verpresstem Hüllrohr anhand der Übergänge an den Grenzflächen theoretisch abgeschätzt werden. In beiden Fällen trifft der Schallimpuls zunächst auf die

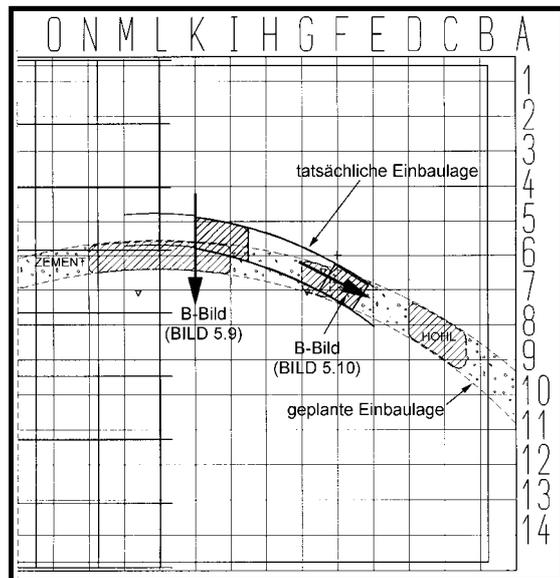


BILD 5.8: Skizze zur Ortung von der rauhen Seite und zur Ermittlung des Verfüllzustandes

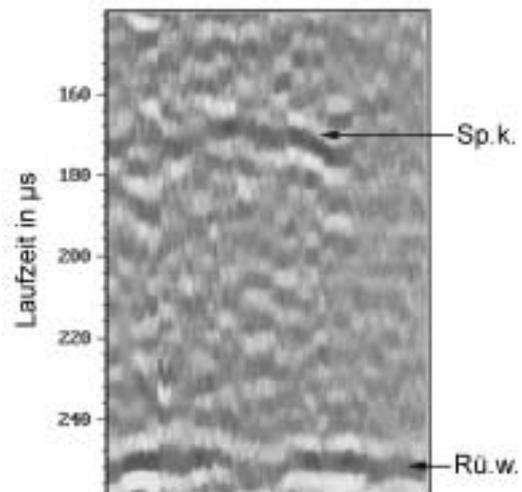


BILD 5.9: B-Bild des Hüllrohres in Pr.k. BAM1 von der rauhen Seite

Grenzfläche Beton – Stahl und wird dort mit $R_{\text{Beton/ Stahl}} \approx 66\%$ reflektiert (hier ohne Berücksichtigung von Geometrieeffekten). Der durchgehende Schallanteil trifft dann bei verpresstem Hüllrohr auf die Grenzfläche Stahl – Zementstein bzw. bei unverpresstem Hüllrohr auf die Grenzfläche Stahl – Luft.

Mit den in TAB. 2.2 angegebenen Schallimpedanzen Z ergeben sich die Reflexionsfaktoren für

- verpresstes Hüllrohr: $R_{\text{Stahl/ Zementstein}} \approx 73\%$
- nicht verpresstes Hüllrohr: $R_{\text{Stahl/ Luft}} \approx 99,999\%$

Die im idealen rechnerischen Fall wird folglich an verpressten Abschnitten die Amplitudenhöhe eines Echosignals ca. 27% geringer als an nicht verpressten erwartet. Dieses entspricht einer Änderung um knapp 3db. Schwankungen dieser Größenordnung treten selbst bei idealen Ankopplungsbedingungen für den Ultraschallprüfkopf schon durch geringfügige Variation des Anpressdruckes auf.

Dennoch wurde versucht, ein B-Bild möglichst exakt über dem zuvor gemessenen Verlauf des Hüllrohres durchzuführen und aus den ggf. auftretenden Intensitätsschwankungen Rückschlüsse auf den Verfüllzustand zu ziehen (BILD 5.10). Wie erwartet führte dieses Vorgehen zu keinen auswertbaren Resultaten, da es unmöglich war, den Prüfkopf stets völlig exakt über dem Hüllrohr

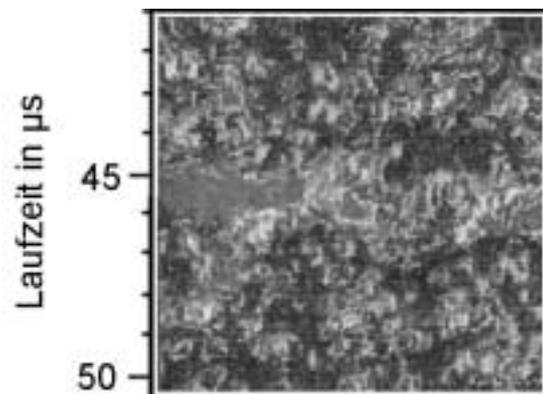


BILD 5.10: Versuch, den Verfüllzustand des Hüllrohres im B-Bild zu ermitteln

bei konstanter Ankopplung zu führen. Die daraus resultierenden, zufälligen Schwankungen im B-Bild ließen keine Auswertung bzgl. der Fragestellung zu. Paradoxerweise erschien es sogar so, dass aus dem verfüllten Bereich höhere Amplituden empfangen wurden. Da eine vollständig gleichmäßige An-

kopplung bei diesem Verfahren nicht sichergestellt werden kann, scheint eine Überprüfung von Verpressmängeln mit dem verwendeten Prüfverfahren allein durch Auswertung der Reflex-Amplitude prinzipiell nicht möglich. Für künftige Messungen unter Hinzunahme zusätzlicher Parameter (z.B. der Signalfrequenz vor der Filterung) besteht hier noch deutlicher Forschungsbedarf.

5.2.2 Untersuchungen an Probekörpern der Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch-Gladbach

Die Untersuchungen der zweiten Versuchsreihe fanden an den Probekörpern **BASt1** und **BASt2** mit den Abmessungen 2 x 1,5 x 0,7 m³ statt. Die Probekörper unterschieden sich im Wesentlichen in der verwendeten Zuschlag-Sieblinie (A/B16 bzw. A/B32, beide B45 aus CEMIII/A 42,5) sowie durch Bereiche unterschiedlicher starker schlaffer Bewehrung (ein- und zweilagig). BILD 5.11 zeigt den Bewehrungskorb, BILD 5.12 eine Realansicht des Probekörpers

BASt1. In beiden Probekörpern wurden je zwei teilweise verpresste Hüllrohre mit unbekannter Lage sowie simulierte Fehlstellen (Polystyrol-Körper, Kiesnester) mit ebenfalls unbekannter Lage, Form und Anzahl verbaut („Blindversuch“). An diesen Probekörpern konnte folgenden Fragestellungen nachgegangen werden:

- Ortung von Spanngliedern,
- Lokalisierung von Verpressfehlern,
- Ortung von Fehlstellen.

Die Prüfung erfolgte vorrangig



BILD 5.11: Bewehrungskorb des Pr.k. BASt1

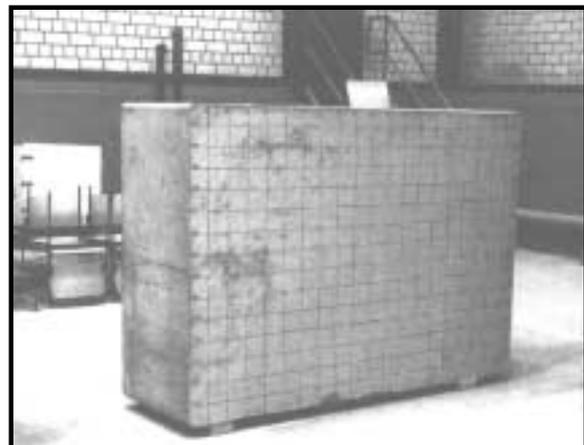


BILD 5.12: Probekörper BASt1

5.2.2.1 Bestimmung der Wanddicke

Vor Beginn der eigentlichen Prüftätigkeit war es nötig, sich vor Ort eine genaue Vorstellung über die Beschaffenheit der Probekörper und der potentiell aussichtsreichen Prüfziele zu verschaffen. Zur Orientierung wurde in Abweichung zur vorgegebenen Prioritätenliste zunächst beschlossen, an beiden Probekörpern die Dicke mittels Ultraschallecho-Ortung zu bestimmen. Dieses erschien zur Abschätzung des Leistungsvermögens der Prüfeinrichtung sinnvoll, da die vorausgehenden Prüfreihen an Probekörpern der BAM (s. KAP. 5.2.1) gezeigt hatten, daß eine Rückwandortung an dem dort 50cm dicken Probekörper mit einem Zuschlaggrößtkorn von 8mm gut möglich war, bei einem Zuschlaggrößtkorn von 32mm hingegen versagte. Bei den von der BAST gestellten Probekörpern mit einer Dicke von 70cm bei einem Zuschlaggrößtkorn von 16mm war es somit offen, ob eine Rückwandortung ggf. auch im Bereich starker Schlabfbewehrung noch möglich sei.

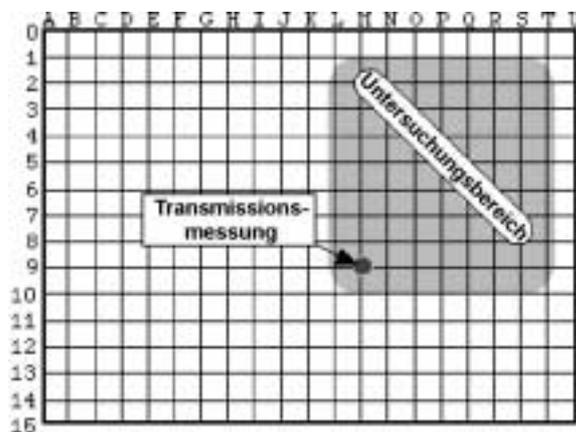


BILD 5.14: Aufteilung des Probekörper BAST1 in Prüfbereiche, glatte Seite; rauhe Seite: y-Achse 100 bis 115

Zur Überprüfung wurde an beiden Probekörpern an geeigneten Stellen (BILD 5.14) zunächst die Schallgeschwindigkeit in Transmission bestimmt und anschließend aus der Laufzeitmessung in Echo-Betrieb auf die Bauteildicke zurückgerechnet. In Transmission wurden folgende Schallgeschwindigkeiten ermittelt (d = 70cm, Koppelmittel Glyzerin):

- Pr.k. **BAST1** Stelle M9 M109: $t_D = 159,2 \pm 1 \mu\text{s}$ $v = 4395 \pm 50 \text{ m/s}$
- Pr.k. **BAST2** Stelle Q11 Q111: $t_D = 155,2 \pm 1 \mu\text{s}$ $v = 4510 \pm 50 \text{ m/s}$

Die Laufzeiten in Echo-Betrieb wurden an den genannten und weiteren Stel-

len ermittelt und ergaben:

- Pr.k. **BASt1** Stelle M9: $t_{IE} = 317 \pm 4 \mu\text{s}$ $d = 697 \pm 15 \text{ mm}$
- Pr.k. **BASt2** Stelle Q11: $t_{IE} = 316 \pm 4 \mu\text{s}$ $v = 713 \pm 15 \text{ mm}$

Am Probekörper **BASt1** war die Bestimmung des Rückwandechos i.d.R. noch gut möglich, am deutlich stärker bewehrten Probekörper **BASt2** nur noch an wenigen Stellen zwischen den Bewehrungsstäben. Die oberflächennahen Bewehrungsstäbe wurden daher im Vorfeld mit einem Bewehrungssucher geortet und auf dem Prüfkörper markiert. Die am Probekörper **BASt2** bestimmte recht hohe Schallgeschwindigkeit wird daher auch auf den höheren Stahlanteil im Schallweg zurückgeführt.

Da an beiden Probekörpern die Bestimmung der Bauteildicke im Echo-Betrieb möglich war, erschien es möglich, auch die Lage und Tiefe der einbetonierten Hüllrohre zumindest in geringer bewehrten Abschnitten zu bestimmen (s. nachf. Abschnitt).

5.2.2.2 Ortung des Spannkanals

Für diese Untersuchung standen vorab bereits die Ergebnisse einer von der BAM durchgeführten Radarmessungen zur Verfügung, aus denen die ungefähren lateralen Positionen der beiden Spannkanäle abgeschätzt werden konnten. Daher wurden die Untersuchungen zunächst auf diese Bereiche beschränkt. Nach den in KAP. 5.1 berichteten Erfahrungen mit der eingesetzten Prüfeinrichtung lag es nahe, sich für die Ortung insbesondere von tieferliegenden Spannkanälen auf die Auswertung der B-Bilder zu konzentrieren, da bei undeutlichen Echosignalen nur der Vergleich von vielen auf dem Messweg liegenden Messpunkten zu einer erkennbaren hyperbolischen Struktur im B-Bild führt. Nach der Ortung des Spannkanals im B-Bild sollte dann die Echoflanke im zugehörigen A-Bild identifiziert und unter Verwendung der in 5.2.2.1 ermittelten Schallgeschwindigkeiten im Beton v_{US} die genaue Tiefenlage der Spannkanäle ermittelt werden.

