

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG**

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Direktoren:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. K. Kordina

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

**VERBESSERUNGEN UND ERWEITERUNGEN VON
ULTRASCHALLPRÜFVERFAHREN ZUR ZERSTÖRUNGSFREIEN
FEHLSTELLEN- UND QUALITÄTSKONTROLLE VON
BETONBAUTEILEN**

von
Wolfgang Hillger

Heft 60

BRAUNSCHWEIG

1983

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG**

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Direktoren:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. K. Kordina

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

**VERBESSERUNGEN UND ERWEITERUNGEN VON
ULTRASCHALLPRÜFVERFAHREN ZUR ZERSTÖRUNGSFREIEN
FEHLSTELLEN- UND QUALITÄTSKONTROLLE VON
BETONBAUTEILEN**

von

Wolfgang Hillger

Heft 60

BRAUNSCHWEIG

1983

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1977/78 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffkunde, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig und in der Zeit von 1978 bis 1983 am Institut für Strukturmechanik der DFVLR Braunschweig.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Kordina danke ich für die Möglichkeit, an seinem Institut die Untersuchungen durchführen zu können und für die Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. J. Neisecke, der die Anregung zu dieser Arbeit gab und sie mit engagierter Diskussionsbereitschaft gefördert hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. N.V. Waubke, der den Mitbericht übernommen hat, danke ich für die ausführlichen wissenschaftlichen Diskussionen.

Herrn Dr.-Ing. H.W. Bergmann sei für die großzügig gewährte Möglichkeit gedankt, die Einrichtungen des DFVLR-Instituts für Strukturmechanik zur Fortsetzung der Untersuchungen zu nutzen.

Die Arbeit baut auf Untersuchungen auf, die im Auftrage des Landes Niedersachsens durchgeführt wurden. An dieser Stelle sei daher der fördernden Institution nochmals gedankt.

Den Kollegen und Mitarbeitern der Abteilung Physik des Instituts für Baustoffkunde, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig und der DFVLR Braunschweig, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, danke ich für die Unterstützung und die jederzeit gute Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	2
3. Theoretische Grundlagen der Ultraschallprüfung	4
3.1 Schallwellen	4
3.1.1 Schwingungen und Wellen	4
3.1.2 Wellenarten	5
3.1.3 Kennwerte des Schallfeldes	8
3.2 Schallwellen an ebenen Grenzflächen	8
3.2.1 Senkrechter Einfall	8
3.2.2 Schräger Einfall	11
3.3 Schallausbreitung in Baustoffen	12
3.3.1 Schallfeld des Prüfkopfes	12
3.3.2 Schallschwächung durch Absorption und Streuung	13
4. Ultraschallmeßverfahren und technischer Stand der bau- praktischen Anwendungen	15
4.1 Historischer Überblick	15
4.2 Impulslaufzeit-Verfahren	16
4.2.1 Meßprinzip und Geräte	16
4.2.2 Anwendungen	17
4.3 Intensitäts-Verfahren	20
4.3.1 Meßprinzip und Geräte	20
4.3.2 Anwendungen	22
4.4 Impuls-Echo-Technik	24
4.4.1 Meßprinzip	24
4.4.2 Voraussetzungen für die Anwendung der Impuls- Echo-Technik im Bauwesen	25
4.5 Ultraschallspektroskopie	27
4.5.1 Grundlagen der Frequenzanalyse	27
4.5.2 Meßprinzip und Anwendungen	28
5. Untersuchungen an piezoelektrischen Wandlern zur Ver- kürzung der Ultraschallimpulse	29
5.1 Piezoplatten zum Senden und Empfangen von Ultra- schallimpulsen	29
5.2 Abhängigkeit verschiedener Prüfköpfe infolge mecha- nischer und elektrischer Dämpfung	34
5.2.1 Meßprinzip	34
5.2.2 Meßergebnisse der mechanischen Dämpfung durch Ankopplung an den Baustoff Beton	35
5.2.3 Einfluß der elektrischen Dämpfung	38
5.3 Elektronische Reglung piezoelektrischer Wandler	39

5.3.1	Prinzip des Regelkreises und dessen Anwendung auf piezoelektrische Wandler	39
5.3.2	Entwicklung und Bau einer Regelelektronik	42
5.3.3	Meßergebnisse an verschiedenen Probekörpern	44
5.4	Auswahl der Prüfköpfe für grundlegende Ultraschalluntersuchungen am Baustoff Beton	50
6.	Entwicklung und Bau einer universellen Prüfelektronik für baupraktische Anwendungen	51
6.1	Anforderungen an eine universelle Prüfelektronik	51
6.2	Ultraschallsender	52
6.2.1	Breitbandsender	52
6.2.2	Sinus-Burst-Sender	54
6.2.3	Schmalbandsendetechnik	56
6.2.3.1	Prinzip	56
6.2.3.2	Aufbau eines Schmalbandsenders	57
6.3	Automatische Auswertung des Empfangssignals	60
6.3.1	Verstärkung und Gleichrichtung	60
6.3.2	Laufzeitmessung	63
6.3.3	Intensitätsmessungen	64
6.3.4	Frequenzanalyse	67
6.4	Vollautomatische Aufzeichnung von C-scans	69
7.	Ultraschallmessungen an Probekörpern mit künstlichen Fehlstellen	71
7.1	Probenbeschreibung	71
7.2	Optimierung der Parameter für Durchschallungsmessungen	74
7.2.1	Problemstellung	76
7.2.2	Prüffrequenzspektrum in Abhängigkeit von der Anregung	76
7.2.3	Tauchtechnik-Meßaufbau	79
7.2.4	Amplitudenortskurven fehlerhafter Proben bei unterschiedlichen Frequenzbereichen und Blendeneinstellungen	81
7.2.5	Einfluß der Prüffrequenz auf die Impulslaufzeit	87
7.3	Durchschallungsmessungen an der Probe 9	88
7.4	Untersuchungen zum Einsatz der Impuls-Echo-Technik	90
7.4.1	Problemstellung	90
7.4.2	Interpretation des Empfangssignals bei einseitiger Prüfkopfانpassung	92
7.5	C-Bilder als Ergebnis automatischer Tauchtechnikprüfungen	96
7.6	Ermittlung der optimalen Anregung zur Durchschallung größerer Bauteile	105

	Seite
7.7 Einsatz der Frequenzanalyse für defektoskopische Untersuchungen	108
8. Zerstörungsfreie Kontrolle der Zementsteinhydratation	111
9. Zusammenfassung	117
10. Verzeichnis der verwendeten Bezeichnungen und Symbole	126
11. Literaturverzeichnis	128

1. Einleitung

Die zerstörungsfreie Gütesicherung von Baustoffen und Bauwerken mit der Ultraschall-Impulstechnik gestaltet sich weitaus schwieriger als diejenige metallischer Werkstoffe, bei denen dieses Verfahren bereits seit Jahrzehnten mit großem Erfolg angewandt wird. Der Grund liegt in den sehr unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften. Bei homogenen metallischen Werkstoffen wird dem Ultraschall beim Durchgang relativ wenig Energie entzogen. Daher besteht die Möglichkeit, hochfrequente Prüfköpfe einzusetzen, die sehr kurze Schallimpulse erzeugen und ein stark gebündeltes Schallfeld in den Werkstoff abstrahlen. Die Ultraschallprüfung erfuhr besonders durch die Anwendung der Impuls-Echo-Technik eine starke Aufwärtsentwicklung. Die Prüfung im Stahl- und Maschinenbau erfolgt vielfach vollautomatisch, wobei die Ergebnisse in sogenannten C-scans protokolliert werden.

Im Gegensatz zur hochentwickelten Gerätetechnik mit einer großen Auswahl von Prüfköpfen sind für Untersuchungen am Baustoff Beton lediglich einfache Geräte für Durchschallungsmessungen erhältlich. Diese erlauben meist nur eine Impulslaufzeitmessung. Da ungedämpfte, niederfrequente Prüfköpfe verwendet werden, können infolge langen Ausschwingens und mangelnder Richtcharakteristik Fehlerechos nicht erfaßt werden. Die Prüfung kann nur erfolgen, wenn das Bauteil von zwei Seiten zum Anbringen des Sende- und Empfangsprüfkopfes zugänglich ist.

Seit 1950 sind im verstärkten Maße Bemühungen festzustellen, das Ultraschall-Laufzeitverfahren als eine Standardprüfmethode für das Bauwesen weiterzuentwickeln. Die Ergebnisse blieben meist unter denen von der Baupraxis gestellten Anforderungen zurück, wenn das Verfahren auf eine Ultraschallmeßgröße beschränkt blieb und dazu benutzt wurde, absolute Größen zu bestimmen. Da kein funktioneller Zusammenhang zwischen longitudinaler Schallgeschwindigkeit und Materialkennwerten wie z.B. der Druckfestigkeit besteht, blieben die Bemühungen häufig ohne Erfolg und wurden deshalb wieder zurückgestellt.

Wie auch bei metallischen Werkstoffen liegt die Stärke der Ultraschallprüfung im Bauwesen bei Relativmessungen, die

gestatten, Veränderungen am Bauwerk oder Baustoff zu ermitteln, die z.B. durch Überlastung, Änderung der Zusammensetzung oder ungleichmäßige Verarbeitung aufgetreten sind. Untersuchungen in den letzten Jahren haben gezeigt, daß es bei Schadensfeststellungen möglich ist, die immer noch übliche zerstörende Prüfung stark zu beschränken, da sich mit Hilfe der relativen Ultraschallmessungen Bereiche am Bauteil ermitteln lassen, aus denen gezielt Bohrkerne gezogen oder Testbohrungen unternommen werden sollen. Es ist deshalb sinnvoll, die Relativverfahren technologisch so weiterzuentwickeln, daß defektoskopische Untersuchungen am Baustoff Beton noch eindeutiger Ergebnisse liefern.

2. Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfung am Baustoff Beton bezüglich der Defektoskopie weiter zu erhöhen, um diesem zerstörungsfreien Prüfverfahren zu einem größeren Durchbruch zu verhelfen. Dieses Vorhaben erfordert Untersuchungen an Prüfköpfen, die Entwicklung und den Bau einer Meßelektronik und eine Optimierung der Meßparameter für den Nachweis von künstlich eingebrachten Fehlern an erhärteten Betonproben.

Im Hinblick auf die Anwendung der Impuls-Echo-Technik ist besonders das Problem der zu langen Impulse zu klären, die bisher durch ungedämpfte Prüfköpfe erzeugt werden. Zunächst gilt es, ein Meßverfahren für die tatsächliche Dauer des in den Werkstoff eingeschallten Impulses anzugeben. Eine Ermittlung der Impulslänge mit dem Empfangsprüfkopf bei Durchschallungsmessungen ist nicht möglich, da das Empfangssignal von Störechos beeinflußt wird.

Es ist ferner zu untersuchen, ob die üblichen ungedämpften Prüfköpfe mit Hilfe einer elektronischen Regelung so weit gedämpft werden können, daß das Ausschwingen nach erfolgtem Sendeimpuls die Echos nicht mehr "übertönt". Falls diese Bemühungen nicht erfolgreich sind, muß nach Auswegen gesucht werden, die darin liegen können, andere Sonden für die Messungen zu erproben oder spezielle Prüfköpfe zu entwickeln.

Besonders wichtig ist die Entwicklung einer verbesserten Meßelektronik. Hierzu gehören unterschiedliche Sender, um Untersuchungen mit verschiedenen Anregungstechniken durchführen zu können, die einerseits ausreichend akustische Energie in einem schmalen Frequenzbereich zur Verfügung stellen und andererseits Impulse mit begrenzter Dauer erzeugen.

Die Auswertung des Empfangssignals wurde bisher nur bezüglich der Laufzeit automatisiert. Die Beschränkung auf eine Meßgröße allein reicht jedoch im allgemeinen nicht aus. Das Empfangssignal ist derart aufzuarbeiten, daß eine objektive Anzeige bezüglich fehlerbehafteter Stellen möglich wird und die "natürliche" Inhomogenität infolge der unterschiedlichen Zuschlagkörnung keine Anzeige hervorruft. Der automatischen Intensitätsmessung muß besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da diese im Vergleich zur Impulslaufzeitmessung für defektoskopische Untersuchungen ein empfindlicheres Nachweisverfahren darstellt. Zur Auswertung muß ein noch zu optimierender Zeitbereich aus dem Empfangssignal ausgeblendet werden.