Entsprechend der vorgegebenen Prioritätenliste wurde nun zunächst versucht, den unteren Spannkanal im Probekörper **BASt1** im unbewehrten Bereich M5-9 T5-9 von der glatt geschalteten Oberfläche zu orten. Da die Tiefenlage der Spannkanäle unbekannt war, erforderte es ca. 4 Stunden, um die passende Einstellung am Gerät durch Probieren zu ermitteln. Je nach Geometrie und Beschaffenheit des Prüfobjekts erweisen sich nur wenige Einstellung der Pulsbreite und insbesondere der Verstärkung / Tiefenanhebung als optimal zur Erstellung eines signifikanten B-Bildes. Interessanterweise wurde auch die Erfahrung gewonnen, daß gerade bei Prüfaufgaben mit undeutlichen Echoreflexen eine Graustufen-Darstellung des B-Bildes vom menschlichen Betrachter erheblich sensibler ausgewertet werden kann als eine Falschfarben-Darstellung. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass dann kleine Intensitätsänderungen durch kontinuierliche Helligkeitsänderungen und nicht durch un stetigen Farbumschlag wiedergegeben werden. Weiterhin dürfte mit steigendem Erfahrungsgewinn an unterschiedlichen Prüfkörpern der z.Z. noch erforderliche Zeitaufwand zur optimalen Gerätejustage weiter sinken.

Beide Spannkanäle (Stahlhüllrohre) im Probekörper **BASt1** konnten daraufhin von der glatten Oberfläche im unbewehrten/schwach bewehrten Bereich in seiner lateralen Position an 10 Positionen durch B-Bilder geortet werden. BILD 5.15 zeigt einen Scan über den gesamten Probekörperquerschnitt mit einem Spannkanal bei einer Laufzeit von ca. 120 μs und dem Rückwandecho bei ca. 340 μs (Pos. P7 des Probekörpers **BASt1**, glatte Seite), BILD 5.16 beispielhaft im Detail

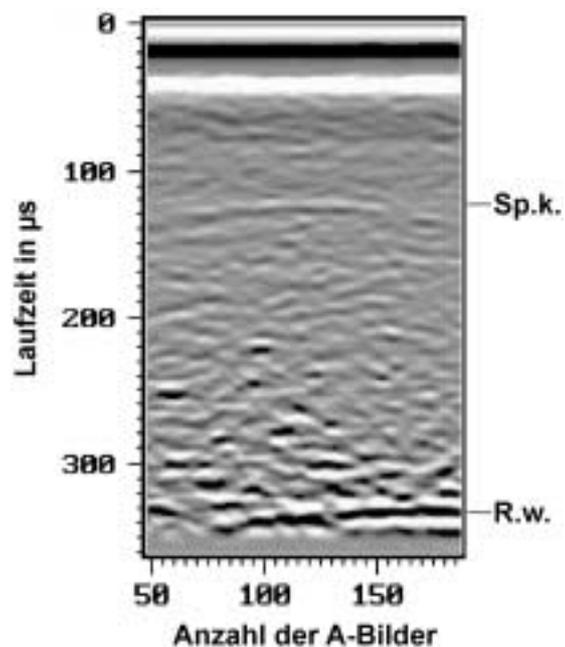


BILD 5.15: B-Bild über den gesamten Querschnitt (Pos. P7 des Pr.k. **BASt1**)

Gruppen überein (s.a. KRIEGER1998).

Im Anschluss wurden die Messungen an der anderen, rauhen Seite des Probekörper **BASt1** wiederholt. Bei einem angenommenen Spannkanaldurchmesser von 80 mm sollte die Tiefe der Hüllrohre dann bei 345 bzw. 378 mm liegen.

Aus der zuvor getroffenen Abschätzung des lateralen Auflösungsvermögens des Prüfsystems läßt sich bereits abschätzen, dass in dieser Tiefe die Dimensionierung des Hüllrohres ($\varnothing \approx 8\text{cm}$) und die Untergrenze des Auflösungsvermögens bei idealen Bedingungen und für eine flächige Fehlstelle im gleichen Bereich liegen (vgl. TAB. 5.1, hier: $R_{l,\text{spez}}(d=35\text{cm}) \geq 7 \times 7 \text{ cm}^2$). Bereits durch die zylindrische Geometrie des Reflektors, d.h. des Hüllrohres, wird die Echo-Amplitude gegenüber einem flächigen Reflektor reduziert (siehe Überlegungen in KAP. 5.2.1.2). Zusätzlich wird durch die rauhe Oberfläche der Schalleintrag in den Beton und die Beweglichkeit des Prüfkopfes auf der Oberfläche reduziert, wodurch die Abbildungsqualität im B-Bild deutlich sinkt. Eine Abschätzung der gesamten Schallschwächung (vgl. Erläuterungen zur TAB 5.2) zeigt TAB. 5.3., wobei die Ortung von der glatten Seite wiederum mit 100% angesetzt wurde:

Schallschwächender Effekt	Berechnung nach	RSPK, d = 24cm	RSPK, d = 38cm	RSPK, d = 38cm in db
Strahlöffnung	{2.23}: $p \propto 1/d$	100%	63%	-4 db
Streu. & Abspt. (A/B16, $\alpha = 60\text{db/m}$)	{2.24}: $p \propto \exp(-\alpha \cdot d)$	100%	38%	-8,5 db
Zylindrischer Reflektor	BILD 5.7	100%	ca. 80%	-1,5 db
Rauhe Oberfläche	Erfahrungswert	100%	32%	-10 db
Reflexion R gesamt:		100%	≈ 7%	-24 db

TAB. 5.3: Vergleich der Reflexionsfaktoren R für das Echo des Spannkanals von der glatten (d=24cm) bzw. rauhen (d=38cm) Seite des Probekörpers BASt1

Da bereits die Ortung der Spannkanäle von der glatten Seite im Grenzbereich des Prüfsystems zur Erkennung noch signifikanter Defekte lag, wird verständlich, dass bei einer erwarteten Amplitude von nur noch 7% von der rauhen

Seite keine signifikante Ortung der Spannkanäle möglich war. Alle anschließenden Messungen wurden daher nur noch von den glatt geschalteten Oberflächen ausgeführt.

Eine Ortung der Spannkanäle im bewehrten Bereich¹ (vgl. BILD 5.14, A K) des Probekörpers **BAS_{t1}** schien an wenigen ausgewählten Stellen noch möglich, konnte aber wegen Zeitmangels und technischer Probleme nicht hinreichend dokumentiert und ausgewertet werden. An den meisten Punkten, insbesondere direkt über den Bewehrungsstäben, war aufgrund deren Streuwirkung keine Ortung möglich. Da erfahrungsgemäß frühzeitige, d.h. oberflächennahe Störungen des Messsignal den gesamten weiteren Signalverlauf qualitativ stark beeinträchtigen, führte insbesondere die tiefe Lage der Hüllrohre zur Überschreibung des schwachen Echosignals durch den Störanteil. Nach den am Probekörper **BAS_{t1}** erzielten Ergebnissen wurde am Probekörper **BAS_{t2}** nur noch kurz nach den Spannkanälen gesucht. Eine signifikante Ortung war wie erwartet dort nicht möglich.

5.2.2.3 Verfüllzustand der Spannkanäle

Eine weitere Prüfaufgabe bestand in der Ermittlung des Verfüllzustandes der nur teilweise verpreßten Spannkanäle. In der vorhergehenden Messreihe (vgl. KAP. 5.2.1.3) wurde bereits versucht, einen B-Scan exakt über dem zuvor gemessenen Verlauf des Hüllrohres durchzuführen und aus den ggf. auftretenden Intensitätsschwankungen (höhere Transmission durch verpreßte Abschnitte) Rückschlüsse auf den Verfüllzustand zu ziehen. Dieses Verfahren erwies sich allerdings als nicht auswertbar, da es unmöglich war, den Prüfkopf stets völlig exakt über dem Hüllrohr bei konstanter Ankopplung zu führen. Die daraus resultierenden Schwankungen im B-Scan ließen keine Auswertung bzgl. des Prüfziels zu. Da die Echoreflexe der an der BAS_t untersuchten Probekörper wie zuvor dargestellt nur noch mit sehr schwacher Intensität empfangen werden konnte, wurde dieser Fragestellung nicht weiter nachgegangen. Nach den bisher gemachten Erfahrungen sind Aussagen über den Verfüllzustand von Spanngliedern beim derzeitigen Stand des eingesetzten

Prüfsystems nicht möglich (s. KAP. 5.2.1.3). Ob hier Verbesserungen durch die Hinzunahme zusätzlicher Parameter wie z.B. der Frequenzanalyse muss Gegenstand künftiger Forschung sein.

5.2.2.4 Kiesnester um Spannkanäle

Relevante Kiesnester im Bereich der Spannkanäle sollten sich im Echobild durch ein ausbleibendes oder weniger intensives Echo des Spannkanals, ggf auch durch eine Erhöhung der Schalllaufzeit bemerkbar machen. Nach Bekanntgabe der Position der Kiesnester um die Spannkanäle lag ein Kiesnest um das untere Hüllrohr im Bereich N5-8 Q5-8, somit in einem hier untersuchten Bereich. Es ließ sich nachträglich feststellen, dass in diesem Bereich eine um 2,5% höhere Schalllaufzeit (Messpunkte M6,5 und P7) gegenüber den benachbarten Bereichen gemessen wurde. Dieses kann auf die geringere Schallgeschwindigkeit in den mangelhaft verdichteten Bereich zurückgeführt werden. Da diese Abweichung jedoch deutlich innerhalb der Fehlergrenzen von 6% ($\pm 15\text{mm}$ bei $d=240\text{mm}$) lag, war eine Blindaussage hier nicht zulässig.

5.2.2.5 Hohlstellen und weitere Kiesnester

Zur Zeit der Untersuchung war kein spezieller Bereich der Probekörper für diese Defekte vorgegeben. Für einige Probemessungen wurde daher am Probekörper **BASt1** der Bereich G7-13 N7-13 untersucht. Die in einigen B-Bildern auftretenden Unregelmäßigkeiten ließen jedoch keine signifikante (Blind-)Aussage zu. Ähnliche Unregelmäßigkeiten findet man z.T. auch an intakten Prüfobjekten durch verdichtungsbedingte Veränderungen in der Qualität insbesondere des oberflächennahen Betons. Nach Abschluss der Untersuchungen wurden die Art und Lage der Defekte bekanntgegeben (s. BILD 5.10). Beim Probekörper **BASt1** wurden die Fehlstellen durch Kunststoffkörper verschiedener Geometrie und Außenabmessungen von jeweils ca. 5cm realisiert. Sie lagen im Bereich H10-13 P9-13 in Tiefen von 500-600mm von der glatten Seite, daher z.T. ausserhalb der hier untersuchten Bereiche.

Insgesamt lässt sich aber feststellen, dass die Fehlstellen-Geometrien unter diesen Umständen zu klein sind, um sie mit dem Prüfsystem nachweisen zu können.

5.2.3 Ergänzende Anmerkungen

Da sich das Prüfsystem zum Zeitpunkt der dargestellten Untersuchungen z.T. noch im Aufbau- und Erweiterungsstadium befand, waren gewisse Leistungsbeschränkungen gegenüber dem aktuellen Prüfsystem NFUS2300 unvermeidlich. Insbesondere stand auf der integrierten Festplatte (100 MB, heute 1,2 GB) zu wenig freier Speicherplatz zur Verfügung, wodurch die Anzahl der Messungen beschränkt und dazu eine ständige Datenkompression erforderlich war. Der zum Zeitpunkt der Untersuchungen immer noch benötigte Erfahrungsgewinn bei neuen Prüfaufgaben kostete zudem sehr viel Zeit, hier sicherlich rund die Hälfte der Messzeit. Aus diesem Grund konnten einige der geplanten Messungen (Ortung unter Bewehrung, Kiesnester, Hohlstellen) nur teilweise durchgeführt werden.