Um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten, soll eine Frequenzanalyse der Ultraschallsignale möglich sein. Eine Kontrolle des Sendeimpulses, der Prüfköpfe und des Empfängers, also der gesamten Meßtechnik, ließen sich damit durchführen. Ferner kann die Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfung mit dem Vergleich der Amplitudenspektren in fehlerfreien und fehlerbehafteten Bereichen unter Umständen erhöht werden. Zunächst soll die Aufnahme des Frequenzspektrums dazu dienen, das bei den Prüfungen verwendete Frequenzband anzugeben, da dieses auf die Fehlerauflösung einen entscheidenden Einfluß hat.

Messungen an erhärteten Betonproben mit unterschiedlichen, künstlich eingebrachten Fehlern sollen schließlich dazu dienen, die Parameter zu optimieren und die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Meßverfahren aufzuzeigen.

Bei der Beobachtung des Hydratationsverlaufs einer Zementpaste aus PZ 35 F ist zu klären, ob ein Einsatz der Frequenzanalyse als weiterer Parameter neben Intensitäts- und Laufzeitmessungen

zusätzliche Informationen geben kann.

Vor den Beschreibungen der durchgeführten Untersuchungen in Kap. 7 und 8 sind für den interessierten Leser, der sich bisher noch nicht mit Ultraschallprüfungen beschäftigt hat, die wichtigsten Grundlagen aus der Sicht des Bauwesens in Kap. 3 zusammengestellt und in Kap. 4 die Ultraschallmeßverfahren und den Stand der baupraktischen Anwendungen angegeben. Nach den Untersuchungen an piezoelektrischen Wandlern (Kap. 5) bestand die Notwendigkeit, ein Kapitel über die Beschreibung der speziell entwickelten Meßtechnik einzufügen, da bisher derartige Ultraschallelektroniken im Bauwesen noch nicht zum Stand der Technik gehören, und um Nachfolgern die unbedingt notwendigen Informationen anhand von Blockschaltbildern und Oszillogrammen zu geben.

3. Theoretische Grundlagen der Ultraschallprüfung

In diesem Kapitel sind die theoretischen Grundlagen der Ultraschallprüfung in Bezug auf baupraktische Anwendungen zusammengestellt. Ausführlichere und umfassendere Darstellungen finden sich bei Krautkrämer [1], Bergmann [2] und Mataushek [3].

3.1 Schallwellen

3.1.1 Schwingungen und Wellen

Die periodische Änderung eines Massepunktes, z.B. die Bewegung einer kleinen Masse, welche an einer Feder aufgehängt ist, wird als Schwingung bezeichnet. Eine Auftragung des Weges der schwingenden Masse über die Zeit ergibt eine Sinuskurve. Eine harmonische Schwingung ist danach durch die Gleichung

$$x(t) = r \sin \alpha \quad (3.1)$$

beschrieben. x bezeichnet die momentane Auslenkung, t die Zeit, $\alpha = \omega t$ die Phase, wobei ω als Winkelgeschwindigkeit bezeichnet wird. Die Schwingungsdauer T bezeichnet die Zeit zwischen zwei Nulldurchgängen in gleicher Richtung. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde ist die Frequenz f

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

Die Kreisfrequenz ω ergibt sich aus

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.3)$$

Aus einer Schwingung entsteht eine elastische Welle, wenn alle Stoffteilchen (Masseteilchen) einer Ebene im gleichen Takt zu sinusförmigen Schwingungen, z.B. durch einen Prüfkopf (Sender) angeregt werden. Diese Erregung pflanzt sich mit der für das Medium charakteristischen Ausbreitungsgeschwindigkeit v fort. Diese Schallgeschwindigkeit v ist mit den elastischen Eigenschaften des Werkstoffs verknüpft und läßt sich mit Hilfe der Gleichung (3.4)

$$v = \frac{l}{t} \quad (3.4)$$

aus Messungen des Laufweges l und der Laufzeit t leicht ermitteln. Eine wichtige Größe bei der Werkstoffprüfung mit Ultraschall ist die Wellenlänge λ . Sie ergibt sich aus den regelmäßigen Abständen der schwingenden Teilchen, die jeweils in der Schwingungsphase übereinstimmen. Die Wellenlänge λ errechnet sich aus

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.5)$$

Da v eine Werkstoffkonstante ist, läßt sich λ durch Wahl der Erregungsfrequenz f (Prüffrequenz) frei wählen. Für die Werkstoffprüfung mit Ultraschall werden üblicherweise Frequenzen von 1 bis 10 MHz gewählt, da es sich meist um homogene metallische Werkstoffe handelt. Die Wellenlänge liegt dann im Millimeterbereich. Für die Prüfung von Bauteilen aus Beton müssen jedoch aufgrund des stark inhomogenen Gefüges und der damit verbundenen hohen Schallschwächung (vgl. 3.3.2) Frequenzen um $f = 100$ kHz gewählt werden. Bei einer mittleren longitudinalen Schallgeschwindigkeit im Beton von $v_L = 4000$ m/s erhält man Wellenlängen von 4 cm, damit ergibt sich auch etwa die Größe einer Fehlstelle, die noch gut nachweisbar ist.

3.1.2 Wellenarten

Die am häufigsten in der Werkstoffprüfung vorkommende Wellenform

ist die Longitudinalwelle (Bild 3.1a). Sie ist dadurch charakterisiert, daß alle Teilchen in Ausbreitungsrichtung schwingen. Andere Bezeichnungen für diese Wellenform sind Dichtewelle, Druck- oder Kompressionswelle. Sie hat von allen elastischen Wellen in Festkörpern die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit. Als Beispiel seien die hörbaren Schallwellen in der Luft genannt. Longitudinalwellen breiten sich ebenso in flüssigen wie in festen Medien aus. Bei der Betonprüfung werden

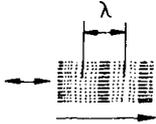
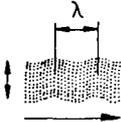
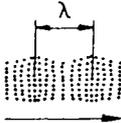
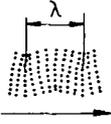
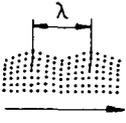
Wellenart	Teilchenbewegung	Ausbreitungsgeschwindigkeit
a) Longitudinalwelle		$v_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (3.6)$
b) Transversalwelle		$v_T = \sqrt{\frac{E \cdot 1}{\rho \cdot 2(1 + \mu)}} \quad (3.7)$
c) Dehnwelle		$v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.8)$
d) Biegewelle		$v_B = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot F}} \quad (3.9)$
e) Oberflächenwelle		$v_0 = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 - \mu} \cdot v_T \quad (3.10)$

Abb. 3.1: Elastische Wellen in festen Baustoffen

meist Longitudinalwellen benutzt. Die in der Abb. 3.1 angegebene Gleichung 3.6 beschreibt den Zusammenhang der Ausbreitungsgeschwindigkeit v_L mit den elastischen Konstanten, dem Elastizitätsmodul E , den Poissonkonstanten μ und der Dichte ρ . In Bauteilen aus Beton, wie auch in anderen festen Körpern, kann sich noch eine Transversalschelle (Bild 3.1b) ausbreiten. Wie schon der Name besagt, schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Erzeugt werden diese Teilchen durch eine an der Bauteiloberfläche periodisch wirkende Schubkraft, so daß die Teilchen sinusförmig auf- und abbewegt werden. Im Baustoff kann eine Schub- oder Scherkraft auf die Teilchen der folgenden Ebenen übertragen werden, damit ist eine Ausbreitung der Scher- oder Schubwelle, wie die Transversalwelle auch genannt wird, möglich. In Gasen und Flüssigkeiten können keine Schubkräfte übertragen werden, daher können sich dort keine Transversalwellen ausbreiten. Erfahrungsgemäß ist die Schallgeschwindigkeit $v_T \cong 0,5 v_L$, so daß sich bei gleicher Prüffrequenz eine halb so große Wellenlänge ergibt. Eine ungestörte Wellenausbreitung erhält man nur bei unendlich ausgedehnten Medien. Bei Bauteilen sind daher die Mindestabmessungen B für die Schallprüfung wichtig. Die Bedingung $B > 2\lambda$ wird meist in der Literatur angegeben. Bei einer Prüffrequenz von 50 kHz ($\lambda = 8$ cm) sollten die Abmessungen 20 cm betragen (vgl. Neisecke [4]).

Bei kleineren Bauteilabmessungen können die elastischen Konstanten nicht mehr über die Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt werden, da in diesen Fällen Sonderformen von Wellen auftreten. Es ist dann immer noch möglich, Relativverfahren bei der Schallprüfung anzuwenden, mit denen z.B. bei Serienprüfungen von Bauteilen Fehler nachgewiesen werden können.

Stabwellen treten auf, wenn die Länge des Stabes größer als λ , der Durchmesser jedoch kleiner als λ ist. Je nach Anregungsart mit Longitudinal- oder Transversalwellen entstehen Dehn- oder Biegewellen (Abb. 3.1c und d).

Die Oberflächenwelle (Abb. 3.1e) oder auch Rayleigh-Welle breitet sich nur an Grenzflächen eines Bauteils aus. Daneben gibt es noch verschiedene Arten von Plattenwellen, die zum Teil auch für die Werkstoffprüfung verwendet werden.

3.1.3 Kennwerte des Schallfeldes

Die wichtigste Größe des Schallfeldes ist der Schalldruck (Schallwechseldruck) p . Nach Bergmann [2] stehen Schalldruck und Teilchenausschlag ξ bei Ebenen- und Kugel-Wellen in folgendem Zusammenhang:

$$p = \rho v \omega \xi \quad (3.11)$$

Das Produkt aus Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit v bezeichnet man als Schallwellenwiderstand (Schallimpedanz, Schallwiderstand)

$$z = \rho v \quad (3.12)$$

Stoffe mit hohem Schallwiderstand werden als schallhart bezeichnet, das Gegenteil ist schallweich. Für Beton erhält man die Schallimpedanz ($\rho = 2,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $v_L = 4000 \text{ m/s}$):

$$z_B = 2,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^3 \text{ m/s} = 9,2 \cdot 10^6 \text{ kg/ms} = 9,2 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$$

Die Intensität J ist dem Quadrat des Schalldrucks proportional:

$$J = \frac{1}{2} \frac{p^2}{z} = \frac{1}{2} z \omega^2 \xi^2 \quad (3.13)$$

Die Prüfköpfe geben eine elektrische Spannung ab, die proportional zur Schalldruckamplitude ist. Zur Ermittlung der Intensität muß die vom Prüfkopf abgegebene Spannung quadriert werden.

3.2 Schallwellen an ebenen Grenzflächen

3.2.1 Senkrechter Einfall

Für die Werkstoffprüfung ist das Verhalten von Schallwellen an Grenzflächen wichtig. Grenzflächen können Bauteilaußenflächen sowie Fehlstellen, z.B. Hohlräume im Bauteil selbst sein. An einer glatten Grenzfläche entsteht eine Reflexion, an einer

rauen Streuung. Die Begriffe glatt und rauh sind in der Größenordnung der Wellenlänge zu sehen.

Trifft eine ebene Welle, z.B. im Beton, auf eine Grenzfläche, die vereinfacht als glatte und ebene Fläche angenommen werden soll, so geht eine ebene Welle durch die Grenzfläche hindurch und ein Teil wird von ihr reflektiert. Die reflektierte Welle läuft genau entgegengesetzt zur einfallenden.