Wie schon erwähnt wirkte sich die Realisierung einiger Fehlstellen in den Probekörpern nachteilig auf das Ergebnis der Untersuchungen aus. Die gesuchten Hohlstellen (Styroporquader / Kiesnest mit ca. 5cm Kantenlänge auf Bewehrungsstab befestigt) waren als einzelne Fehlstellen zu klein, um sie bei nicht unmittelbar oberflächennaher Lage zu orten. Erst viele Fehlstellen dieser Art sind i.d.R. standsicherheitsrelevant für ein Betonbauwerk. Das Vorhandensein einer *nennenswerten* Anzahl solcher Fehlstellen über größere Teile des Querschnitts wäre der Erfahrung vom Ultraschallprüfsystem erfaßt worden. Weiterhin erscheint die Ortung eines Kiesnestes um einen Spannkana-*l* und eine erfolgreiche Prüfung dessen Verfüllzustandes schon aus physikalischen Gründen mit Ultraschallecho-Verfahren kaum möglich. Da nicht bekannt war, in welchen Bereichen Kiesnester und/oder Verpressmängel zu erwarten waren, war eine Differenzierung dieser ggf. kombinierten Defekte zum Zeitpunkt der Untersuchungen nicht möglich.

6. Einsatz des Prüfverfahrens an bestehenden Bauwerken

In den Untersuchungszielen dieser Arbeit war auch ein Praxiseinsatz des weiterentwickelten Verfahrens vorgesehen, sowie sich diese Möglichkeit bot. Um die vor Ort erforderliche Transportabilität sicherzustellen, wurde die Prüfeinrichtung dazu auf die zwingend benötigten Komponenten reduziert, d.h. es wurden lediglich das Prüfgerät mit Bildschirm und angeschlossenen Prüfkopf verwendet. BILD 6.1 zeigt die Prüfeinrichtung im praktischen Einsatz.



BILD 6.1: Prüfgerät im Einsatz

6.1 Ortung von Gleitschalungskanälen

Aufgrund fehlerhaften Befüllens unter unzulässig hohem Druck war es im Jahr 1997 zu Schäden in der Betonhülle des Flugaschebunkers einer Kohle-Kraftwerksanlage gekommen. Das betreffende Silo (BILD 6.2) war zu diesem Zeitpunkt seit über 20 Jahren in Betrieb und seinerzeit (1974) in Gleitschalungs-Konstruktion erreicht worden. Das Bauwerk besitzt eine Gesamthöhe von ca. 50m, wobei der Lagerraum für die Flugasche in der Höhe zwischen ca. 15m bis ca. 45m liegt. Es entsprach dem damaligen Stand der Technik, die nach Entfernung der Schalungskonstruktion verbleibenden Leerkanäle nicht mit Zementleim oder Mörtel zu verpressen. Im Rahmen der nun erforderlichen Instandsetzungsmaßnahmen war es nötig, diese potenziellen Schwachstellen zur Abdichtung und zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes der Bewehrung nachträglich zu verfüllen.

Aus den vorliegenden Bauplänen und Konstruktionszeichnungen (vgl. BILD 6.5) des Silos war es nicht möglich, irgendwelche Rückschlüsse auf die An-



BILD 6.2: Das Flugasche-Silo

zahl, Lage oder Geometrie der Kanäle abzuleiten. Zur Ortung derselben mußte ein zerstörungsfreies Prüfverfahren eingesetzt werden, um weitere Schäden (wie z.B. bei rein probeweisem Anbohren) so gering wie möglich zu halten. Da das Bauwerk weiterhin in Betrieb war, kam zudem nur eine Prüfung von der Außenseite in Frage, wodurch das Röntgen ausfiel. Unter diesen Voraussetzungen erschien einzig eine Untersuchung nach dem Ultraschallecho-Verfahren möglich.

In den vorhergehenden Kapiteln (s. insb. KAP. 3.2. / KAP. 5) wurde bereits dargestellt, welche Einflussgrößen den Erfolg einer Ultraschallecho-Prüfung entscheidend beeinflussen. Für die hier anstehende Prüfaufgabe sind dabei wesentlich zu nennen:

- Tiefenlage u. Geometrie des zu ortenden Leerkanals (Tiefenauflösung)
- Wanddicke des Hüllenbetons (Rückwandecho)
- Zustand und Größtkorn des verbauten Betons (Schallschwächung)
- Oberflächenbeschaffenheit (Ankopplung)

Da aus den Bauwerksunterlagen keine dieser wichtigen Informationen abgeleitet werden konnten, war es erforderlich, Voruntersuchungen am Bauwerk selbst durchzuführen, um den möglichen Prüferfolg abschätzen zu können.

Bei der ersten Inaugenscheinnahme vor Ort wurden eine Vielzahl feiner (im wesentlichen senkrecht und waagrecht orientierter) Risse insbesondere im mittleren Bereich des Silos festgestellt, wo das Füllgut lagert. Auch der obere (Einfüll-) Bereich war rissbehaftet, allerdings in erheblich geringerem Umfang. Da auch parallel zur Einschallrichtung orientierte Risse der Erfahrung nach zu einer erheblichen Reduktion der Signifikanz der Ultraschallsignale führt, wurde dieser obere Bereich als deutlich besser prüfbar eingeschätzt.

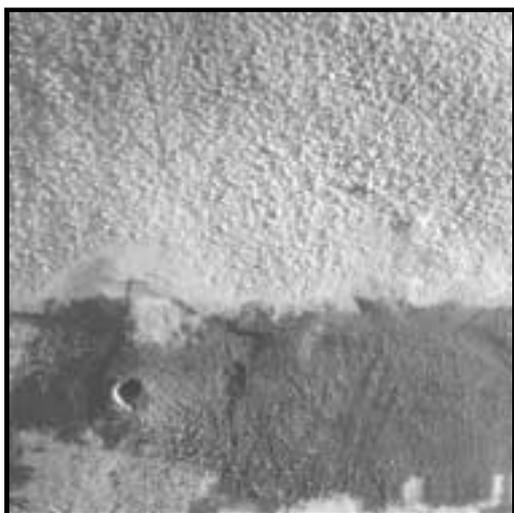


BILD 6.3: Eindruck von der Oberfläche (15x15cm²) mit Bohrloch

Weiterhin war die Oberfläche des Silos mit einer recht grobkörnigen, sandigen Beschichtung versehen (s. BILD 6.3). Um den Ankopplungsverlust durch die so entstehenden Spalte zwischen Prüfkopf und Oberfläche zu minimieren, wurde es zwingend erforderlich, an den zu prüfenden Bereichen die Oberfläche mit einem Bandschleifer zu glätten.

Aus zwei in einer Höhe von ca. 25m entnommenen Bohrkernen (B1 und B2, $\varnothing = 15\text{cm}$) konnte die Wanddicke zu 25cm bestimmt werden. Der verbaute Zuschlag bestand aus Sand/Kies mit einem Größtkorn von 32mm. Der Bohrkern B2 (s. BILD 6.4) enthielt zufällig einen der gesuchten Leerkanäle. Die Tiefenlage des hier gefundenen Kanals lag bei 15cm unter der Oberfläche, sein Durchmesser bei 35mm. Aus der in Kap. 5.1 dargestellten Untersuchung kann bei den hier vorliegenden Parametern (Geometrie, Größtkorn) theoretisch bereits abgeschätzt werden, dass das laterale Auflösungsvermögen in Prüfrichtung bei 4,5cm liegt (vgl. {5.1}: $R_{i, \text{spez}} \geq 4,5\text{cm} (=3 \cdot 15/10\text{cm})$), was den Durchmesser des Leerkanals um ca. 1cm übersteigt (s.u.).

Neben drei schlaffen Bewehrungsstäben ($\varnothing = 12\text{mm}$, Tiefen bei 4 und 21cm) wurde am Bohrkern B2 zusätzlich ein sehr feiner, transversaler Riss unregelmäßig durchgehend von der Oberfläche auf den Kanal gefunden. Um auch diese Einflüsse auf das Prüfergebnis im Vorfeld genauer abzuschätzen, wurde der Bohrkern B2 im Labor einer ersten Ultraschalluntersuchung unterzogen. Nach dem Abschleifen der Oberfläche mit einem handelsüblichen Bandschleifer war



BILD 6.4: Bohrkern B2

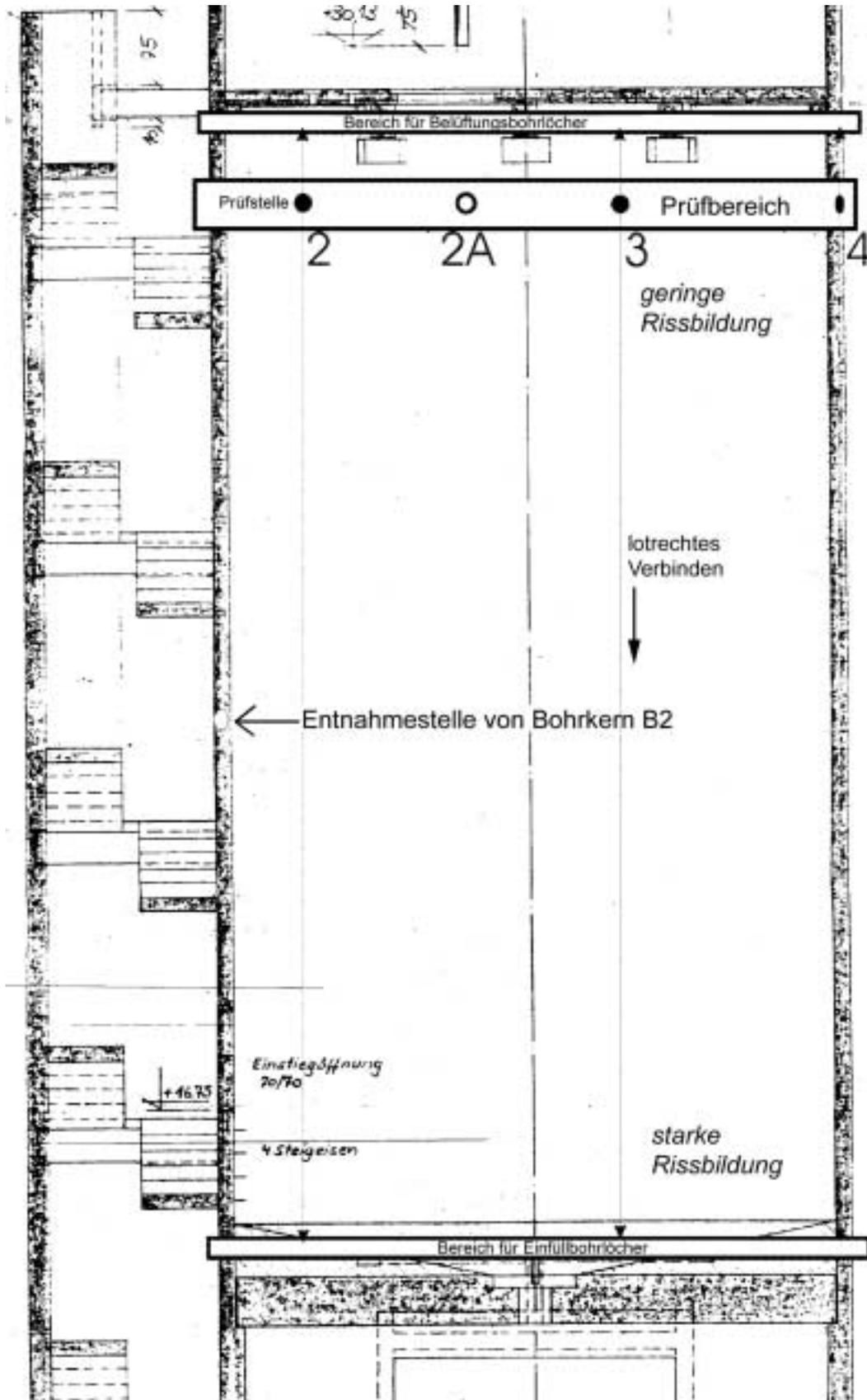


BILD 6.5: Ausschnitt aus dem Bauplan des Flugasche-Silos, Lagerbereich

es möglich, ein schwaches, aber signifikantes Echosignal vom Leerkanal zu orten; ein Rückwandecho aus 25cm Tiefe konnte allerdings nicht signifikant bestimmt werden. Dennoch erschien es erfolversprechend, auch am Bauwerk "in-situ" eine erfolgreiche Lokalisierung der weiteren Leerkanäle zumindest im oberen, mit wenigen und nur feinen Rissen behafteten Bereich durchzuführen.