Der Stoff 1 hat den Schallwiderstand $z_1 = \rho_1 v_1$ (vgl. 3.12), die einfallende Welle den Schalldruck p_e , die reflektierte Welle p_r und die durchgehende Welle p_d , wobei der Stoff 2 den Schallwiderstand $z_2 = \rho_2 v_2$ hat. Die dimensionslosen Zahlenwerte, der Reflexionsfaktor R und der Durchlässigkeitsfaktor D sind wie folgt definiert:

$$R = \frac{p_r}{p_e} \quad \text{und} \quad (3.14)$$

$$D = \frac{p_d}{p_e} \quad (3.15)$$

R und D lassen sich aus den Schallwiderständen z_1 und z_2 berechnen:

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (3.16)$$

$$D = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad (3.17)$$

Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktor sollen nun am Beispiel eines luftgefüllten Hohlraumes im Beton berechnet werden:

Beton: $z_B = 9,2 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$ (vgl. 3.12)

Luft: ($\rho_L = 1,3 \text{ kg/m}^3$, $v_L = 333 \text{ m/s}$) $z_L = 4,3 \cdot 10^2 \text{ Ns/m}^3$

In den beiden Gleichungen (3.16) und (3.17) eingesetzt, ergeben sich R und D zu

$$R = -0,9999 \quad D = 0,0001$$

Die reflektierte Welle hat -99,99 % des Schalldrucks der einfallenden Welle, die durchgehende nur 0,01 %. An einem luftgefüllten Hohlraum im Beton tritt praktisch eine Totalreflexion auf. Das Minuszeichen deutet auf einen Phasensprung um 180° der reflektierten Welle hin. Eine Phasenumkehr tritt immer bei einer Reflexion am schallweichen Stoff auf (z_2 ist kleiner als z_1 in Gl. 3.16).

Wird der angenommene Hohlraum im Beton mit Wasser aufgefüllt (z.B. bei einer Laborprobe), so folgt $z_{\text{H}_2\text{O}} = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$

$$R = -0,7196 \quad \text{und} \quad D = 0,2804,$$

d.h. selbst wassergefüllte Hohlräume reflektieren noch rund 72 % der einfallenden Welle und lassen sich mit einer Ultraschallprüfung nachweisen. R und D sind auf den Schalldruck bezogen, der auch von den Prüfköpfen gemessen wird. Es gilt

$$p_e + p_r = p_d \quad (3.18)$$

oder

$$1 + R = D \quad (3.19)$$

Für die Bilanz der Intensitäten J muß die Gleichung (3.20)

$$J_e = J_r + J_d \quad (3.20)$$

gelten. Zur Ermittlung der prozentualen Anteile der reflektierten und durchgelassenen Schallintensitäten an einer ebenen Grenzfläche dienen die Gleichungen (3.21) und 3.22), die den Reflexionsgrad r und den Durchlässigkeitsgrad d angeben:

$$r = \left[\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right]^2 \quad (3.21)$$

$$d = \frac{4z_2 z_1}{(z_2 + z_1)^2} \quad (3.22)$$

Hier gilt aufgrund der Energiebilanz

$$r + d = 1 \quad (3.23)$$

In der Literatur werden teilweise Reflexionsgrad und Reflexionsfaktor (bzw. Durchlässigkeitsgrad und -faktor) unterschiedlich definiert. Um Verwechslungen zu vermeiden, werden hier beide angegeben. Da die Prüfköpfe eine zum Schalldruck proportionale elektrische Spannung abgeben, ist es günstiger, mit den Gleichungen (3.16) und (3.17) zu arbeiten. Die Informationen über die Phasenlage (Vorzeichen von R) geht bei der Betrachtung der Intensitäten verloren, da sich J proportional zu p^2 (vgl. 3.13) verhält.

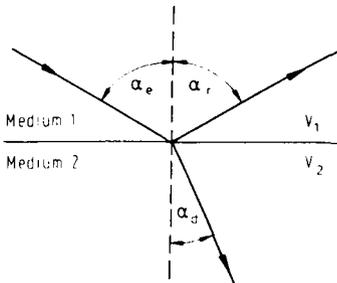


Abb. 3.2

Reflexion und Brechung einer ebenen Welle bei schrägem Einfall an einer ebenen Grenzfläche zwischen zwei Medien

3.2.2 Schräger Einfall

Die einfallende Welle mit dem Winkel α_e zum Lot (Abb. 3.2) wird mit dem gleichen Winkel α_r wieder reflektiert. Ein Teil dringt in das Medium 2 unter dem Winkel α_d ein. Dabei gilt das aus der Optik bekannte Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha_e}{\sin \alpha_d} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.24)$$

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, daß sich mit Hilfe der Gleichung (3.24) eine Wellenart in eine andere umformen läßt. Eine Anwendung wird von Volkwein [5] beschrieben, wo Natursteinproben über Wasserankopplung geprüft werden. Dort werden Longi-

tudinalwellen ($v_1 =$ Schallgeschwindigkeit im Wasser) mit einem entsprechenden Winkel α_e eingeschallt, so daß sich im Gestein Transversalwellen ($v_2 =$ Transversalwellengeschwindigkeit) unterhalb der Oberfläche ($\alpha_d = 90^\circ$) ausbreiten und erneut als Longitudinalwellen empfangen werden können. Mit dem Brechungsgesetz besteht die Möglichkeit, exakt eine Wellenlänge "herauszufiltern". Diese Möglichkeit wurde bei der Betonprüfung bisher noch nicht eingesetzt.

3.3 Schallausbreitung in Baustoffen

3.3.1 Schallfeld des Prüfkopfes

Ein am Bauteil angekoppelter Sender erzeugt darin ein Schallfeld, welches sich in Nah- und Fernfeld einteilen läßt (vgl. Schlengermann [6]). Das Nahfeld ist durch Interferenzextrema gekennzeichnet und reicht von der Schallquelle bis zur Entfernung N

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (3.24)$$

Das Schallbündel, welches im Nahfeld einen nahezu konstanten Durchmesser D (Schwingerdurchmesser) hat, öffnet sich im Abstand N (Abb. 3.3) mit dem Divergenzwinkel γ

$$\sin \gamma = 1,2 \lambda/D \quad (3.25)$$

Bei hohen Prüffrequenzen wird die Wellenlänge λ sehr klein im Verhältnis zum Schwingerdurchmesser D. Man erhält dadurch einen gerichteten Schallstrahl mit kleinem Divergenzwinkel γ und einer großen Nahfeldlänge. Mit dem für den Baustoff Beton notwendigen niederfrequenten Ultraschall und damit verbundenen Wellenlängen zwischen 4 und 8 cm kann sich kein Nahfeld ausbilden, wenn übliche Schwingerdurchmesser von $D = 5$ cm verwendet werden, da N in Gleichung 3.24 negativ wird. Ebenso wird der Divergenzwinkel größer als 90° . Damit breitet sich die Schallenergie auf konzentrischen Kugelflächen um den Sender herum aus.

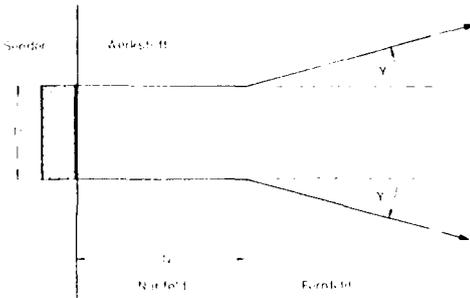


Abb. 3.3

Schallausbreitung vor dem Sender im Baustoff

3.3.2 Schallschwächung durch Absorption und Streuung

Bei einer Kugelwelle nimmt die Amplitude des Schalldrucks umgekehrt proportional zum Abstand vom Sender ab. Neben dieser geometrischen, vom Werkstoff unabhängigen Schallschwächung haben Werkstoffe Einflüsse, die den Schall zusätzlich schwächen. Die Ursachen sind Streuung und Absorption. Beide Begriffe werden mit dem Begriff Schwächung zusammengefaßt. Der Schalldruck nimmt aufgrund der Schwächung allein entsprechend der Gleichung 3.26 exponential ab:

$$p(x) = p_0 e^{-\alpha x} \quad (3.26)$$

p_0 ist der Schalldruck beim Aussenden, $p(x)$ der Schalldruck im Abstand x vom Sender und α der Schwächungskoeffizient. In der Literatur wird häufig α auf die Intensität J bezogen. Da $J \sim p^2$ ist, ergibt sich für α_J

$$\alpha_J = 2\alpha \quad (3.27)$$

Formal läßt sich der Schwächungskoeffizient α in zwei Terme aufspalten:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (3.28),$$

wobei α_a den Absorptions- und α_s den Streukoeffizienten darstellen.

Die Absorption wächst etwa proportional mit der Frequenz an. Ihre Ursache liegt in der Umwandlung von akustischer Energie in Wärme. Anschaulich geschieht das durch Bremsen der Teilchenschwingungen, wobei bei schnellerem Schwingen mehr Energie umgewandelt wird als bei niedrigem. Die Absorption läßt sich durch höhere Sendespannung und Verstärkung im Empfänger prinzipiell ausgleichen, ferner durch ein Ausweichen zu niedrigeren Prüffrequenzen. Für den Werkstoff Beton rufen Veränderungen des Zementsteins und Art und Menge des Zuschlages Änderungen in der Schallabsorption hervor, Veränderungen der Sieblinie, d.h. Veränderungen der Korngröße beeinflussen dagegen die Streuung. Im Gegensatz zur Absorption läßt sich die Streuung nicht durch höhere Verstärkung und Sendespannung ausgleichen. Sie ist z.B. vergleichbar mit der Wirkung des Nebels, durch den der Autofahrer mit seinen eigenen Scheinwerfern gestört wird. Durch Streuung wird nicht nur das Schallsignal geschwächt, sondern es werden auch zahlreiche Echos verschiedener Laufzeiten erzeugt, die die Auswertung des echten Fehlerechos unter Umständen verhindern. Streuung tritt immer dann auf, wenn Inhomogenitäten kleiner als die Wellenlänge λ sind. Als Inhomogenitäten sind Grenzflächen zu bezeichnen, an denen eine sprunghafte Veränderung des Schallwiderstandes festzustellen ist. Inhomogenitäten, deren Durchmesser d_k unter $1/3$ der Wellenlänge liegt, werden nicht erfaßt. Mit zunehmender Größe steigt die Streuung mit der 3. Potenz des Durchmessers und der 4. Potenz der Frequenz an [7]:

$$\alpha_s \sim d_k^3 f^4 \quad (3.29)$$

Bei der Betonprüfung ($\lambda = 4 \dots 10$ cm) verursachen Poren, Zuschlagkörner und Mikrorißflächen ab 1 mm bereits Streuungen, die mit zunehmendem Durchmesser mit der 3. Potenz anwachsen. Einzelne kleine Poren werden vom Ultraschall nicht wahrgenommen, erst eine Häufung von kleinen Fehlstellen verursacht eine Schallschwächung. Damit ist eine Homogenitätskontrolle z.B. bei Serienbauteilen aus Beton möglich, wobei unterschiedliche Verdichtung oder Veränderungen der Sieblinie über eine Schallschwächungsmessung ermittelt werden können. Erreichen die Inhomogenitäten die Größenordnung der Wellenlänge λ , treten Reflexionen und Brechungen auf.

Bei üblichen Ultraschallmessungen kann nicht zwischen α_s und α_a unterschieden werden, da die Schallschwächung insgesamt den Schalldruck am Empfänger bestimmt. Die Schallschwächung kann aus zwei Messungen mit unterschiedlichen Schallwegen (Längs- und Querdurchschallung) ermittelt werden [8].

$$\begin{aligned} A_1 \sim p_1 &= k \frac{1}{x_1} p_0 e^{-\alpha x_1} \\ A_2 \sim p_2 &= k \frac{1}{x_2} p_0 e^{-\alpha x_2} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{\ln(p_1 x_1) - \ln(p_2 x_2)}{x_2 - x_1} \quad (3.30)$$

In der vorliegenden Arbeit soll die Schallschwächung dazu benutzt werden, um bei verschiedenen Schallwegen im Baustoff Beton die Empfangsamplitude abschätzen zu können. Dabei liegt der Schwerpunkt darin, keine Materialkonstanten, sondern Materialfehler analog zur Werkstoffprüfung homogener Metalle nachzuweisen.

Durch den sehr inhomogenen Aufbau des Betons ist die Schallschwächung, im Vergleich zu Metallen, wo die Ultraschallprüfung besonders erfolgreich eingesetzt wird, besonders hoch. Während dort mühelos mit Frequenzen von 1 bis 10 MHz gearbeitet werden kann, beschränkt sich der Frequenzbereich bei der Betonprüfung im Bereich unter 200 kHz, häufig werden 50 kHz benutzt.

4. Ultraschallmeßverfahren und technischer Stand der baupraktischen Anwendungen

4.1 Historischer Überblick

Eine der ältesten zerstörungsfreien Prüfverfahren ist die Schallprüfung: grobe innere Fehler in Schmiedeteilen lassen sich am veränderten Klang feststellen, wenn sie mit dem Hammer angeschlagen werden. Porzellanprodukte können ebenfalls durch veränderten Klang auf Sprünge geprüft werden. Mit elektrischen Schallerzeugern lassen sich Wellen über den menschlichen Hörbereich hinaus herstellen. Die Anfänge der Ultraschallprüfung liegen etwa im Jahre 1929, als Sokolow [9] Werkstücke durchschallte und Fehler durch eine Intensitätsabnahme nachwies.

In den Jahren 1938/39 liegen die Anfänge der Ultraschallprüfung im Bauwesen. Erste Versuche von Meyer, Buchmann und Bock [10, 11] wurden mit magnetostriktiven Ultraschallgeräten unternommen.

Im Vergleich zu homogenen metallischen Werkstoffen gestaltet sich die Ultraschallprüfung am Beton weitaus komplizierter, deshalb und wohl auch infolge des zweiten Weltkrieges wird erst wieder zu Beginn der fünfziger Jahre von Jones [12, 13, 14], Leslie und Cheesman [15] und Witehurst [16] über baupraktische Ultraschallanwendungen berichtet. Grundlegende Arbeiten an der Technischen Universität Braunschweig führten Eisenmann [17, 18, 19], Steinkamp [20, 21] und Odewald [19] durch, die von Kordina, Roy und Waubke [22, 23, 24, 25, 26, 27] fortgesetzt wurden. Rehm, Waubke und Neisecke [28] veröffentlichten eine umfassende Literatursichtung, die Beiträge bis zum Jahre 1970 enthält. Neisecke und Waubke [29] erweiterten bei defektoskopischen Untersuchungen das Ultraschallprüfverfahren mit der Intensitätsmessung.

Die vorliegende Arbeit schließt an die Untersuchungen von Neisecke [4, 30] an.

4.2 Impulslaufzeit-Verfahren

4.2.1 Meßprinzip und Geräte

Die baupraktische Anwendung der Ultraschallprüfung beschränkt sich meist nur auf die Messung der longitudinalen Impulslaufzeit. Abb. 4.1 zeigt das Meßprinzip. Ein Generator erzeugt kurze Spannungsimpulse, die zur Anregung des Sendeprüfkopfes benutzt werden und gleichzeitig über den Triggereingang eines Oszilloskops die Ablenkung der Kathodenstrahlröhre starten. Synchron zur Ausbreitung der elastischen Welle im Baustoff bewegt sich der Elektronenstrahl horizontal über den Bildschirm. Da der Vertikaleingang mit dem Empfängerprüfkopf verbunden ist, erfolgt eine Auslenkung des Elektronenstrahls bei Ankunft des Schallimpulses am Empfängerkopf. Die Ordinate der Bildröhre ist in Zeiteinheiten, z.B. 0,1 ms/Teil geeicht und erlaubt deshalb die Ermittlung der Impulslaufzeit aus der Entfernung zwischen dem Strahlanfang (links auf dem Schirm) und dem Einsatz des Empfangsimpulses. Bei den üblichen Laufzeitmeß-

geräten erfolgt die Messung elektronisch über einen Zähler mit mehrstelliger Zifferanzeige direkt in μs . Die elektronische Schaltungstechnik beschreiben Datta und Anad [31]. Auf eine Bildschirmanzeige wird verzichtet. Geräte dieser Art sind z. B. das Prüfgerät BT-2 der Firma Terratest, das Gerät "Pundit" (Portable Ultrasonic Nondistractive Indicating Tester, vgl. [32]), entwickelt am Institut TNO für Baumaterialien in Delft/Holland, und das Gerät BP III von Steinkamp [21]. Alle Geräte zeichnen sich durch eine einfache Handhabung aus und sind batteriebetrieben, jedoch wegen der Messung nur eines Parameters für Forschungsarbeiten kaum brauchbar.

4.2.2 Anwendungen

Da die herkömmlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren, wie Eindruck- und Rückprallmessung, nur oberflächennahe Bereiche berücksichtigen, bestand der Wunsch, bei einer zerstörungsfreien Bestimmung der Druckfestigkeit auch die inneren Bauteilbereiche zu erfassen. Es war deshalb das Ziel vieler Autoren, die Druckfestigkeit des erhärteten Betons am Bauwerk über die Messung der Impulslaufzeit zu ermitteln. Das Problem besteht darin, daß die Herstellungsparameter des Betons wie Verdichtung, W/Z-Wert, Art und Menge des Zementes sowie Art, Menge und Sieb- linie des Zuschlags teilweise unterschiedliche Einflüsse auf Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit haben. Der Zusammen- hang zwischen Schallgeschwindigkeit v_L und der Druckfestigkeit

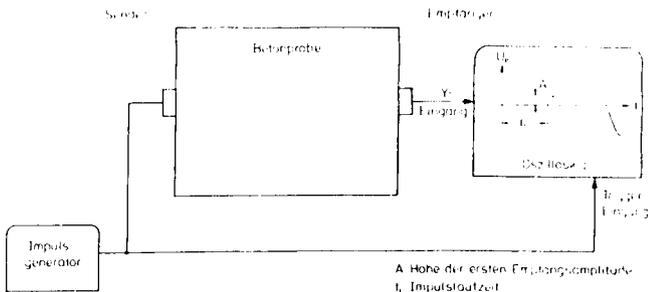


Abb. 4.1: Impulsdurchschallung von Beton, Laufzeit und Intensitätsmessung

β wurde daher meist in empirischen Gleichungen der Form

$$\beta = a v_L^b, \quad \beta = a c v_L^b, \quad \beta = a v_L^2 + b v_L + c \quad (4.1)$$

[33, 34] angegeben. Die Konstanten a , b und c müssen durch Parallelversuche während des Bauens an Probewürfeln aus dem Bauwerksbeton ermittelt werden. Insbesondere gilt die Eichung dann nur für das entsprechende Bauwerk.

Bei Druckfestigkeitsbestimmungen an älteren Bauwerken, deren Betondaten meist nicht mehr verfügbar sind, ist bei Auswertung der Beziehungen (4.1) mit Fehlern von bis zu 50 % zu rechnen.

Obwohl es keinen festkörper-physikalischen und daher auch keinen mathematisch exakten Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit gibt, fehlt es nicht an Versuchen, diesen Sachverhalt durch aufwendigere Rechenverfahren und Kombination mit zerstörenden Prüfungen zu umgehen [35 - 41], um damit die Prüfsituation zu verbessern. So wurde beispielsweise die gemessene Laufzeit mit Hilfe eines Rechners, der in das Ultraschallgerät miteingebaut wird, direkt in die Druckfestigkeit umgerechnet und angezeigt, wenn die Konstanten einer Beziehung wie 4.1 vorher ermittelt worden waren [42].

Durch Kombination der Laufzeitmessungen mit anderen Verfahren z.B. dem Schmidt-Hammer, läßt sich die Aussagekraft der Festigkeitsermittlung erhöhen [43 - 57]. Bellander [58] und Leers [59] haben ausführliche Darstellungen zur zerstörungsfreien Druckfestigkeitsbestimmung mit Ultraschall verfaßt.

Trotz aller Bemühungen ist es jedoch nicht gelungen, eine sichere und vertrauenswürdige Druckfestigkeitsbestimmung mit Hilfe einer Impulslaufzeitmessung zu erreichen.

Während sich relative Änderungen eines Werkstoffparameters mit Hilfe von Impulslaufzeitmessungen im allgemeinen gut beobachten lassen - vorausgesetzt die anderen Einflüsse bleiben konstant - lassen sich absolute Größen wie Rohdichte oder Feuchte des Betons nicht mit Erfolg bestimmen [60 - 65].

Eine Berechnung der elastischen Konstanten (vgl. 3.6 - 3.10) allein aus der longitudinalen Schallgeschwindigkeit v_L ist nicht möglich. Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls E sind außerdem die Kenntnis von ρ (Dichte) und μ (Poissonkonstante) erforderlich. Mit der zusätzlichen Messung der transversalen Schallgeschwindigkeit v_T , die jedoch spezielle Wandler und andersartige Koppelmittel erfordert, können E und G (Schubmodul) gleichzeitig ermittelt werden [4, 59, 66 - 73]. Die Überwachung von Hydratations- und Erhärtungsvorgängen in Beton- und Zementgestein ist über eine kontinuierliche Laufzeitmessung möglich. Die physikalisch-mechanischen Umwandlungen lassen sich in der ersten Stufe des Erhärtungsvorganges durch eine Aufnahme charakteristischer $v_L(t)$ -Kurven ermitteln. Die Ergebnisse können dazu benutzt werden, um die Bedingungen für die thermische Nachbehandlung oder die Dampfhärtung von Bauteilen zu optimieren [4, 16, 26, 27, 74 - 79].

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung für Laufzeitmessungen liegt im Auffinden von Rissen in Bauteilen. Angaben über Rißtiefe und -weite sind bisher jedoch noch nicht befriedigend gelungen [17, 18, 33, 80 - 89].

Durch Messung der Impulslaufzeit senkrecht zur Belastungsrichtung kann das Auftreten von Mikrorissen und Mikrozerstörungen am einachsigen druckbelasteten Beton untersucht werden. Die einsetzenden Gefügezerstörungen rufen Laufzeiterhöhungen hervor, wenn andere Verfahren noch keine Anzeige bringen. Diese Untersuchungen können zur Optimierung der Betonrezepturen bezüglich Festigkeit und Verformung beitragen [4, 90 - 97].

Mit Erfolg kann die Laufzeitmessung als relatives Meßverfahren auf Baustellen und an bereits fertigen Bauwerken zur Schadensfeststellung und als Qualitätskontrolle für die Fertigung verwendet werden. Das zu untersuchende Bauteil muß beidseitig mit einem Raster von Ultraschallmeßpunkten versehen werden. An Stellen, an denen sich die Laufzeit über die normale Streuung hinaus ändert, können im Rahmen eines sogenannten quasi-zerstörungsfreien Prüfverfahrens gezielt Bohrkerne gezogen werden. Mit Hilfe der Ultraschallmessungen kann auf diese Weise mit nur relativ wenig Bohrkernen auf das Tragverhalten von Bauwerken geschlossen

werden. Der Abstand der Rasterpunkte kann der Prüfsituation angepaßt werden, so daß sich die Bereiche mit einer abweichenden Laufzeit gut abgrenzen lassen [4, 30].

Zusätzlich läßt sich die Streuung der Schallgeschwindigkeitswerte für eine Beurteilung des Erhaltungszustandes von Bauwerken heranziehen [22, 23, 98]. Eine Homogenitätskontrolle ist an Großbauteilen mit Dicken bis zu 5 m, an Serienbauteilen sowie an tragenden Fundamentteilen, Betonpfeilern und -mauern sogar unter Wasser möglich [29, 34, 43, 46, 98 - 113].

4.3 Intensitäts-Verfahren

4.3.1 Meßprinzip und Geräte

Abb. 4.2 zeigt das Prinzip des Intensitätsverfahrens. Die Generatorspannung regt den Sendeprüfkopf zu Ultraschallschwingungen an. Dabei kann Impulsschall oder Dauerschall erzeugt werden, der sich in den angekoppelten Prüfkörper hinein ausbreitet. Der gegenüberliegende Prüfkopf gibt eine dem dortigen Schalldruck proportionale Spannung ab, die verstärkt und z.B. mit einem Zeigerinstrument zur Anzeige gebracht wird. An einer fehlerfreien Stelle im Bauteil wird die Verstärkung so gewählt, daß die Anzeige 100 % erreicht. Bei einer fehlerbehafteten Stelle sinkt die Anzeige z.B. auf 10 % ab (Abb. 4.2, unten). Streng genommen wird nicht die Schallintensität, sondern die Schalldruckamplitude gemessen und angezeigt. Die Bezeichnung "Intensitätsverfahren" ist jedoch seit langem üblich, weil diese von der Röntgen- oder Gammadurchstrahlung, also durch wirkliche Intensitätsverfahren, auf die Ultraschallprüfung übertragen wurde.