Nach Einrüstung war das Bauwerk für die Prüfung vollständig von außen zugänglich. Die Prüfung wurde im vorgesehenen oberen Bereich begonnen. Im ersten Schritt wurde zunächst die oberflächennahe, schlaffe Bewehrung mit einem induktiven Überdeckungsmessgerät geortet und angezeichnet. Diese einfache und schnell durchzuführende Maßnahme ist i.d.R. immer sinnvoll, da oberflächennahe Stähle der Erfahrung nach zu starken Störanteilen im Ultraschallsignal führen. Die Positionen für der Ultraschallprüfung konnten dann entsprechend zwischen den Bewehrungsstäben gewählt werden. Anschließend wurden die markierten Bereiche an der Oberfläche abgeschliffen und geglättet. Unter Verwendung wasserfreien Glyzerins als Koppelmittel wurde dann die Prüfung durchgeführt.



BILD 6.6: Abschleifen der Oberfläche

Da bereits die Position eines Kanals im mittleren Bereich des Silos bekannt war (Bohrkern B2), bot es sich an, zunächst den durch Lotung nach oben gefundenen Punkt im Prüfbereich durch eine Ultraschallortung zu verifizieren. Für die Ultraschallprüfung wurden die bereits im Labor am Bohrkern gefundenen Parameter am Prüfgerät justiert (Tiefpassfilterung bei 50kHz, vglsw. hohe Pulsdauer (d.h. Pulsenergie) bei 6 μ s). Das so erhaltene B-Bild zeigte ein klares Echosignal ca. 1cm links der durch Lotung gefundenen Position (diese Abweichung liegt deutlich innerhalb der insgesamt auftretenden Messungenauigkeiten). Die nachfolgende Bohrung, die auf eine Tiefe von 16cm

begrenzt wurde, traf direkt den Leerkanal in der erwarteten Tiefe von ca. 15cm. Hiermit war in einem ersten, sehr überzeugenden Schritt nachgewiesen, dass die Prüfeinrichtung unter den gegebenen Bauwerksbedingungen in der Lage war, Leerkanäle sicher zu orten.

Die eigentliche Prüfaufgabe lag nun darin, alle weiteren Kanäle zu orten. Demzufolge musste ein "Scan" über den gesamten Umfang (ca. 25m) durchgeführt werden. Der Abstand der Prüfstellen vom ersten Kanal (Position 1) nach rechts wird nachfolgend mit "d" bezeichnet.

Schwache und undeutliche Signale wurden bei $d = 1,20\text{m}$ gefunden, die Bohrung traf jedoch nur einen tieferliegenden, zuvor vom Bewehrungssucher nicht detektierten Bewehrungsstab. Ein weiteres, schwaches Echosignal wurde bei $d = 1,80\text{m}$ sowie ein deutliches Signal bei $d = 3,60\text{m}$ detektiert. An

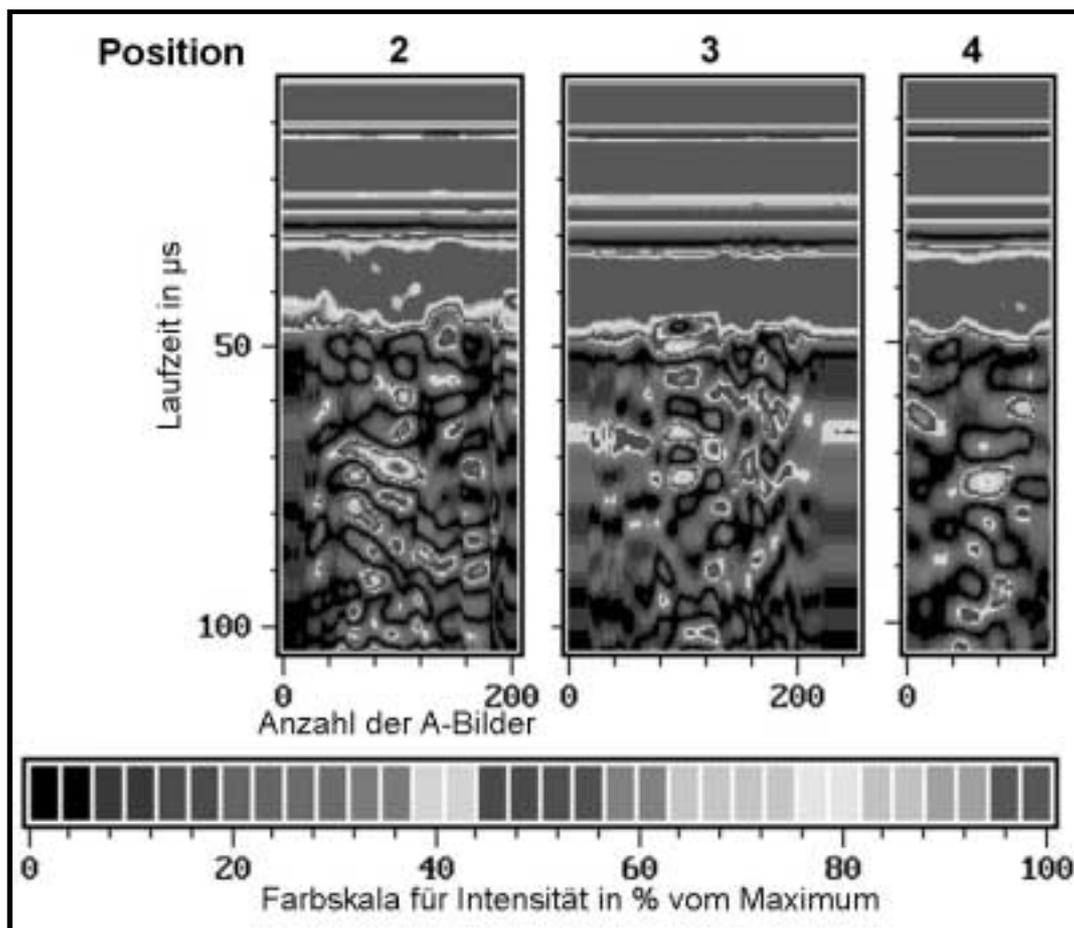


BILD 6.7: B-Bilder an den Positionen 2, 3 und 4

der letztgenannten Stelle (Position **2**) wurde der Leerkanal direkt mit dem ersten Bohrversuch getroffen, wohingegen bei $d = 1,80$ zunächst kein Erfolg erzielt wurde, obwohl auch zwei weitere Bohrungen mit 2,5cm Versatz nach links und rechts gesetzt wurden (s.o.g. Ausführung zum lateralen Auflösungsvermögen).

Die nachfolgenden Messungen ergaben dann mit großer Gleichmäßigkeit deutliche Echos in Abständen von 3,6m (s. BILD 6.7) sowie jeweils genau mittig dazwischenliegende, schwächere Echos. An den Stellen mit deutlichen Echos fanden sich nach dem Anbohren Leerkänäle in einer Tiefe von ca. 15cm. Auch an den Stellen mit schwachen Echosignalen konnten (nach Erhöhung der zuvor auf 16cm begrenzten Bohrtiefe) Leerkänäle nachgewiesen werden, hier allerdings in einer Tiefe von ca. 21cm. Aufgrund der völlig symmetrischen Anordnung der Leerkänäle auf dem Umfang des Silos konnte daher davon ausgegangen werden, dass bei dieser Prüfung alle vorhandenen, 14 Kanäle sicher geortet wurden.

6.2 Untersuchung von Fundamentplatten

Im Fundamentbereich einer großtechnischen Siloanlage im Bereich des Rheinuferes war es zu zahlreichen Rissen im Bodenbereich auf einer Fläche von ca. 400m² gekommen. Da das Fundament im Bereich des Rheinwasserspiegels liegt, wurde vermutet, dass ein vorangegangenes Hochwasser für diese Schäden ursächlich sein könnte. Es stellte sich daher unter anderem die Frage, ob eine zu dünne Bodenplatte zu diesem Schaden geführt hatte.

Das Prüfziel bestand folglich darin, festzustellen, ob unter den gegebenen Bauwerksbedingungen mit der vorhandenen Prüfeinrichtung die Dicke der Bodenplatten zerstörungsfrei ermittelt werden konnte. Der Eigner der Anlage ging davon aus, dass es sich beim eingebauten Beton um einen gegen Erdreich betonierten Stampfbeton vergleichsweise geringer Güte handelte; zur Dicke der Bodenplatten lagen jedoch keine verbindlichen Angaben vor. Auf-

grund von noch vorhandenen Informationen aus der Bauphase wurde aber vermutet, dass in den Räumen **1** bzw. **6** (vgl. BILD 6.8) Platten mit einer Dicke von ca. 80cm, in allen anderen Räumen von nur ca. 10cm vorlagen. Zuvor durchgeführte thermografische Untersuchungen hatten ergeben, dass - außer im Anschlussbereich der Wände und der Streifenfundamente - wenig oder gar keine Bewehrung im Bereich der Bodenplatten eingebaut worden war.

Die ersten Untersuchungen wurden im Raum **R1** mit dem Ultraschallprüfsystem durchgeführt. Als Koppelmittel wurde wasserfreies Glycerin verwendet. Da hier verbaute Beton vermutlich eine Dicke von ca. 80cm mit einem Größtzuschlagkorn von 32mm aufwies, schien aus den bisher mit dem Prüfsystem vorliegenden Erfahrungen eine Rückwandortung nicht

erfolgversprechend (vgl. KAP. 5.2.1.1, am Probekörper **BAM2** mit Zuschlag A/B32, $d = 50\text{cm}$, keine sign. Ortung mgl.). Dieses wurde durch Messungen im Raum **R1** bestätigt, d.h. es konnte auch bei unterschiedlichen Einstellungen der Prüfparameter (vgl. KAP. 4 u. 5: f_{TP} , T_{AN} , Prüfkopfwahl) kein Rückwandecho gefunden werden.

Im Raum **R2** wurde darauf versucht, die dort vermutete Plattendicke von ca. 10cm im Echoverfahren zu ermitteln. Als Prüfkopf wurde der niederfrequente Typ «5» (s. KAP. 4.2) gewählt mit einer Tiefpassfilterung bei $f_{TP} = 100\text{kHz}$ bei geringer Pulsenergie ($T_{AN} < 3\mu\text{s}$). Aus TAB. 5.1 erhält man für diese Parameter (und $d = 10\text{cm}$) eine Lateralauflösung von $3 \times 3\text{cm}^3$ sowie mit FORMEL {5.2}

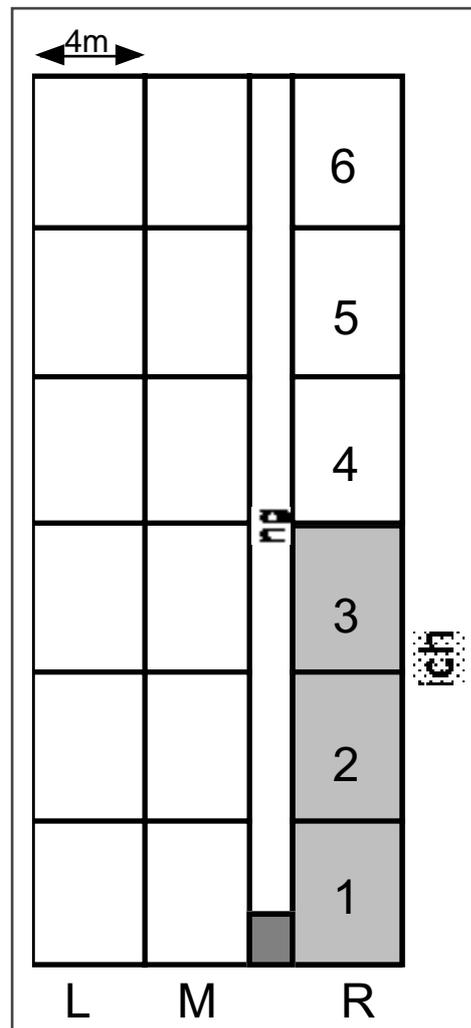


BILD 6.8: Skizze des Fundamentbereiches

eine Tiefenauflösung von ca. 2cm. Eine Echo-Ortung erschien daher möglich, was auch der Fall war. Im Mittel über vier Messstellen (BILD 6.9) wurden im Raum **R2** Laufzeiten von $t_{IE} = 19 \pm 3 \mu\text{s}$ gefunden; in der gleichen Weise wurde an drei Messstellen im Raum **R3** vorgegangen, es ergaben sich Werte von $t_{IE} = 14 \pm 3 \mu\text{s}$. Da die Ultraschallgeschwindigkeit im Prüfbeton zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt war, wurden die resultierenden Plattendicken zunächst mit dem Standard-Wert von $v_{US} = 4000\text{m/s}$ abgeschätzt; somit ergaben sich rechnerisch für **R2**: $d = 7,6 \pm 1,2\text{cm}$ bzw. für **R3**: $d = 5,6 \pm 1,2\text{cm}$, was sehr gering erschien.

Um unter den gegebenen Bedingungen weitere Informationen über die Ultraschallgeschwindigkeit im verbauten Beton zu ermitteln, war es einzig möglich, eine Messung in Durchschallung mit zwei Prüfköpfen (hier Typ «2» und «3», vgl. KAP. 4.2) an der Oberfläche durchzuführen (BILD 6.10). Ohne weitere Erörterung muss aber darauf hingewiesen werden, dass eine solche Messung kann nur einen *Anhaltswert* liefern kann, da kein rein longitudinales Signal ausgewertet wird, sondern eine Überlagerung verschiedener Moden (Oberflächen-, Plattenwellen u.a. s. KAP. 2.1.2).

Die so bestimmte Ultraschallgeschwindigkeit betrug $v_{US, D} = 2400 \pm 200\text{m/s}$, woraus sich mit den oben bestimmten Ultraschalllaufzeiten Plattendicken von für **R2**: $d = 4,5 \pm 1\text{cm}$ bzw. für **R3**: $d = 3,5 \pm 1\text{cm}$ ergaben.

Aus den ermittelten Dicken konnte sich nur ergeben, dass hier nicht etwa die Dicke des eigentlichen Bodenplattenbetons bestimmt wurde, sondern vielmehr ein abgelöster oder verbundloser Estrich vorlag. Da eine luftgefüllte

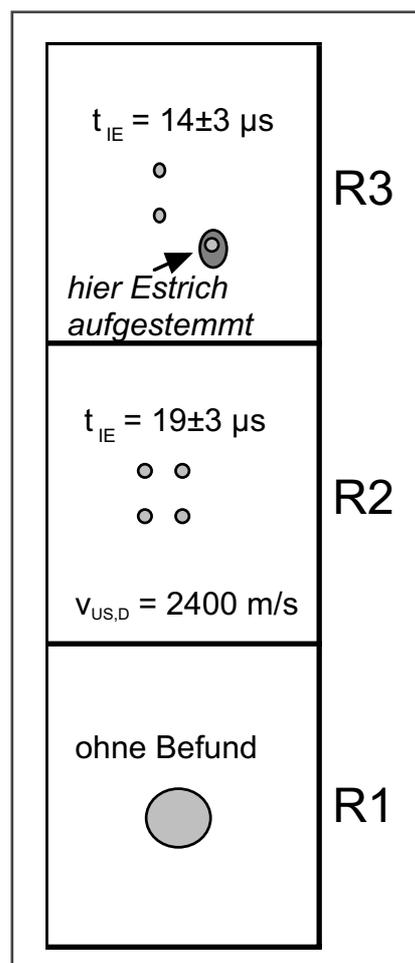


BILD 6.9: Einzelergebnisse

Trennschicht zwischen Estrich und Unterbeton für den Ultraschall praktisch undurchdringlich ist, war auf diese Weise eine weitere Dickenbestimmung des eigentlichen Unterbetons unmöglich.



BILD 6.10: Prüfgerät bei Durchschallungsmessung

Zur Überprüfung wurde an einer Stelle im Raum **R3**

(vgl. BILD 6.9) der Estrich aufgestemmt. Die Ergebnisse der Ultraschallmessung wurden hierbei bestätigt. Der offensichtlich frisch in frisch betonierten, ca. 4cm dicke Verbundestrich (Sandgrößtkorn ca. 3mm) hat sich mit einer feinen Trennschicht vom Unterbeton (Größtkorn ca. 32mm) abgelöst. Das sich das Rissbild auch den anderen Räumen **L,M,R 2 - 5** völlig gleichartig zu dem in **R3** zeigte, konnte sicher angenommen werden, dass sich der Estrich im gesamten Innenbereich auf einer annähernd quadratischen Fläche von ca. 3x3 m² (je Raum) abgelöst hatte.

Um entsprechend dem Prüfziel dennoch die Plattendicke des Fundamentbetons zu ermitteln, wurde an der aufgestemmten, nun oberflächlich äußerst unregelmäßigen Oberfläche versucht, einen Prüfkopf mittels Schnellzement fest an den Unterbeton anzukoppeln. Nach der Erhärtung des Zements gelangte zwar Schallenergie in den Unterbeton, aber aufgrund der nun nicht mehr vorhandenen Beweglichkeit des Prüfkopfes war es nicht möglich, ein signifikantes Rückwandecho zu identifizieren. Ein zweiter Versuch, ein B-Bild auf der zusätzlich geglätteten Schnellzementoberfläche zu ermitteln, scheiterte am dann völlig unzureichenden Schalleintrag in den Beton.

Mittels der Ultraschallprüfung konnte also nachgewiesen werden, dass die beobachteten Risse von einer Ablösung, d.h. einer Delamination des Verbundestrichs herrührten. Dass eine Dickenbestimmung des Fundamentbetons mit dem Ultraschallecho-Verfahren hier nicht möglich war, muss wesentlich

auf mehrere Einflussfaktoren zurückgeführt werden. Zum Einen weist der eingebaute Stampfbeton durch die herstellungsbedingte, geringe Verdichtung ein relativ lockeres Gefüge mit hohem Luftgehalt (Poren, Verdichtungsmängel) auf, wodurch eine deutlich höhere Schallschwächung als z.B. in Normalbeton stattfindet (vgl. KAP. 2.2.1). Zum Anderen kann davon ausgegangen werden, dass an der rückwändigen, nicht glatten Grenzfläche Fundamentbeton wassergesättigtes Erdreich ein hoher (Schall-) Kopplungsfaktor besteht. Der resultierende Schallverlust ins Erdreich reduziert die Amplitude der für das verwendete Verfahren erforderliche Echo-Signale deutlich, d.h. für den Reflexionsfaktor kann hier $R \ll 50\%$ angenommen werden (vgl. KAP. 2.2.2.2: $R_{\text{BETON} \rightarrow \text{WASSER}} \approx 74\%$). Eine weitere Minderung der Signalqualität entstand dadurch, dass an der nach dem Aufstemmen freigelegten (Bruch-) Oberfläche keine brauchbare Ankopplung durchgeführt werden konnte.

Alle genannten Einflußgrößen waren spezifisch allein für das untersuchte Bauwerk. Nach den bisherigen Erfahrungen kann davon ausgegangen werden, dass eine vergleichbare Ultraschallecho-Dickenbestimmung von z.B. Normalbeton-Fundamentplatten *mit unterliegender Sauberkeitsschicht* oder *in Schalung hergestellten* Spuntwänden problemlos möglich ist, sofern die in KAP. 5 dargestellten Eigenschaften des Prüfsystems berücksichtigt werden.

7. Zusammenfassung

7.1 Erreichter Entwicklungsstand und heutige Anwendungsgebiete

Zerstörungsfreie Prüfverfahren gewinnen auch im Bauwesen zur Überprüfung und Überwachung von Betonbauwerken zunehmend an Bedeutung. Wesentliche Einsatzgebiete sind hierbei qualitätssichernde Überprüfungen bei und nach der Herstellung sowie überwachende Untersuchungen im Rahmen der Instandhaltung oder zur Beurteilung möglicher Nutzungsänderungen. Auch die Notwendigkeit des Aufspürens von Materialdefekten durch Alterungseinflüsse oder nicht vorgesehene, mechanische, thermische oder chemische Überbeanspruchungen nimmt mit zunehmender Standzeit und Nutzungsdauer der Baukonstruktionen zu.

Bis zu Beginn der 1990´er Jahre konnte das Ultraschallecho-Verfahren nicht mit Erfolg zur Prüfung von Beton eingesetzt werden. Trotz der im Einzelfall im Labor erzielten Fortschritte und Erkenntnisse, scheiterte der praktische Einsatz wesentlich an dem unzureichenden Entwicklungsstand speziell an den Baustoff Beton angepasster Prüfköpfe mit hoher Sendeleistung im Niederfrequenzbereich und sowie an fehlenden, schnellen Auswerteverfahren. Basierend auf seinen Vorarbeiten (z.B. [HILLGER1983]) entwickelte Hillger mehrere Ultraschall-Prüfsysteme auch für den Werkstoff Beton. Ab 1990 standen dann erstmals auch Ultraschall-Prüfköpfe zur Verfügung, die konstruktionsbedingt die Erzeugung hinreichend kurzer und energiereicher Impulse bei hoher Detektionsempfindlichkeit im für den Werkstoff Beton relevanten Niederfrequenzbereich erlaubten. Weiterhin ermöglichten die Fortschritte in der Mikroelektronik erstmals eine computergestützte, online-bilderzeugende Datenerfassung, um die Auswertung der komplexen Ultraschallsignale durch sog. B-Bilder zu erleichtern. Im Rahmen dieser Arbeit war es eine wesentliche Aufgabe, die neuartige Prüftechnik detailliert zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Insbesondere hatte diese Arbeit folgende Untersuchungsziele:

- Ermittlung der optimalen Prüfparameter für den Werkstoff Beton,
- praktische Erprobung und Bewertung neuartiger Prüfköpfe,
- Untersuchung praktikabler Ankopplungsverfahren, insb. zur Eignung einer "Elektro-Viskosen Flüssigkeit" als Koppelmittel,
- Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Einsatzmöglichkeiten,
- Prüfungen an bestehenden Bauwerken ("proof of principle").

Nach ausführlichen Voruntersuchungen wurde die Prüftechnik in KAP. 4 insbesondere dahingehend optimiert, dass genau die für den Werkstoff Beton ermittelten, relevanten Einstell- und Betriebsparameter am Prüfgerät für den Prüfer zur Verfügung gestellt wurden. Die ursprünglich modulare und somit umfangreiche Prüftechnik wurde weitestgehend in ein einziges Gerät integriert, welches auch unter Baustellenbedingungen einsetzbar ist. Für weitergehende Untersuchungen wurde eine zusätzliche, schnelle Datenerfassung aufgebaut (KAP. 4.3). Insbesondere wurde parallel zur geräteinternen Datenverarbeitung des Prüfgerätes eine zweite Datenerfassungsmimik mittels eines zusätzlichen PC's und einer neu aufgebauten, digitalen Erfassung der Ultraschalldaten mit einer Abtastrate bis zu 64MHz und weiteren Optionen zur Frequenz- und Leistungsanalyse sowie zur frei programmierbaren Berechnung beliebiger Signalanteile aufgebaut. Die hierfür erstellte Software ermöglicht eine völlig flexible und hochgenaue Analyse der Ultraschalldaten. Mit dieser erweiterten Prüfeinrichtung wurde ausführlich untersucht, ob eine verbesserte und reproduzierbare Ankopplung von Prüfköpfen an den Werkstoff Beton mittels einer sog. "Elektro-Viskosen Flüssigkeit" (EVF) zu erzielen war. Die Untersuchung sollte zudem zeigen, ob eine gezielte Beeinflussung der Dämpfung des Sende- und Empfangssignales eines Prüfkopfes durch EVF möglich ist und ob sich durch die getrennte Auswertung unterschiedlicher Moden des Ultraschall-Signals erweiterte Möglichkeiten z.B. zur Materialcharakterisierung ergeben. Die Beeinflussung des Ultraschallsignals durch unterschiedliche Einstellungen der Viskosität der EVF konnte zwar nachgewiesen werden, die resultierenden Änderungen des Schalldruckes und der

Frequenz-Übertragung waren jedoch zu gering, um signifikante Aussagen zuzulassen. Darüberhinaus erwies sich der effektive Verlust durch die Ankopplung über eine EVF-Schicht gegenüber der direkten, mechanischen Ankopplung eines Prüfkopfes z.B. unter Verwendung von Glycerin an den Beton als so hoch, dass keine verwertbaren Echosignale detektierbar waren. Mittels EVF konnten daher keine Verbesserungen für das Ultraschallecho-Verfahren erreicht werden. Durch die ergänzende Charakterisierung praktisch aller verfügbaren Koppelmittel zur Prüfung von Beton (KAP.4.2) konnten jedoch für die meisten Prüfaufgaben geeignete Koppelmittel benannt werden.