Wird mit kontinuierlichem Ultraschall einer bestimmten Frequenz gearbeitet, so bilden sich leicht stehende Wellen im Bauteil. Vor allem im Baustoff Beton entstehen infolge der kugelförmigen Richtcharakteristik der Prüfköpfe (vgl. 3.3.1) an allen Seitenflächen Reflexionen, die mit der direkt verlaufenden Schallwelle auf der Linie Sender-Empfänger interferieren. Die Interferenzen sind stark frequenzabhängig, da sie vom Gangunterschied der verschiedenen Wellen abhängen. Beträgt der Gangunterschied z.B. eine halbe Wellenlänge ($\lambda/2$, $3/2\lambda$, $5/2\lambda$, usw.), tritt an dieser Stelle eine Schwächung bis zu einer totalen Auslöschung

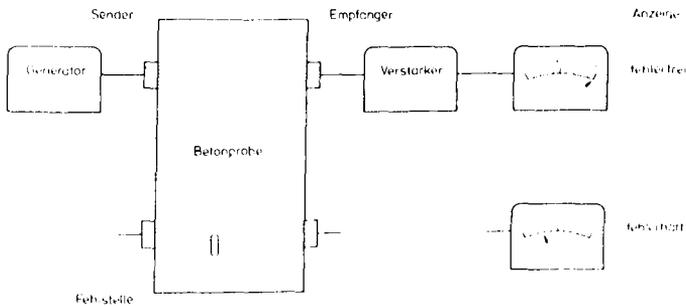


Abb. 4.2 : Intensitätsverfahren in Durchschallung

auf; beträgt der Unterschied eine oder mehrere (ganze) Wellenlängen (λ , 2λ , 3λ , usw.) so erhöht sich die Amplitude. Im Prüfkörper baut sich auf diese Weise ein räumliches Feld stehender Wellen auf. Daher ist es bei der Prüfung mit Dauerschall möglich, daß Fehlstellen keine Intensitätsabnahme verursachen, wenn der Schall entsprechend günstig um die Fehlstelle herum reflektiert wird. Ein Ausweg besteht darin, Impulsschall zu verwenden. Die Intensitätsmessung sollte dann mit einem Oszilloskop über die Höhe der ersten oder der ersten drei Amplituden erfolgen [4,8] (vgl. Abb. 4.1). Bei einer Messung des Mittelwertes der Empfängergesamtspannung, z.B. mit einem Millivoltmeter für Wechselspannungen ("Röhrenvoltmeter") werden nicht nur die ersten drei, sondern auch später ankommende durch Interferenzen gestörte Amplituden ausgewertet.

Im Gegensatz zu den kommerziell erhältlichen direktanzeigenden Laufzeitmeßgeräten für Beton gibt es bisher kein Gerät, welches eine Intensitätsmessung aus den ersten drei Empfangsamplituden automatisch durchführt. Die auf dem Markt befindlichen Ultraschallprüfgeräte sind für den Einsatz an metallischen Werkstoffen konzipiert und arbeiten im Frequenzbereich von 1 - 10 MHz, der für Untersuchungen am inhomogenen Baustoff Beton völlig ungeeignet ist. Forschungsinstitute müssen daher die Geräteentwicklung selbst betreiben, wenn sie sich nicht mit umgebauten Seriengeräten zufriedengeben wollen.

Ultraschallprüfgeräte bestehen im wesentlichen aus Oszilloskopen, die mit einem Ultraschallsender erweitert wurden. Für Niederfrequenzanwendungen sind z.B. die folgenden Gerätetypen erhältlich:

Fa. Krautkrämer: USIP 10 NF oder USM 2 NF

Fa. KLN-Ultraschallgesellschaft: Echoskop MPT 10

Fa. Wazau/Meß und Prüftechnik: USG O4.O1.O1

Die Anforderungen für grundlegende Ultraschalluntersuchungen erfüllen die Geräte jedoch nicht.

4.3.2 Anwendungen

Obwohl die Intensitätsmessung bei der Werkstoffprüfung mit Ultraschall die älteste Anwendung überhaupt ist (Sokolow [9] und Mühlhäuser [124]) wird sie bis heute selten bei der Prüfung von Baustoffen angewandt. Der Grund liegt darin, daß eine reproduzierbare Ankopplung der Prüfköpfe an die Betonoberfläche nur mit einigem Aufwand möglich ist. Bei Intensitätsverlustmessungen besteht bisher immer die Unsicherheit, ob eine geringere Anzeige tatsächlich auf veränderte Werkstoffeigenschaften (Inhomogenität, Hohlräume, andere Fehlstellen) oder auf mangelhafte Ankopplung zurückzuführen ist. Die "natürliche" Inhomogenität infolge des Zuschlagmaterials verursacht eine weitere Streuung der gemessenen Intensität. Bei nahezu allen Ultraschalluntersuchungen am Baustoff Beton wird daher die Intensitätsmessung als Ergänzung zu der Laufzeitmessung verwendet.

Für eine reproduzierbare Schallübertragung wurden von Neisecke [4] aushärtende, plastische und flüssige Koppelmittel untersucht und ein spezieller Prüfkopf entwickelt, der zwischen Betonoberfläche und Wandler eine ruhende Flüssigkeitsschicht von 1 cm Dicke ermöglicht.

Röthig [8] und Shnyrev [115] schlagen bei Intensitätsmessungen einen konstanten Anpreßdruck vor. Die Prüfköpfe werden mit einer Hülse versehen, in der sich eine Schraubenfeder befindet, die einen einstellbaren Anpreßdruck erzeugt.

Während bei einer Schallgeschwindigkeitsmessung die elastischen Eigenschaften des Beton erfaßt werden, bietet die Intensitätsmessung die Möglichkeit, zusätzlich Aussagen über die unelastischen Eigenschaften zu gewinnen. Die Bestimmung der Schallschwächung bzw. der Dämpfung, einer Materialkenngröße, ist mit Hilfe von Intensitätsmessungen möglich (vgl. 3.30) und nicht an bestimmten Prüfkörpergeometrien gebunden [51, 116 - 119]. Von den Autoren wird meist nicht die Dämpfung allein, sondern eine Größe ermittelt, die wesentlich auch von der Meßtechnik abhängt [8].

Bei der Defektoskopie bietet die Intensitätsmessung als Ergänzung zur Laufzeitmessung große Vorteile, da luftgefüllte Inhomogenitäten wie Spalten und Risse sowie Hohlräume neben einer höheren Laufzeit auch - infolge der Reflexionen - eine erhöhte Energieabsorption aufweisen. Weigler und Kern [85] unternahmen vergleichende Messungen der Schalldruckschwächung an einem Balken mit vorgegebenen Hohlräumen und stellten fest, daß grundsätzlich Fehlstellen in der Größenordnung von 3 cm an aufwärts mit diesem Relativverfahren gefunden werden können. Neisecke und Waubke [29] schlagen aufgrund ähnlicher Untersuchungen ein kombiniertes (komplexes) Verfahren, bestehend aus Laufzeit und Intensitätsmessung, für defektoskopische Messungen vor.

Die Beziehung zwischen Ultraschallschwächung und Festigkeit von Natursteinen wurde von Volkwein [120] untersucht. Eine Besonderheit dieser Messungen bildet die Schrägeinschallung von Longitudinalwellen, so daß sich Transversalwellen im Gestein ausbildeten. Die Messungen erfolgten von einer Bauteilseite und wurden zur besseren Ankopplung in Tauchtechnik durchgeführt.

Bei Beobachtungen des Rißwachstums kann eine Intensitätsmessung ebenfalls von Vorteil sein. Mit der Auftragung der Intensität über die Belastung einer Probe kann sowohl das Einsetzen der Mikrorisse beobachtet als auch ein Belastungskennwert ermittelt werden, der wahrscheinlich der Dauerstandfestigkeit entspricht [4].

4.4 Impuls-Echo-Technik

4.4.1 Meßprinzip

Das Impuls-Laufzeit-Verfahren hat in der Impuls-Echo-Technik der Ultraschalltechnik in bezug auf die Prüfung metallischer Werkstoffe zu einem großen Durchbruch verholfen. Andere bekannte Anwendungen mit elektromagnetischen Wellen sind in der Funkmeß- oder Radartechnik zur Ortung von Flugzeugen und Schiffen zu finden.

Abb. 4.3 stellt das Prinzip des Impuls-Echo-Verfahrens dar. Der Prüfkopf dient gleichzeitig zum Senden und Empfangen der Ultraschallimpulse. Der vom Prüfkopf ausgehende gebündelte Schallstrahl trifft auf eine Fehlstelle, die infolge des akustischen Impedanzsprungs (vgl. 3.16) eine Schallreflexion erzeugt. Der reflektierte Schallimpuls gelangt auf den Prüfkopf zurück und erzeugt dort ein Signal, welches auf dem Bildschirm des Ultraschallgerätes als Echoanzeige (Fehlerecho) erscheint. Ein Teil der Schallenergie erreicht die Probenrückwand und gibt damit zusätzlich eine Rückwandechoanzeige. Aus dem Laufzeitverhältnis zwischen Fehler- und Rückwandecho kann auf die Fehlertiefenlage geschlossen werden. Die Amplitudenhöhe des Fehlerechos kann mit der Fehlergröße korreliert werden, hängt aber auch von der Fehlerlage und -form sowie von den Geräteeigenschaften ab. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, daß das zu untersuchende Bauteil nur von einer Seite zugänglich sein muß und eine deut-

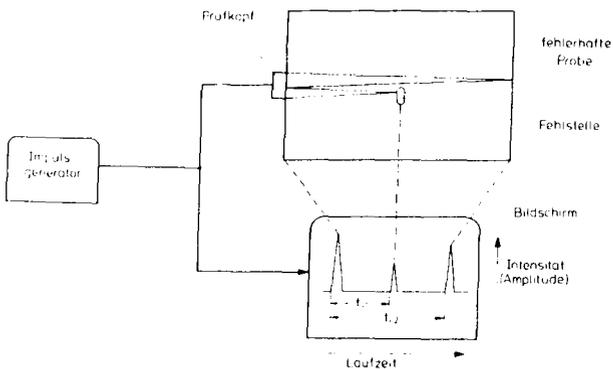


Abb. 4.3: Impuls-Echo-Technik

lichere Fehleranzeige gegenüber einer Intensitätsdurchschallung hervorruft. Eine Intensitätsabnahme von 5 % bei der Durchschallung kann im allgemeinen noch nicht als Fehler gedeutet werden, da Ankoppelschwankungen in dieser Größenordnung liegen, jedoch lassen sich 5 % Intensität als Fehlerecho gegenüber 0 % an einer fehlerfreien Stelle deuten [1].

Die Impuls-Echo-Prüfgeräte sind vorzugsweise für metallische Werkstoffe vorgesehen und verwenden deshalb den Frequenzbereich von 1 - 10 MHz. Die Anzeige erfolgt meist in Videodarstellung, d.h. die Ultraschallimpulse werden gleichgerichtet und gefiltert, so daß sich aus den positiven und negativen Wellenzügen positive "Zacken" (vgl. Abb. 4.3 Bildschirmdarstellung) über einer waagerechten Nulllinie ergeben. Die Höhe dieser Zacken entspricht der Intensität (bzw. Amplitude).

Bei der Prüfmethode nach Abb. 4.3 ist sowohl eine direkte Auswertung des Fehlerechos zwischen Oberflächen- und Rückwandecho (Impuls-Echo-Technik) als auch eine Auswertung des Rückwandechos möglich. Im zweiten Fall wird das Verfahren als Intensitäts-Laufzeitverfahren bezeichnet. Das Intensitäts-Laufzeitverfahren ergibt prinzipiell die gleiche Anzeige wie das Intensitätsverfahren (jedoch wird die Probe vom Schall zweimal durchlaufen), hat aber den Vorteil, daß das Prüfobjekt nur von einer Seite zugänglich sein muß.

4.4.2 Voraussetzungen für die Anwendung der Impuls-Echo-Technik im Bauwesen

Die Anwendung der Impuls-Echo-Technik im Bauwesen konnte bisher nicht erfolgreich eingesetzt werden, weil die niederfrequenten Prüfköpfe keine Richtcharakteristik besitzen. Aufgrund der kugelförmigen Abstrahlung können Echos aus allen Richtungen unkontrolliert zum Prüfkopf gelangen, so daß eine eindeutige Zuordnung sehr erschwert wird.

Um eine Bündelung des Schallstrahls bei der üblichen Prüffrequenz von 50 kHz zu erreichen, müßte nach Gl. 3.25 der Durchmesser des Prüfkopfes etwa 69 cm betragen, wenn ein Divergenzwinkel von 8° vorgegeben wird. Ein solcher Schwinger ließe sich

nur aus verschiedenen Kristallen zusammensetzen und wäre für Praxiseinsätze schon allein aufgrund seiner Abmessungen unbrauchbar.

Ein weiteres Problem bereiten die neben den Longitudinalwellen abgestrahlten Transversal- und Oberflächenwellen, die aufgrund unterschiedlicher Schallgeschwindigkeiten nacheinander eintreffen und die Auswertung der Echos erschweren.

Da die Niederfrequenz-Prüfköpfe meist keine eingebaute Dämpfung besitzen, können mit ihnen keine kurzen Impulse gesendet und empfangen werden (vgl. 5.1). Damit ist eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung der Impuls-Echo-Technik nicht erfüllt. Beträgt die Impulsbreite der abgestrahlten Schallwelle beispielsweise $\tau = 200 \mu\text{s}$ (10 Schwingungen bei 50 kHz), so könnten erst Fehler ab einer Tiefe von 40 cm erkannt werden, da die Longitudinalwelle für die Strecke eine Zeit von 100 μs benötigt und die Strecke infolge der Reflexion zweimal zurückgelegt werden muß.

Eine baupraktische Anwendung der Impuls-Echo-Technik gibt bisher nur Mailer [121] an. Der Autor beschreibt die zur Messung der Betonfahrbahndicke (max. 30 cm) notwendige Entwicklung eines Mosaikprüfkopfes mit einer speziellen Anordnung getrennter Sendempfangs-Schwinger. Ein 5 MHz-Prüfkopf hatte sich als optimal zum Empfang des reflektierten 200 kHz-Signals erwiesen, welches von tortenstückförmigen, den Empfänger umgebenden Senderelementen abgestrahlt wird. Die gesamte Anordnung hat einen Durchmesser von 45 cm. Die Genauigkeit der Dickenmessung ist mit $\pm 3 \%$ bei 78 von 100 Messungen angegeben. Defektoskopische Messungen an Bauteilen werden nicht beschrieben.

Wegen der prinzipiell einfachen Handhabung der Impuls-Echo-Verfahrens (nur einseitige Ankopplung) wird im Rahmen dieser Arbeit versucht, durch Optimierung von Prüfköpfen und Meßgeräten von einer Seite Fehler in Betonproben festzustellen.

4.5 Ultraschallspektroskopie

4.5.1 Grundlagen der Frequenzanalyse

Ein unendlich langer Sinuswellenzug besteht aus einer einzigen Frequenz. Dieser kann jedoch in der Ultraschalltechnik nur bei Durchschallungsmessungen Verwendung finden, zur Laufzeitmessung oder gar für die Impuls-Echo-Technik müssen zeitlich begrenzte Wellenzüge eingesetzt werden. Infolge der Einschalt- und Ausschaltvorgänge setzt sich ein Ultraschallimpuls nach Fourier aus einer Reihe sinusförmiger Einzelfrequenzen zusammen. Die Ultraschallprüfung erfolgt daher nicht wie üblicherweise angegeben mit einer Frequenz, sondern mit einem Frequenzband. Streng genommen muß deshalb die Prüfung für jede einzelne dieser Frequenzen innerhalb der Bandbreite getrennt betrachtet werden.

Allgemein kann ein Vorgang $s(t)$ mit der Periodendauer

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (4.1)$$

der sich unbeschränkt wiederholt, mit der Fourierreihe

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\omega_0 t \quad (4.2)$$

beschrieben werden. Meist wird zur Darstellung das Amplitudenspektrum

$$C_n = A_n^2 + B_n^2 \quad (4.3)$$

und das Phasenspektrum

$$\varphi_n = \arctan \frac{A_n}{B_n} \quad (4.4)$$

angegeben. Die φ_n geben die Phasenwinkel an.

Rechteckimpulse bestehen beispielsweise aus Linienspektren,

wobei der Linienabstand umgekehrt proportional zum Tastverhältnis ist.

Für einmalige Vorgänge, z.B. stoßartige Funktionen, läßt sich die Periodendauer T_0 formal ins Unendliche ausdehnen. Die Spektrallinien rücken dichter zusammen, so daß ein kontinuierliches Spektrum entsteht. Statt Amplituden werden in diesem Fall Amplitudendichten $F(f)$ angegeben. Aus der Fourierreihe entsteht so das Fourierintegral:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (4.5)$$

Die Gleichung (4.5) stellt eine Transformation von dem Zeitbereich zum Frequenzbereich dar. Sie wird deshalb auch als inverse Fouriertransformation bezeichnet. Die Fouriertransformation bewirkt die Abbildung vom Frequenz- in den Zeitbereich. Diese Transformationen sind ausführlich bei Hölzer und Holzwarth beschrieben [122] .

4.5.2 Meßprinzip und Anwendungen

Das Frequenzspektrum eines Ultraschallimpulses läßt sich mit einem aus der Nachrichtentechnik bekannten Spektrumsanalyser durchführen. Dieser stellt das Amplitudenspektrum über die Frequenz dar, die Information der Phasenwinkel θ_n geht dabei verloren. Das Ultraschallsignal muß über einen elektronischen Schalter geführt werden, so daß nur ein bestimmter Zeitbereich (bzw. ein spezielles Echo) analysiert wird. Ein Spektrumsanalyser besteht entweder an mehreren Filtern (Echtzeitanalyser) oder aus Mischer mit Überlagerungssoszillator (Wobbelanalyser), so daß ein Filter mit konstanter Bandbreite (Fenster) über dem zu untersuchenden Frequenzbereich verschoben wird. Ein Wobbelanalyser wurde im Rahmen dieser Arbeit für Ultraschalluntersuchungen am Baustoff Beton aufgebaut und ist unter 6.3.4 beschrieben.

Für die Ultraschallimpulsspektroskopie nach Amplitude und Phase ist ein Fourierrechner notwendig, der die entsprechende Transformation in dem Frequenzbereich durchführt. Für die

Rechnerverarbeitung müssen die Ultraschallechos mit einem schnellen Analog-Digital-Wandler digitalisiert und mit einem Transientrecorder gespeichert werden [23].

Mit Hilfe der Frequenzanalyse läßt sich das bei der Ultraschallmessung benutzte Frequenzband ermitteln. Ein stark schallschwächendes Material verändert aufgrund der Frequenzabhängigkeit die spektrale Zusammensetzung breitbandiger Ultraschallimpulse. Die Ultraschallspektroskopie ermöglicht einerseits durch Frequenz- und Phasenanalyse Rückschlüsse auf Art und Lage des Fehlers zu ziehen und andererseits die Messung verteilter Phänomene, z.B. die Korngrößenbestimmung von Metallen. Beide Anwendungen sind noch lange nicht vollständig ausgereift. Die Beschreibung von Fehlergröße und Neigungswinkel gelang bisher lediglich bei einfachen metallischen Modellreflektoren [23, 24, 25]. Unterschiede in der Mikrostruktur ließen sich ebenfalls nur bei einigen metallischen Werkstoffen mit Hilfe der Ultraschallspektroskopie ermitteln [25].

Eine baupraktische Anwendung der Ultraschallspektroskopie wird von Vorobjew [26] angegeben. Danach können Veränderungen im Spektrum eines die Betonschicht durchdringenden Ultraschallimpulses als Maß für den Spannungszustand dienen. Die Methode läßt sich sowohl bei stahlbewehrten Spannbetonteilen als auch bei Teilen aus gewöhnlichem Beton anwenden, die druckbelastet werden.

5. Untersuchungen an piezoelektrischen Wandlern zur Verkürzung der Ultraschallimpulse

5.1 Piezoplatten zum Sendern und Empfangen von Ultraschallimpulsen

In der Werkstoffprüfung werden heute fast ausschließlich piezoelektrische Wandler für elektrische in mechanische Impulsenergie sowie für den umgekehrten Vorgang eingesetzt [27]. Andere Verfahren, wie z.B. thermische Effekte, elektrostatische, elektrodynamische, optische und magnetostriktive [1, 2, 3], werden nur bei speziellen Prüfungen, meist im Laborbereich, verwendet. Auch für den baupraktischen Anwendungsbereich haben sich piezo-

elektrische Wandler durchgesetzt.

Ein piezoelektrischer Kristall hat die Eigenschaft, daß er bei Aufbringen von mechanischem Druck elektrische Spannungen an den aufgedampften Elektroden erzeugt und umgekehrt beim Anlegen einer elektrischen Spannung mechanisch deformiert wird. Ein derartiger Kristall in ein Gehäuse eingebaut, kann als Sender- und/oder Empfängerprüfkopf verwendet werden.

Die folgenden Betrachtungen gelten für Longitudinalschwinger, wie sie fast ausschließlich verwendet werden. Die Dickenänderungen Δx_s eines Wandlers für Longitudinalanregung ist proportional zur angelegten Spannung:

$$\Delta x_s = d_{11} U_s \quad (5.1)$$

wobei d_{11} als piezoelektrischer Modul bezeichnet wird. Entsprechend bewirkt eine Dickenänderung Δx_e (Empfang von Ultraschallwellen) eine Spannung U_e :

$$U_e = h_{11} \Delta x_e \quad (5.2)$$

Der Proportionalitätsfaktor h_{11} stellt die piezoelektrische Deformationskonstante dar. Die Empfangsspannung U_e ist proportional zum Druck p_x :

$$U_e = g_{11} d p_x \quad (5.2a)$$

g_{11} bezeichnet die piezoelektrische Druckkonstante.

Wird die gesamte Dickenänderung des Sendekristalls auf den Empfangskristall übertragen, so daß $\Delta x_e = \Delta x_s$ wird, so ergibt sich aus den Gleichungen (5.1) und (5.2)

$$\frac{U_e}{U_s} = d_{11} h_{11} = k^2 \quad (5.3)$$

k wird als elektromechanischer Kopplungsfaktor bezeichnet. Dieser ist ein Maß für die Umformung von mechanischer Verschiebung in elektrische Spannung und umgekehrt. Bei den heute künstlich hergestellten Piezoiden liegt k (dimensionslos) zwi-

schen 0,1 und 0,7, entsprechend 10 bis 70 %. Bei einem Koppel-
faktor von $k = 0,7$ würde danach etwa die Hälfte der Sende-
spannung wieder am Empfänger entstehen.

Die Gleichungen 5.1 bis 5.3 beschreiben quasistatische Ände-
rungen, d.h. alle physikalischen Größen ändern sich so langsam,
daß Massen oder Trägheitskräfte sich noch nicht auswirken.
Wichtig für die Anwendungen in der Werkstoffprüfung sind die
dynamischen Veränderungen, d.h. die Schwingfähigkeit der piezo-
elektrischen Platten, wie z.B. das Gewicht an einer Federwaage.
Da die Masse in der Piezoplatte gleichmäßig verteilt ist,
kann die Platte nicht nur auf der Grundfrequenz schwingen, son-
dern auch Oberschwingungen ausführen.

Die Eigenfrequenz f_0 der Platte läßt sich aus der Frequenz-
konstanten n_d und der Plattendicke d bestimmen:

$$f_0 = \frac{n_d}{d} \quad (5.4)$$

Mit einer Frequenzkonstanten $n_d = 2000$ ergeben sich für die
in der Baupraxis üblichen Prüffrequenzen (50 kHz) Dicken von
40 mm. Derartige Wandlerplatten sind wegen fertigungstechnischer
Schwierigkeiten und kleiner Nachfrage nur schwer erhältlich.
Sie müssen speziell angefertigt werden und sind dann nur in
großen Stückzahlen lieferbar.