Zur genaueren Abschätzung der Einsatzmöglichkeiten der Prüftechnik wurden in KAP. 5 praktische Untersuchungen zum Auflösungsvermögen sowie vergleichende Laborprüfungen an praxisnah konstruierten Beton-Probekörpern durchgeführt. Hierdurch konnten erstmals die gegenwärtigen Anwendungsfelder der Prüftechnik angegeben werden; unter Berücksichtigung der in KAP. 5 genannten Besonderheiten (z.B. Oberflächenbehandlung, optimale Justage des Gerätes u.a.) kann das Ultraschallecho-Verfahren nun i.d.R. erfolgreich und zuverlässig für folgende Prüfaufgaben an Standard-Betonen eingesetzt werden:

- a) Rückwandortungen bis zur Tiefe von 30cm bei Größtkorn 32mm
50cm bei Größtkorn 16mm
70cm bei Größtkorn 8mm,
- b) Ortung von Defekten oder Konstruktionselementen
ab 4cm Tiefe bis zu den unter a) genannten Bereichen
sofern die Objektgröße Schallachse TAB. 5.1 entspricht und
das Objekt hinreichend reflektierend ist,
- c) Homogenitätskontrollen an Wänden bis zu den Tiefen von a).

Eine wesentliche Zielsetzung dieser Arbeit war es, das Prüfsystem so weit fortzuentwickeln, dass Prüfungen nicht nur unter Laborbedingungen zu signifikanten Daten führen, sondern auch beim tatsächlichen Einsatz am Bauwerk vor Ort („in-situ“) nachweislich relevante Ergebnisse liefern. In KAP. 6 konnte exemplarisch gezeigt werden, dass sich mit der neuartigen Ultraschallecho-

Prüftechnik auch in-situ-Untersuchungen erfolgreich durchführen lassen. An einem Silo konnten alle gesuchten Gleitschalungskanäle zerstörungsfrei lokalisiert werden. Bei der Untersuchung von durch Rissen geschädigten Fundamentplatten konnte nachgewiesen werden, dass die Rissbildung wesentlich durch eine Delamination des Verbundestrichs hervorgerufen wurde. Die in KAP. 6 dargestellten, praktischen Anwendungsfälle zeigen darüberhinaus am Beispiel empfohlene Vorgehensweisen bei der Ultraschallecho-Prüfung von Beton auf.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Ultraschallecho-Verfahren zur Prüfung von Beton durch die in dieser Arbeit aufgezeigten Fortschritte nunmehr für eine Reihe von Prüfaufgaben und Fragestellungen anwendungsreif ist. Inwieweit eine angedachte Prüfaufgabe den Möglichkeiten der Prüftechnik angemessen ist, kann an den Ergebnissen dieser Arbeit jetzt auch im Vorfeld genauer abgeschätzt werden. Es sollte Gegenstand weiterer Forschungstätigkeit sein, die Anwendungsgebiete des Ultraschallecho-Verfahrens zur Prüfung von Beton kontinuierlich zu erweitern und noch vorhandene Entwicklungspotenziale wie die nachfolgend dargestellten umzusetzen.

7.2 Anregungen für die weitere Forschung

Die Besonderheit des hier vorgestellten Ultraschallecho-Verfahrens zur Prüfung von Beton ist die sofortige Verfügbarkeit und Visualisierung der Ultraschalldaten im B-Bild. Die Erfolge insbesondere der medizinischen Diagnostik zeigen eindrucksvoll, welche Vorteile direkt bildgebende Verfahren prinzipiell bieten. Auch für die Ultraschallecho-Prüfung von Beton werden daher noch deutliche Entwicklungsperspektiven gesehen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Prüfeinrichtung bietet aufgrund ihrer offenen Architektur gute Möglichkeiten zur Umsetzung weiterer Entwicklungsschritte. Die nachfolgend kurz vorgestellten Ideen mögen daher als Anregung für die künftige Forschung dienen und durch diese hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit überprüft werden. Vorgeschlagen wird im Einzelnen:

- i) Optimierung der Bildaufbereitung
- ii) Reproduzierbarkeit der Ankopplung
- iii) Sende- und Empfangssignalkonditionierung
- iv) physiologische Detektionshilfen insb. bei der Defektoskopie

i) In der aktuellen Ausbaustufe des Prüfsystems besteht keine Korrelation zur tatsächlichen (x-y-) Position des Prüfkopfes auf der Bauteiloberfläche. Zur Steigerung der Präzision wäre hier eine örtliche Korrelation wünschenswert, die allerdings den Prüfer nicht durch umständliches Positionieren oder Ausmessen behindern sollte. Zur Realisierung wird vorgeschlagen, den Prüfkopf mit einem miniaturisierten Senderaufsatz (z.B. aus Komponenten funkgesteuerter Computermäuse) zu versehen. Nach entsprechender Anpassung der Prüfeinrichtung mit einem Empfangsmodul und der Auswertesoftware sind dann reale, in der x- und y-Achse orts aufgelöste B-Bilder möglich. In einem weiteren Schritt wären dann sogar sukzessive 3-D tomografische Untersuchungen online vorstellbar (s.z.B. [SPEKTRUM1997-6], [SPEKTRUM1996-10]).

ii) Eine wesentliche Verbesserung der Aussagefähigkeit der B-Bilder könnte erreicht werden, wenn es gelänge, Schwankungen in der Ankopplung zu erfassen und nachfolgend zu kompensieren. Schwankungen in der Ankopplung machen sich u.a. durch die unterschiedliche, mechanische Bedämpfung des Prüfkopfes und somit leichten Veränderungen des ausschwingenden Anregungsimpulses bemerkbar. Mit der in KAP. 4.3 vorgestellten, erweiterten Prüfeinrichtung ist es möglich, solche kleinste Schwankungen (< 1%) beliebiger Signalabschnitte, also auch des Anregungsimpulses, zu erfassen. Eine erfolgreiche Kompensation wäre denkbar, wenn es gelänge, diese Schwankungen mit dem Verstärkungsverlauf des Prüfsignales zu korrelieren.

iii) Die Anpassung des Sendepulses an die jeweilige Prüfsituation wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst durch die Änderung der Pulsdauer des ansonsten unveränderlichen Sendepulses vorgenommen und diskutiert (s. KAP. 4.1f und 6). Durch eine frei programmierbare, DAC-gesteuerte Modifikation

des Pulsgenerators könnte eine weitere, hier nur angerissene Idee überprüft werden. Neuere Forschungsarbeiten von FINK e.a. (s. [SPEKTRUM2000-3], [SPEKTRUM1998-5]) beschäftigen sich mit der Signalverbesserung in inhomogenen, allerdings nur gering schallschwächenden Medien durch sog. Zeitumkehr-Akustik. Ob sich durch diesen Ansatz Verbesserungen bei der Betonprüfung erzielen lassen, sollte untersucht werden.

iv) Bei der Ortung von größeren Inhomogenitäten im Prüfmaterial sind im Bereich der Defekte immer geringfügige Änderungen im Frequenzspektrum des Ultraschall-Signals feststellbar. Da bereits in der heutigen Ausbaustufe der Prüfeinrichtung das Ultraschallsignal vollständig digitalisiert vorliegt, ließe sich mit wenig Aufwand eine Umsetzung des Ultraschallsignals durch eine Soundkarte in den Hörbereich erreichen. Das akustische Signal könnte dann begleitend zur bildgebenden Untersuchung über ein Headset abgehört werden und so dem gegenüber Tonschwankungen äußerst empfindlichen, menschlichen Ohr zusätzliche Informationen liefern. Welche Signalteile sich optimal eignen (Amplitude, Frequenz, Einhüllende, Zeitfenster), sollte untersucht werden. Die Implementierung von Sound-Routinen in die Prüfsoftware könnte zudem zusätzlich dafür genutzt werden, Protokolldaten per Spracheingabe festzuhalten, was unter Baustellenbedingungen äußerst wünschenswert ist.

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass für alle Ultraschallverfahren im Bereich der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen zur Prüfung von Beton ein dringender Bedarf besteht, einheitliche Eich- bzw. Kallibriernormale zu entwickeln und normgemäß festzuschreiben, um auch beim Einsatz unterschiedlicher Prüfsysteme und -verfahren (s. z.B. [KRIEGER1998]) vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse zu gewinnen. Eine weite Akzeptanz der Ultraschallverfahren für die Betonprüfung kann nur auf diesem Wege erreicht werden. Die z.Z. bereits angedachten Bemühungen dieser Art sollten in Zusammenarbeit mit anderen Forschergruppen weiter verfolgt werden.

8. Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

a	Abstand
a	Verstärkungsmaß
B _{-3dB}	3dB-Bandbreite
b	Breite
c, v	Schallgeschwindigkeit
d	Dicke, Tiefe
D_{X->Y}	Durchlassfaktor von Medium X nach Medium Y
D	Schwingerdurchmesser eines Prüfkopfes
D	Scher-Geschwindigkeitsgefälle
EDYN	Dynamischer E-Modul
ESTAT	Statischer E-Modul
EUS	Ultraschall-E-Modul
E	Feldstärke
E ₀	Schwell-Feldstärke
f	Frequenz (messtechnisch)
fHP	Hochpass-Grenzfrequenz
fN	Mitten/Nennfrequenz
fTP	Tiefpass-Grenzfrequenz
fTRIG	Triggerfrequenz
f ₀	Eigenfrequenz
f _{0,-3dB}	obere Grenzfrequenz für 3db-Abfall
f _{U,-3dB}	untere Grenzfrequenz für 3db-Abfall
f	Frequenzbandbreite/-spektrum
I	Intensität (nach Sprachgebrauch, eigentlich Schalldruck)
I _{max}	maximaler Strom
J	Schallenergiedichte oder Intensität (physikalisch)
J_e, J_r, J_d	Intensität (der einfallenden, reflektierten, durchgelass. Welle)
k	Ankopplungskoeffizient
N	Nahfeldlänge
n	natürliche Zahl, Index
NK	Normklima 20°C / 1013hPa
p_e, p_r, p_d	Schalldruck (der einfallenden, reflektierten, durchgelass. Welle)
R_{X->Y}	Reflexionsfaktor von Medium X nach Medium Y
R _{l,spez}	spezifisches, laterales Auflösungsvermögen
R _{d,spez}	spezifisches Tiefen - Auflösungsvermögen
R _p	Bedämpfung in Ohm
s	Strecke, Weg
T	Periodenlänge, Schwingungsdauer
T _{AN} , T _{PULS}	Anregungsimpulsdauer
T _{TOT}	Totzeit
t _D	Schalllaufzeit bei Durchschallung
t _{IE}	Schalllaufzeit beim Echoverfahren
t _{VORLAUF}	Vorlaufzeit (elektrisch oder mechanisch)
U _{AN}	Spannung des Anregungsimpulses
V _{PP}	Spannung von Spitze zu Spitze
V _{US,D}	Schallgeschwindigkeit bei Durchschallung
V _{US,IE}	Schallgeschwindigkeit beim Echoverfahren
V _{US,X}	Schallgeschwindigkeit im Medium X
Z	Schallimpedanz
z	Lage des letzten Schalldruck-Maximums auf der Schallachse
	Gesamt-Schallschwächungskoeffizient
1,2	Winkel
	Phasenwinkel
0	Grund-oder Nullviskosität

	Wellenlänge
	Poisson-Konstante
	Dichte
	Frequenz (physikalisch)
	Schubspannung
	Summe
	Kreisfrequenz
	Teilchenauslenkung
∅	Durchmesser
	senkrecht zu
Indizes	
O	Oberfläche
L	longitudinal
T	transversal
D	Dehn
Schrift in [KAPITÄLCHEN]	Literaturhinweis
EFIT	Elastodynamische Finite Integrationstechnik
SAFT	Synthetische Apertur fokussierende Technik
L-SAFT	Synthetische Apertur fokussierende Technik mit Laser-Abtastung
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung, Berlin
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Berlin
DAfStB	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ISO	International Standardisation Organization
IEC	International Electrotechnical Commission
RILEM	Reunion Internationale Des Laboratories D'Essais Et De Recherches Sur Les Materiaux, mehr unter www.rilem.de
ASTM	American Society for Testing and Materials
SI	Internationales Einheitensystem