Nach einer kurzen mechanischen Anregung, z.B. durch einen Stoß
oder durch einen kurzen elektrischen Anregungsimpuls schwingt
die Piezoplatte sinusförmig mit ihrer Eigenfrequenz f_0 .
Sie verhält sich wie eine Stimmgabel, die Amplitude erreicht
schnell ihr Maximum und fällt dann wieder ab.

Ein Abklingen der Schwingung bedeutet einen Energieverlust.
Dieser ist einerseits auf die innere Reibung des schwingenden
Teilchens, andererseits auf die Energiefortleitung in Form von
Ultraschallwellen an die Halterung und an den umgebenden Stoff
zurückzuführen.

Da in der Werkstoffprüfung kurze Schallimpulse (vgl. 4.3)
benötigt werden, wird bei den üblichen Prüfköpfen für homogene
Metalle zusätzlich ein Dämpfungskörper an eine Seitenfläche des

Wandlers angebracht. Bei der Ankopplung an das Werkstück arbeitet der Schwinger zwischen zwei Stoffen mit den akustischen Impedanzen Z_1 und Z_2 , wobei Z_1 dem Dämpfungskörper zugeordnet ist und Z_2 den zu prüfenden Werkstoff darstellt.

Das Verhältnis aufeinanderfolgender Amplituden definiert den Dämpfungsfaktor δ (Abb. (5.1)).

$$\delta = \frac{A_0}{A_1} = \frac{A_2}{A_3} = \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (5.5)$$

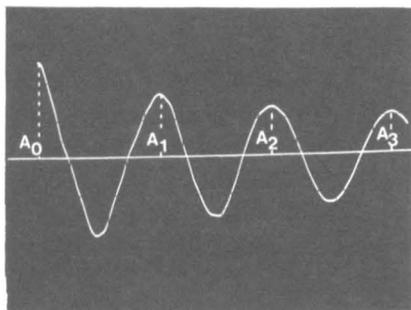


Abb. 5.1

Bestimmung des Dämpfungsfaktors δ aus dem Abklingvorgang einer Schwingung

Bei beiderseits schallweicher Ankopplung (d.h. Z_1 und Z_2 sind beide kleiner als die Schwingerimpedanz Z_0) läßt sich die der Dämpfungsfaktor δ aus der Gleichung 5.6 ermitteln.

$$\delta = \frac{(z_0 + z_1)(z_0 + z_2)}{(z_0 - z_1)(z_0 - z_2)} \quad (5.6)$$

Die Güte oder Gütefaktor Q ist das Verhältnis der Amplitude bei der Resonanzfrequenz Δx_{fr} zur statischen Dickenänderung Δx_s

$$Q = \frac{\Delta x_{fr}}{\Delta x_s} \quad (5.7)$$

Gleichung 5.8 gibt den Zusammenhang zwischen Güte und Dämpfungsfaktor an:

$$Q = \frac{\pi}{\ln \delta} \quad (5.8)$$

Aus den Gleichungen 5.1, 5.7 und 5.8 folgt für die Auslenkung bei Resonanzanregung in Abhängigkeit des Dämpfungsfaktors:

$$\Delta x_{fr} = \frac{\pi}{\ln \delta} d_{11} U_s \quad (5.9)$$

Bei gleicher Sendespannung U_s verhält sich die Amplitude umgekehrt proportional zum Logarithmus des Dämpfungsfaktors δ .

Mit zunehmender Dämpfung der piezoelektrischen Platte wird die Bandbreite Δf größer. Die Bandbreite berechnet sich aus Gleichung 5.12

$$\Delta f = \frac{fr}{Q} \quad (5.10)$$

Die Gleichungen (5.8) und (5.10) stellen nur Näherungen dar. Bei großer Dämpfung können erhebliche Abweichungen auftreten. Es müssen dann exaktere Berechnungen vorgenommen werden.

Aus der klassischen Unschärfenrelation

$$\Delta f \Delta \tau = 1 \quad (5.11),$$

wobei τ die Dauer des Schallimpulses darstellt, folgt bei größerer Bandbreite der Wandler, daß sie kürzere Schallimpulse abgeben können. Der Vorteil kürzerer Schallimpulse (τ klein) wird mit geringerer Amplitude erkauft. Bei den Niederfrequenzprüfköpfen, wie sie für die baupraktischen Anwendungen benutzt werden, verzichtet man auf diesen Dämpfungskörper, um eine höhere akustische Energie für den inhomogenen Werkstoff Beton zur Verfügung zu haben. Eine zusätzliche mechanische Dämpfung würde die Reichweite der Ultraschallimpulse herabsetzen.

Um die für den Einsatz der Echo-Impuls-Technik notwendigen kurzen Ultraschallimpulse zu erhalten, wurde im Kap. 5.3 eine elektronische Regelung der Kristalle erprobt.

5.2 Abhängigkeit der Impulslänge verschiedener Prüfköpfe infolge mechanischer und elektrischer Dämpfung

5.2.1 Meßprinzip

Die Messung der tatsächlichen Länge des abgestrahlten Sendepulses in dem Baustoff Beton kann nicht über einen zweiten, als Empfänger benutzten Prüfkopf erfolgen, weil aufgrund der kugelförmigen Abstrahlcharakteristik (vgl. 3.3.1) Reflexionen von allen Grenzflächen den auf dem direkten Weg ankommenden Empfangsimpuls beeinflussen (vgl. 4.2.1). Eine exakte Messung muß daher mit demselben Prüfkopf erfolgen, der als Sender arbeitet. Während der Dauer des Sendepulses (einige μs) muß der Prüfkopf mit dem Impulsgenerator verbunden werden, anschließend zur Messung des Nachschwingens mit dem Empfänger (Oszilloskop).

Ein mechanischer Umschalter, z.B. ein Relais, hat Schaltzeiten von einigen 100 μs und ist daher für diesen Zweck nicht geeignet. Eine schnelle elektronische, d.h. kontaktlose Umschaltung ist mit Dioden möglich (Abb. 5.2). Infolge der negativen Sendespannung öffnen die Dioden D_1 und D_2 den Signalweg zwischen Sender und Prüfkopf während des Sendepulses. Die Dioden D_3 bis D_6 begrenzen gleichzeitig die Empfängerspannung, um eine Zerstörung des angeschlossenen Verstärkers zu vermeiden. Aufgrund des Kopplungsfaktors (vgl. Gleichung 5.3) ist die am Kristall anliegende Spannung, die durch das eigene Nachschwingen erzeugt wird, wesentlich kleiner als die Sendespannung. Alle

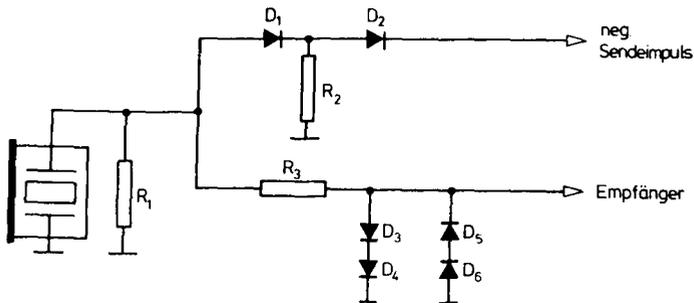


Abb. 5.2 Diodenschalter zum Senden und Empfangen mit demselben Prüfkopf

Dioden sperren daher im Anschluß an den Sendeimpuls. Die Verbindung zwischen Prüfkopf und Sender wird mit Hilfe der Dioden D_1 und D_2 getrennt und die vom Wandler erzeugte Spannung gelangt ohne nennenswerte Abschwächung zum Empfänger. Die Widerstände R_1 bis R_3 werden den Impedanzverhältnissen angepaßt, so daß einerseits ein exaktes Schalten möglich wird und andererseits keine unnötig hohe Signalabschwächung eintritt.

5.2.2 Meßergebnisse der mechanischen Dämpfung durch Ankopplung an den Baustoff Beton

Da die niederfrequenten Prüfköpfe keinen eingebauten mechanischen Dämpfungskörper haben, muß sich ein unterschiedliches Ausschwingen bei Betrieb ohne und mit Ankopplung ergeben. Im ersten Betriebsfall wird der Piezoplatte nur eine geringe Energie über die Halterung entzogen, wobei die mechanische Güte Q (Gleichung 5.7) besonders hoch ist und daher der Kristall lange nachschwingt (Gleichung 5.10 und 5.11). Bei guter Ankopplung wird dem Kristall Energie durch den Baustoff entzogen, wobei die Güte Q absinkt und das Ausschwingen verkürzt wird.

Die Meßergebnisse der Ausschwingzeiten verschiedener Prüfköpfe mit und ohne Ankopplung sind in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt. Die Anregung erfolgte mit einem kurzen, negativen Spannungsimpuls von etwa $2 \mu\text{s}$ Dauer (vgl. 6.2.1). Die Messungen wurden mit dem Diodenschalter nach Abb. 5.2 durchgeführt. Die Sendespannung wurde mit 5 V so niedrig gewählt, daß die vom Abklingvorgang des Prüfkopfes stammende Spannung keine Begrenzung durch die Dioden D_3 bis D_6 erfuhr. In der Abbildung 5.3 ist das Verhalten des Prüfkopfes B4 gezeigt. Dieser Longitudinalwellenprüfkopf besitzt eine Eigenfrequenz von 70 kHz bei einem Wandlerdurchmesser von 33 mm und wurde am Institut für Baustoffkunde im Rahmen eines Forschungsvorhabens hergestellt [30]. Aus dem Abklingvorgang des Prüfkopfes (Bild 5.3a) folgt ein Dämpfungsfaktor von $1,18$ nach Gleichung (5.5). Die Güte Q beträgt 19 , die Bandbreite ergibt sich mit (5.10) zu $3,5 \text{ kHz}$. Nach etwa $300 \mu\text{s}$ ist die Amplitude auf 10% ihres Anfangswertes abgeklungen. Nach der Ankopplung sinkt die Güte auf $9,5$ ab, die Bandbreite erhöht sich auf $7,4 \text{ kHz}$ und der ab-

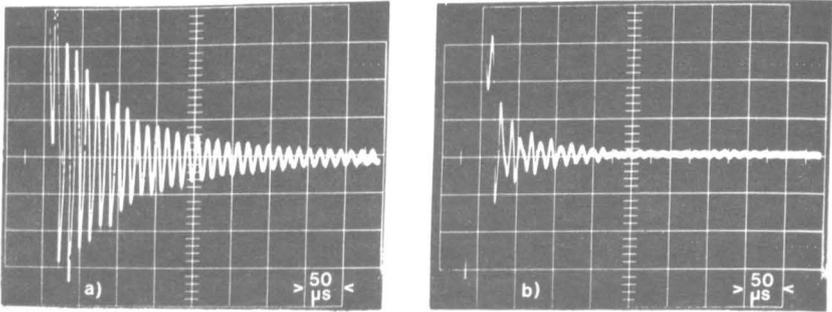


Abb. 5.3: Einfluß der mechanischen Dämpfung des Prüfkopfes B4 bei Ankopplung an den Beton

- a) ohne Ankopplung
b) mit Ankopplung

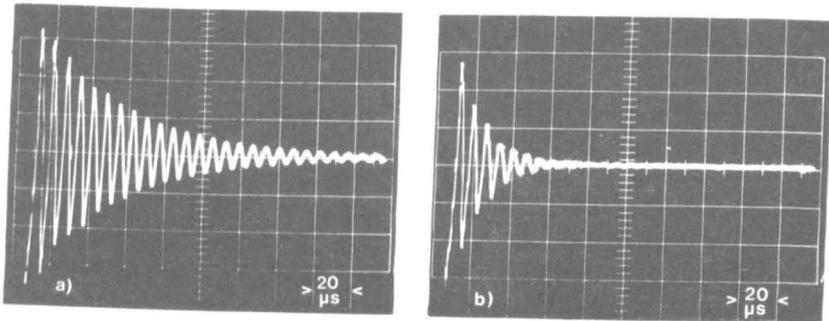


Abb. 5.4: Einfluß der mechanischen Dämpfung des Prüfkopfes S 9204 bei Ankopplung an den Beton

- a) ohne Ankopplung
b) mit Ankopplung

gestrahlte Schallimpuls hat nur noch eine Länge von $180 \mu\text{s}$. Da die Schwingungen besonders bei der Ankopplung nicht rein sinusförmig verlaufen, läßt sich daraus folgern, daß nicht nur Longitudinalschwingungen, sondern wie auch Röthig [8] fest-

stellt, Radialschwingungen auftreten. Da die Radialschwingungen nicht so optimal wie die Longitudinalschwingungen bei der Ankopplung gedämpft werden, stören sie hier besonders im Abklingbereich. Die axiale Auflösung des Prüfkopfes wird dadurch schlechter.