9. Literaturverzeichnis

- [ALOKA2000] Internet: www.aloka.de/pionier.htm
- [BAM2000] Borchardt, K., Wiggenhauser, H.: ZfP-Kompendium Bau, Internet-Version, Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, Berlin, 2000, unter www.bam.de/a_vii/vii_3/kompendium/welcome.html
- [BERGMANN1961] Bergmann, L.: Experimentalphysik I-II, 6. Aufl., Berlin 1961
- [CARINO1990-1] Carino, N.J., Sansalone, M.: Detection of voids in grouted ducts using the Impact-Echo method, RILEM-Workshop, Mainz, 5.-7. 3. 1990
- [CARINO1990-2] Carino, N.J., Sansalone, M.: Flaw detection in concrete using the Impact-Echo method, Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Edt. A.S. Nowak, Kluwer Academic Publishers, pp. 101-118
- [DAFSTB1991] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048, DAfStb-Heft 422, 1991
- [DEUTSCH1997-1] Deutsch, V., Platte, M., Vogt, M.: Ultraschallprüfung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997
- [DEUTSCH1997-2] Fa. Karl Deutsch, Datenblatt P14 N-11 zu den Prüfköpfen IE40/0,3-1, S40HB0,2-0,6, S40HB0,1-0,3, Wuppertal, 1997
- [DGZfP-A1] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung DGZfP: Richtlinie über Ausbildung, Eignung und Prüfung von Prüfwerkern der ZfP, Neue Fassung in Vorbereitung
- [DGZfP-A2] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung DGZfP: Richtlinie über die Qualifikation und Zertifizierung von Personal der Zerstörungsfreien Prüfung (Qualifikationsrichtlinie) Neue Fassung in Vorbereitung

-
- [DGZfP-A3] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung DGZfP: Richtlinie für die Anerkennung von Ausbildungsstätten durch die DGZfP (Anerkennungsrichtlinie) Neue Fassung in Vorbereitung
- [DGZfP-A4] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung DGZfP: Hinweise für die Zertifizierung von DGZfP-qualifiziertem Personal nach der amerikanischen Empfehlung SNT-TC-1 A: »Level Zertifikate«
- [DGZFP1996] DGZfP: NDT-Buyers-Guide, 2nd edition, DGZfP Berlin 1996
- [DGZFP1999] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) Merkblatt B4 für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien, Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile; DGZfP, Unterausschuß Ultraschallprüfungen, neue Ausgabe Berlin 1999
- [DIN 1045] Ausgabe:1988-07, Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- [DIN 54127-1] Ausgabe:1989-01, Zerstörungsfreie Prüfung; Justierung von Ultraschallprüfsystemen und Echohöhenbewertung
- [DIN EN 12668-1] Ausgabe:2000-07, Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 1: Prüfgeräte; Deutsche Fassung EN 12668-1:2000
- [DIN EN 12668-2] Ausgabe:1998-07, Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 2: Prüfköpfe; Deutsche Fassung prEN 12668-2:1998
- [DIN EN 12668-3] Ausgabe:2000-07, Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 3: Komplette Prüfausrüstung; Deutsche Fassung EN 12668-3:2000
- [DIN EN 13296] Ausgabe:1998-10, Produkte von Beton - Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit; Deutsche Fassung prEN 13296:1998

- [DIN EN 583-1] Ausgabe:1998-12, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundsätze; Deutsche Fassung EN
- [DIN EN 583-2] Ausgabe:1997-06, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 2: Empfindlichkeits- und Entfernungsjustierung; Deutsche Fassung prEN 583-2:1997
- [DIN EN 583-3] Ausgabe:1997-06, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 3: Durchschallungstechnik; Deutsche Fassung EN 583-3:1997
- [DIN EN 583-4] Ausgabe:2000-01, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 4: Prüfung auf Inhomogenitäten senkrecht zur Oberfläche; Deutsche Fassung prEN 583-4:1999
- [DIN EN 583-5] Ausgabe:1998-11, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 5: Beschreibung und Größenbestimmung von Unregelmäßigkeiten; Deutsche Fassung prEN 583-5:1998
- [DIN IEC 87/81/CDV] Ausgabe:1995-12, Ultraschall - Echtzeit-Impulsechoabtastsysteme - Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit (IEC 87/81/CDV:1995)
- [DIN V ENV 583-6] Ausgabe:2000-03, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 6: Beugungslaufzeittechnik, eine Technik zum Auffinden und Ausmessen von Inhomogenitäten; Deutsche Fassung ENV 583-6:2000
- [GERTHSEN1993] Gerthsen, C.: Physik, 17. Aufl., Springer, Berlin 1993
- [GROSSE1999] Grosse, C., Reinhardt, H.-W.: Ultraschallmessverfahren für Frischbeton als Mittel zur Qualitätssicherung, Plakat 29, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROM oder im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de , Berlin, 1999
- [GÜBL1996] Grübl, P., Kroggel, O., Jahnson, R., Ratmann, M.: Die zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen mit dem Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren. Beton- und Stahlbetonbau 12, pp.297-303, 1996

-
- [HALMSHAW1991] Halmshaw, R.: Non-Destructive Testing, 2nd Ed., London 1991
- [HASENPUSCH1991] Hasenpusch, O.: Hochspannungstechnik, Franzis-Verlag 1991
- [HEINZINGER1993] Heinzinger Electronic GmbH: Datenblatt zum HV-Netzgerät LNC 2000-3, Rosenheim 1993
- [HENSCHEN1998] Henschen, J.: Anwendungsoptimierung ZfPBau, BAM-Forschungsbericht, Berlin 1998
- [HILLGER1983] Hillger, W.: Verbesserung und Erweiterung von Ultraschallprüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen. Dissertation, TU Braunschweig, 1983
- [HILLGER1984-1] Hillger, W.: Entwicklung einer speziellen Ultraschallprüfelektronik zur Qualitätskontrolle von Fertigteilen aus Beton, Materialprüfung 26 (1984), Nr. 9, S. 310 - 315
- [HILLGER1984-2] Hillger, W.: Entwicklung einer speziellen Ultraschallprüfelektronik zur Qualitätskontrolle von Fertigteilen aus Beton, Institut für Strukturmechanik, TU Braunschweig, 1984
- [HILLGER1985] Hillger, W. , Neisecke, J.: Ultraschall-Impulstechnik zur automatischen, zerstörungsfreien Qualitätskontrolle von Fertigteilen aus Beton, Teil 1: Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 11, 1984, S. 769 - 773, Teil 2: Heft 3, 1985, S. 165 - 169
- [HILLGER1986] Hillger, W.: Defektoskopische Untersuchungen am Baustoff Beton mit einem neu entwickelten Ultraschallprüfsystem, Beton + Fertigteiltechnik, Heft 11, 1986, S. 742 - 746
- [HILLGER1991] Ingenieurbüro Dr.-Ing. Hillger: Handbuch zum Ultraschall-Prüfgerät NFUS 2000, Braunschweig 1991
- [HILLGER1993] Hillger, W.: Impuls-Echo-Technik an mineralischen Baustoffen. Materialprüfung 35 Vol. 5, 1993

-
- [HILLGER1994-1] Hillger, W.: Inspection of Concrete by Ultrasonic-Pulse-Echo-Technique, Proceedings of the 6th European Conference on Non Destructive Testing, Nice 1994, pp. 1159-1163
- [HILLGER1994-2] Ingenieurbüro Dr.-Ing. Hillger: Handbuch zum Ultraschall-Prüfgerät NFUS 2300, Braunschweig 1994
- [IBT1993] N.N.: US-Scan 2.0, Software-Manual, IBT GmbH Darmstadt, 1993
- [ILLICH1999] Illich, B.: Zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen an Mauer und Betonbauteilen mit Radar, Vortrag 9, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROM oder im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de , Berlin, 1999
- [ISO/DIS 8047] Ausgabe:1982-12, Festbeton; Bestimmung der Ultraschall-Ausbreitgeschwindigkeit
- [JANSOHN1998] Jansohn, R., Schickert, M.: Objective Interpretation of Ultrasonic Concrete Images. European Conference for Nondestructive Testing, Berichtsband 7thECNDT Conf., Vol. 1, pp 808-815, Kopenhagen 1998
- [JONAS1995] Jonas, M., Neisecke, J.: Applicability of ultrasonic frequency spectrum analysis to material testing of gypsum, cement and concrete. Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.1, pp. 393-400
- [JONAS1996] Jonas, M.: Einsatzmöglichkeiten der Ultraschallfrequenz-Analyse für die zerstörungsfreie Prüfung von mineralischen Baustoffen und Bauteilen. Dissertation, Universität Dortmund, 1996
- [KAPPHAHN1998] Kapphahn, G., Kaschmierzeck, K.-D.: Weserbrücke Drakenburg – Voruntersuchungen an den 41 Meter langen, vorgespannten Hauptlängsträgern. Wiss. Beiträge der MFPA Leipzig, Heft 3, 1998

- [KASCHMIERZECK1999] Kaschmierzeck, K.-D., Kapphahn, G., Liesaus, R.: Durchstrahlungsprüfung im Bauwesen - Erfahrungen aus der Praxis, Plakat 11, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROM oder im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de , Berlin, 1999
- [KEITHLEY1995-1] Keithley Electronics GmbH: DAS-4100, Handbuch zur Datenerfassungskarte, München 1995
- [KEITHLEY1995-2] Keithley Electronics GmbH: TestPoint 3.2, Handbuch zur Meßdatenerfassungs- und Auswertungs-Software, München 1995
- [KRAUSE1993] Krause, M., Wiggerhauser, H., Wilsch, G.: Advanced Pulse Echo Methods for Ultrasonic Testing of Concrete, in: Bungey, J. (Edt.), Non-destructive Testing in Civil Engineering, an International Conference, Northampton: The British Institute of Non-destructive Testing, pp. 821-827
- [KRAUSE1995] Krause, M., Bärman, R., Frielinghaus, R., Kretschmar, F., Kroggel, O., Langenberg, K.J., Mairhofer, C., Müller, W., Neisecke, J., Schickert, M., Schmitz, V., Wiggerhauser, H., Wollbold, F.: Comparison of pulse-echo methods for testing concrete, Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.1, pp. 281-296
- [KRAUSE1996] Krause, M.: Bildgebende Ultraschall-Impulsecho-Untersuchungen an Betonbauteilen. 33. Forschungskolloquium Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 10.-11.10.1996, BAM, DAF-Stb, Berlin, pp. 94-101
- [KRAUSE1997] Krause, M., Bärman, R., Frielinghaus, R., Kretschmar, F., Kroggel, O., Langenberg, K.J., Mairhofer, C., Müller, W., Neisecke, J., Schickert, M., Schmitz, V., Wiggerhauser, H., Wollbold, F.: Comparison of pulse-echo methods for testing concrete, NDT & E International 30, 195 (1997)

- [KRAUSE1999] Krause, M. Mielentz, F., Milman, B., Wiggerhauser, H.: Spannkanaluntersuchungen mit bildgebenden Ultraschall-Verfahren, Plakat 2, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROModer im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de, Berlin, 1999
- [KRAUTKRÄMER1976] Fa. Krautkrämer-Bransson: Das Krautkrämer-Taschenbuch, Hürth, 1976
- [KRAUTKRÄMER1986] Krautkrämer, H., Krautkrämer, J.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1986
- [KRAUTKRÄMER1997] Fa. Krautkrämer-Bransson: Messprotokoll Nr. 58723-514 Prüfkopf G0,2R1, Köln-Hürth 1997
- [KRIEGER1998] Krieger, J., Krause, M., Wiggerhauser, H., e.a.: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B 18, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1998
- [KRIEGER1999] Krieger, J.: Ultraschall- und Impact-Echo-Verfahren zur Zustandsuntersuchung von Spannkanälen, Vortrag 6, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROModer im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de, Berlin, 1999
- [KROGGEL1994] Kroggel, O., Jansohn, R., Ratmann, M.: Trennrisserkennung Beton- und Stahlbetonbau 89 (1994), H. 7, 189-191
- [KROGGEL1995] Kroggel, O., Jahnsohn, R., Ratmann, M.: Detection of Thickness, Voids, Honeycombs and Tendon Ducts Utilizing Ultrasonic Impulse Echo-Technique, Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28.09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.1, pp. 419ff

- [KROGGEL1999] Kroggel, O.: Aktuelle Fallbeispiele für erfolgreichen ZfP-Einsatz: -Nachweis der Dichtheit von Betonkonstruktionen entsprechend dem Wasserhaushaltsgesetz, - Estrichhaftung, Vortrag 8, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROModer im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de ,Berlin, 1999
- [KÖHLER1997] Köhler, B., Hentges, G., Müller, W.: A novel technique for advanced ultrasonic testing of concrete by using signal conditioning methods and a scanning laser vibrometer, in: J. Bungey, NDT in Civil Engineering, The British Institute of Non-destructive Testing, Liverpool, 1997
- [KUTTRUFF1988] Kuttruff, H.: Physik und Technik des Ultraschalls, Hirzel, 1988
- [LACH1996] Lach, M., Platte, M., Ries, A.:Piezoelectric materials for ultrasonic probes, Artikel im INTERNET: [www. NDT.net](http://www.ndt.net) - September 1996, Vol.1 No.09
- [LANGENBERG1997] K.-J. Langenberg, R. Baermann, R. Marklein, S. Irmer, H. Mueller, M. Brandfass, B. Potzkai: Electromagnetic and elastic wave scattering and inverse scattering applied to concrete. NDT & E International, Vol. 30, No. 4, pp. 205-210, 1997.
- [MAIERHOFER 1995-1] Maierhofer, C., Borchart, K., Henschen, J.: Application and Optimization of Impulse-Radar for Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.2, pp. 663-672
- [MAIERHOFER 1995-2] Maierhofer, C., Funk, T.: Auswertung von Radarmessungen im Bauwesen: Signalverarbeitung - Visualisierung - -Interpretation, in: DGZfP-Tagungsband Querschnittsseminar Bildverarbeitung

- [MAIERHOFER 1996-1] Maierhofer, C., Wiggerhauser, H., Brandfass, M. e.a.: Localization of Tendon Ducts behind Reinforcement in Concrete using Radar in Combination with Inverse scattering, Proceedings GPR96, 6th Int. Conference on Ground Penetrating Radar, Sendai, Japan, 1996
- [MAIERHOFER 1996-2] Maierhofer, C.: Elektromagnetische Impulsverfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung des Feuchtegehaltes in Beton, 33. Forschungskolloquium DAfStB, BAM, Berlin 1996
- [MAIERHOFER 1999] Maierhofer, C., Leipold, S., Wöstmann, J.: Strukturuntersuchungen in Beton mit dem Impulsradar, Vortrag 5, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROM oder im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de, Berlin, 1999
- [MALHOTRA1991] Malhotra, V.M., Carino, N.J.: Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Florida, USA 1991
- [MARKLEIN1996] Marklein, R., Langenberg, K.-J., Baermann, R., Brandfass, M.: Ultrasonic and Electromagnetic Wave Propagation and Inverse Scattering Applied to Concrete. In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15, pp. 1839-1848. Hrsg.: D. O. Thompson, D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, USA, 1996.
- [MARKLEIN1997] Marklein, R.: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik. Shaker Verlag, Aachen, 1997. (Zugl.: Dissertation, Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik, Fachbereich Elektrotechnik, Universität GH Kassel, Kassel, 1997.)
- [MATTHIES1998] Matthies, K.: Dickenmessung mit Ultraschall, DGZfP, Berlin, 1998
- [MAYER1990] Mayer, K., Marklein, R., Langenberg, K. J.: Three-dimensional imaging system based on Fourier transform synthetic aperture focusing technique, Ultrasonics 28: 241-255

- [MIELENTZ1999] Mielentz, F., Milman, B., Krause, M., Wiggerhauser, H.: Praxiseinsatz eines Ultraschallecho-Verfahrens zur Strukturuntersuchung von Betonbauteilen, Plakat 3, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROM oder im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de, Berlin, 1999
- [MÜLLER1996] Müller, W.: Betonprüfung 95, Saarbrücken, Fraunhoferinstitut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Nr. 960203-E
- [NEISECKE1974] Neisecke, J.: Ein dreiparametrisches, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen, Dissertation TU Braunschweig, 1974
- [NEISECKE1990] Neisecke, J.: Zerstörungsfreie Ultraschallprüfung im Bauwesen - Stand der Technik, Festschrift Hubert K. Hilsdorf, Hrsg. J. Kropp, Universität Karlsruhe, 1990
- [NEISECKE1991] Neisecke, J.: Ultraschallprüfung im Bauwesen - eine kritische Wertung, Vorträge und Plakatberichte Internationales Symposium Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, DGZfP-Berichtsband 21, Berlin, 1991
- [NEISECKE1998] Neisecke, J., Jonas, M., Wollbold, F.: Ultraschall - eine vorteilhafte Methode zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe, Festschrift Prof. Nils Valerian Waubke, Universität Wien, Österreich, 1998
- [NEISECKE1999] Neisecke, J., Wollbold, F.: Prüfung von Beton mit schneller, bildgebender Ultraschallechotechnik, in „Werkstoffe und Konstruktion III“, S. 173-182, ibidem-Verlag, Stuttgart 1999
- [ODLER1985] Odler, I., Abdul-Maula, S., Hennicke, U.: Verfolgung des Zementerstarrungsvorgangs aufgrund der Messungen der akustischen Leitfähigkeit. Mitteilungsblatt für die Amtliche Materialprüfung in Niedersachsen, Heft 24/25, 1985
- [OPPERMANN1991] Oppermann, G.: Grundlagen zur praktischen Anwendung Elektroviskoser Flüssigkeiten (EVF), Bayer AG, Zentrale Forschung und Entwicklung, 1991

-
- [OPPERMANN] Oppermann, G.: Elektroviskose Flüssigkeiten (EVF), Bayer AG, Zentrale Forschung und Entwicklung, o.D.
- [POHL1965] Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüf- und Messmethoden für Beton, 1. Aufl., VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1965
- [PÖPEL1995] Pöpel, M., Flohrer, C.: Combination of a covermeter with a RADAR System - an Improvement of RADAR Application in Civil Engineering, Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.1, pp. 737-743
- [REHM1973] Rehm, G., Waubke, N.V., Neisecke, J.: Ultraschall-Untersuchungsmethoden in der Baupraxis - Literatursichtung, Berichte aus der Bauforschung, Heft 84, Ernst&Sohn, Berlin 1973
- [RIEFORTH1999] Rieforth, F.: Untersuchung der Rissbildung an gewebearmerten, dünnen Putz- /Mörtelproben mittels Ultraschall, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1999
- [SANSALONE1989] Sansalone, M., Carino, N.J.: Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the Impact-Echo method. ACI Materials Journal, Vol. 86, Nr. 2, 1989
- [SANSALONE1995] Sansalone, M., Streett, W.: Use of the Impact-Echo Method and Field Instrument for Non-destructive Testing of Concrete Structures, Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.1, pp. 495-502
- [SCHICKERT1986] Schickert, G., Schnitger, D. (Hrsg.): Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Tagungsbericht, S. 102ff, DGZfP 1986
- [SCHICKERT1994] Schickert, M.: Einfluss der frequenzabhängigen Schallschwächung auf die Ultraschall-Laufzeitmessung an mineralischen Stoffen, DGZfP-Jahrestagung, Timmendorfer Strand, Mai 1994, Nr. 43, Teil 2, DGZfP, Berlin

- [SCHICKERT1995] Schickert, M.: Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete, Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.1, pp. 441-418
- [SCHICKERT1996] Schickert, M.: The Use of Ultrasonic-A-Scan and B-Scan and SAFT-Techniques for Testing Concrete Elements“, 2nd Int. Conference on Non-Destructive Testing of Concrete in the infrastructure, Nashville, USA, June 12-14 1996
- [SCHICKERT1998] Schickert, M.: Ein empirisches Modell der Dispersion von Ultraschall in Beton, DGZfP-Jahrestagung 1998, Berichtsband 63, Bamberg, Sept. 7-9, 1998
- [SCHICKERT1999] Schickert, M.: Ultraschall-Abbildungsverfahren zur Diagnose von Betonbauteilen, Plakat 17, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROM oder im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de , Berlin, 1999
- [SHEVALDYKIN1998] Shevaldykin, V.G.: Inspection of Concrete by Pulse-Echo Tomograph with dry contact. European Conference for Non-destructive Testing, Berichtsband 7thECNDT Conf., Vol. 1, pp 816-821, Kopenhagen 1998
- [SPEKTRUM 1996-10] Sohn, C.: Moderne Ultraschalldiagnostik in der Gynäkologie, Spektrum der Wissenschaft, Heft Oktober 1996
- [SPEKTRUM 1997-6] Sakas, G.: Dreidimensionale Bildrekonstruktion aus Ultraschall-Daten, Spektrum der Wissenschaft, Heft Juni 1997
- [SPEKTRUM 1998-5] Pöppe, C.: Zeitumkehrspiegel, Spektrum der Wissenschaft, S. 31-32, Heft Mai 1998
- [SPEKTRUM 2000-3] Fink, M.: Zeitumkehr-Akustik, Spektrum der Wissenschaft, S. 68-74, Heft März 2000
- [SPLITT1998] Splitt, G.: Piezocomposite Transducers - a milestone for Ultrasonic Testing, ECNDT Conf., Berichtsband Vol. 3 pp 2965-2970, Kopenhagen 1998

-
- [TEODORU1989] Teodoru, G.: Zerstörungsfreie Betonprüfungen, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [TIPLER1994] Tipler, P.: Physik, 1.Aufl., Spektrum, Berlin 1994
- [VITYUK1995] Vityuk, P.: The quality of measurement of ultrasonic speed into materials with great vibration damping , Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.2, pp. 1157-1163 NDT95
- [WOLLBOLD1995] Wollbold, F., Neisecke, J.: Ultrasonic-Impulse-Echo-Technique - Advantages of an Online-Imaging technique for the Inspection of Concrete. Proceedings of the International Symposium NDT in Civil Engineering, Berlin, 26.-28. 09. 1995: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vol.2, pp. 1135-1143
- [WOLLBOLD1998] Wollbold, F., Neisecke, J.: Ultrasonic Testing of Concrete with Fast Imaging Pulse-Echo-Technique. European Conference for Nondestructive Testing, Berichtsband 7th ECNDT Conf., Vol. 3, pp 3009-3016, Kopenhagen 1998
- [WOLLBOLD1999] Wollbold, F., Neisecke, J., Hillger, W., Kapphahn, G., Krause, M., Kroggel, O., Müller, W., Roye, W., Schickert, M.: DGZfP-Merkblatt B4 in aktualisierter Fassung: Merkblatt für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile. Plakat 26, DGZfP-Berichte zur Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21-22.1.99 in München, nur als CD-ROM oder im Internet erhältlich unter www.dgzfp.de , Berlin, 1999
- [WÜSTENBERG1991] Wüstenberg, H. Möglichkeiten und Konzepte für Ultraschall-Prüfköpfe speziell für das Bauwesen, in DGZfP Berichtsband 21, Teil 2 , S. 488, 1991

A1. Danksagungen

Die vorliegende Arbeit mit den beschriebenen Untersuchungen entstand in den Jahren 1992 bis 1999 während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkstoffe des Bauwesens der Universität Dortmund.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Neisecke danke ich ganz herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit, die stets gewidmete Betreuung und die Vielzahl der fruchtbaren, wissenschaftlichen Gespräche.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. U. Diederichs und Prof. Dr.-Ing. H. G. Schäfer gilt mein Dank für das Interesse an dieser Arbeit und Ihre Bereitschaft zur Mitbetreuung.

Den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls, des Institutes für Bauforschung sowie den Mitarbeitern der Experimentierhalle danke ich herzlich für die immer kompetente und anregende Zusammenarbeit. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. M. Jonas und Frau A. Kempka für die freundschaftliche Aufnahme am Lehrstuhl.

Herrn Dr.-Ing. W. Hillger danke ich herzlichst für die stets konstruktive Zusammenarbeit insbesondere bei der Weiterentwicklung des Ultraschallsystems.

Den Fachkollegen Dr. rer. nat. M. Krause und Dipl.-Ing. M. Schickert danke ich für die intensive Diskussion der Forschungsergebnisse.

Ein Teil dieser Arbeit baut auf Untersuchungen auf, die im Rahmen eines DFG-Forschungsthemas durchgeführt wurden. Der fördernden Institution sei an dieser Stelle nochmals gedankt.

A2. Lebenslauf

Name : Frithjof Wollbold
Geburtsdatum: 16. Mai 1965
Geburtsort: Hamm / Westfalen
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Familienstand: ledig



1971- 1975 Matthias-Claudius-Grundschule, Hamm.
1975 - 1984 Gymnasium Hammonense, Hamm.
30.9. 1984 Studienbeginn im Fach Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.
8.4. 1988 Vordiplom in Physik.
14.5. 1991 Diplom in Physik.
1.6. 1990 - 30.4. 1991 Studentische Hilfskraft an der Universität Münster.
1.5. 1991 - 31.12. 1991 Wissenschaftliche Hilfskraft an der Universität Münster.
1.9. 1992 - 31.3. 1999 Wissenschaftlicher Angestellter an der Universität Dortmund.
1.11.1999 - 31.10.2001 Gründung der PARA BioScience GmbH, Gronau.
seit 1.11.2001 Techn. Geschäftsführer d. PARA BioScience GmbH

Münster, im Februar 2002