Im Gegensatz zum Prüfkopf B4 zeigt die Sonde S 9204 (vgl. 5.4) der Firma Dunegan ein nach der Anregung rein sinusförmiges Schwingen, sowohl ohne Ankopplung (Abb. 5.4a) als auch mit Ankopplung (Abb. 5.4b). Die Länge des abgestrahlten Impulses verkürzt sich von ca. 160 μs ohne Ankopplung auf ca. 40 μs mit Ankopplung, wobei sich die Bandbreite von 6,2 kHz auf 22 kHz erhöht.

Die Vermutung liegt nun nahe, daß die unterschiedlichen Daten der Prüfköpfe, die sich mit und ohne Ankopplung ergeben, für die Ultraschalluntersuchungen sehr nachteilig sind.

Wahrscheinlich liegt hier auch der Grund dafür, daß sehr wenige Autoren die Ultraschallamplitude bzw. die Intensitätsmethode für die Baustoffprüfung anwenden.

Die oben diskutierten Daten der Prüfköpfe ändern sich nicht nur bei Betrieb ohne Ankopplung und mit Ankopplung, sondern auch je nach Güte der Ankopplung. Bei ungenügender Ankopplung fällt die Amplitude stark ab, während sich die gemessene Laufzeit nur geringfügig (ca. 0,3 μs) infolge der größeren Anstiegszeit des schwächer bedämpften Kopfes ändert. Bei Bauteillängen von 20 cm (entsprechend 50 μs Laufzeit) wird der damit verbundene Meßfehler bereits kleiner als 1 %.

Mit der Schaltung nach Abb. 5.2 ergibt sich ein einfaches Meßverfahren, die Ankopplung der Prüfköpfe zu messen. Die Schaltung muß für den Sende- und Empfangsprüfkopf separat aufgebaut werden. Mit einem Oszilloskop wird vor der eigentlichen Ultraschallprüfung das Ausschwingen beider Köpfe kontrolliert. Eine Messung sollte erst erfolgen, wenn sich das Ausschwingen nach Abb. 5.4b ergibt. Auf diese Weise läßt sich die besonders für eine Intensitätsmessung wichtige reproduzierbare Ankopplung der Prüfköpfe am Beton erreichen. Auch der optimale Anpreßdruck

und das optimale Koppelmittel können mit dieser Methode ermittelt werden.

Eine Automatisierung des Ankoppelmeßverfahrens ist ebenfalls möglich. Nach erfolgter kurzer Anregung muß etwa 30 μs später in einem 10 μs breiten Bereich die Abklingamplitude gemessen werden. Ein zu breiter Bereich könnte bereits Fehlerreflexionen erfassen (Impuls-Echo-Technik). Mit einem Komparator wird für die gemessene Amplitude (vgl. 6.3.3) ein maximaler Wert vorgegeben, der eine Anzeigelampe entsprechend der Ankopplungsart ein- oder ausschaltet. Diese Anzeige könnte direkt am Prüfkopf angebracht werden und gestattete eine Ankopplungskontrolle vor Ort. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch diese Kontrolle nicht soweit automatisiert, sondern mit einem Oszilloskop durchgeführt.

5.2.3 Einfluß der elektrischen Dämpfung

Mit der Dimensionierung von R_1 in der Abb. 5.2 ergibt sich die Möglichkeit, den Prüfkopf elektrisch zu dämpfen. Dieser parallelgeschaltete Widerstand entzieht dabei dem Prüfkopf elektrische Energie, die in Wärme umgesetzt wird. Der Widerstand R_1 wurde bei den vorangehenden Messungen etwa 10 mal größer als die Prüfkopfimpedanz gewählt, so daß die elektrische Dämpfung vernachlässigbar klein blieb.

Bei optimaler Anpassung (Innenwiderstand des Prüfkopfes $R_i = R_1$) läßt sich die Hälfte der aus dem Ausschwingen erzeugten elektrischen Leistung in Wärme umsetzen. Ferner ist der Koppelfaktor k , d.h. der Wirkungsgrad des Piezokristalls (Gl. 5.5) zu beachten. Wenn der Koppelfaktor $k = 0,7$ beträgt (sehr groß angenommen), lassen sich (theoretisch) 25 % der mechanischen Energie in Wärme mit R_1 umwandeln. Bei den untersuchten Kristallen fehlen die Angaben des Koppelfaktors. Wie aus den Ergebnissen einer elektrischen Dämpfung, die in der Abb. 5.5 dargestellt sind, hervorgeht, wird dem Kristall so wenig Energie entzogen, daß sich im Ausschwingverhalten keine meßbaren Unterschiede ergeben. Die Ausschwingamplituden werden nur insgesamt durch die Abschwächung - Innenwiderstand R_i des Kristalls und Abschlußwiderstand R_1 - kleiner, der Dämpfungsfaktor δ (Gl. 5.5) ändert sich jedoch nicht. Eine nennenswerte Verkürzung der

Ausschwingzeit läßt sich mit einer ohmschen Bedämpfung der niederfrequenten Wandler nicht erreichen. Es ist günstiger, den Widerstand R_1 und auch den Eingangswiderstand des nachfolgenden Verstärkers möglichst groß werden zu lassen, so daß die Leerlaufspannung des Wandlers verstärkt wird (s. 6.3.1) und die Verstärkung der nachfolgenden Auswerteelektronik nicht unnötig hoch betrieben werden muß.

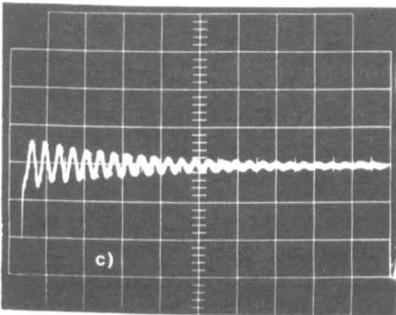
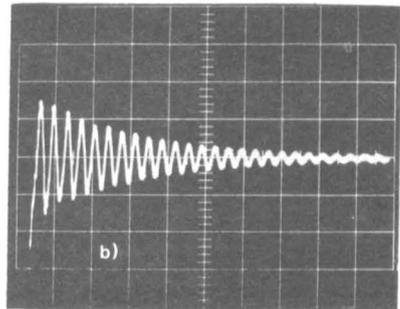
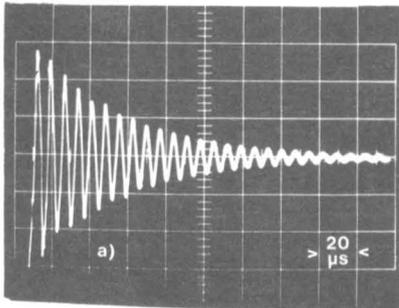


Abb. 5.5:

Einfluß der elektrischen Dämpfung mit Hilfe eines Parallelwiderstandes R_1

Prüfkopf S 9204

- a) $R_1 = 5 \text{ k } \Omega$
- b) $R_1 = 330 \Omega$
- c) $R_1 = 100 \Omega$

5.3 Elektronische Regelung piezoelektrischer Wandler

5.3.1 Prinzip des Regelkreises und dessen Anwendung auf piezoelektrische Wandler

Eine zusätzliche mechanische Dämpfung der Piezoplatte, z.B. mit Hilfe eines Hartgummikörpers, würde einen Teil der für die Prüfung vorgesehenen Schallenergie aufzehren (vgl. 5.1). Daher wurde eine elektronische Regelung entwickelt und aufgebaut, die erst nach erfolgter Anregung mit dem Sendepuls wirksam werden sollte und so die eigentliche Sendeamplitude

des Prüfkopfes nicht beeinflusst. Der Wandler wurde dafür in einen Regelkreis einbezogen.

Allgemein besteht die Aufgabe eines Reglers darin, eine bestimmte physikalische Größe, nämlich die Regelgröße X , auf einen vorgegebenen Sollwert zu bringen und dort zu halten. Der Sollwert wird auch als Führungsgröße W bezeichnet. Der Regler hat die Aufgabe, dem Einfluß von Störungen entgegenzuwirken. Abb. 5.6 zeigt das Blockschaltbild eines Regelkreises [128]. Die Regelabweichung ($W-X$) entsteht durch Differenzbildung zwischen der Führungs- und Regelgröße. Der Regler bildet daraus die Stellgröße Y für die Regelstrecke, die auch durch die Störgröße Z beeinflusst wird. Im einfachsten Fall kann der Regler aus einem linearen Verstärker bestehen.

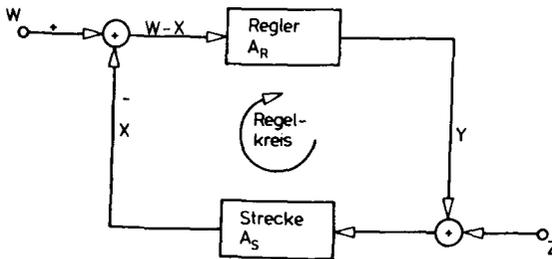
Für die Größen X und Y erhält man

$$X = A_S (Y+Z) \quad (5.12)$$

$$Y = A_R (W-X) \quad (5.13)$$

Die Regelgröße X errechnet sich zu:

$$X = \frac{A_R A_S}{1+A_R A_S} W + \frac{A_S}{1+A_R A_S} Z \quad (5.14)$$



W : Führungsgröße
 X : Regelgröße
 Y : Stellgröße
 $W-X$: Regelabweichung
 Z : Störgröße

Abb. 5.6: Blockschaltbild eines Regelkreises

Das Führungsverhalten, durch $\partial x/\partial z$ definiert, soll möglichst gleich eins sein, während das Störverhalten $\partial x/\partial z$ gegen Null gehen soll. Beide Forderungen sind mit einer möglichst großen Schleifenverstärkung

$$g = A_R A_S \quad (5.15)$$

zu erfüllen. Die Schleifenverstärkung kann jedoch nicht beliebig groß gewählt werden, da das ganze System über den Regelkreis gegengekoppelt ist. Die Phasenverschiebungen, vor allem in der Strecke A_S , führen bei zu hoher Verstärkung A_R zu Regelschwingungen, da die Gegenkopplung bei 180° Phasenverschiebung zu einer Mitkopplung wird. Der Proportionalverstärker (P) im Regler muß bei höheren Anforderungen mit einem Integrator (I) bzw. einem Differentiator (D) erweitert werden. Derartige Regler werden als P-, PI-, PD- bzw. PID-Regler bezeichnet.

Die Reglertypen und deren elektronische Realisierung sind ausführlich in [128] beschrieben.

Das Blockschaltbild des Regelkreises nach Abb. 5.6 soll auf einen piezoelektrischen Wandler angewandt werden.

Die Strecke A_S bildet dabei der Wandler, die Störgröße Z erzeugt der Wandler infolge seines Nachschwingens. Erforderlich sind zwei Anschlüsse für die Stellgröße Y (als Eingang) und ein Anschluß für die Abnahme der Regelgröße X . Dazu wurde der metallisierte Belag einer Endfläche des piezoelektrischen Kristalls durchtrennt und damit eine dritte Elektrode geschaffen. Die gegenüberliegende metallisierte Fläche diente als gemeinsames Bezugspotential ("Masseanschluß"). Die dritte Elektrode wurde an eine zusätzliche Buchse im Prüfkopfgehäuse herausgeführt. Der Regelkreis soll nur nach erfolgtem Sendeimpuls für eine relativ kurze Zeit geschlossen werden. Eine Regelung während der Dauer des Sendeimpulses wurde nicht vorgesehen, da zu diesem Zeitpunkt eine möglichst große akustische Leistung erzeugt werden soll. Außerdem würde die Dynamik des Regelverstärkers unnötig gefordert. Formal bedeutet dies für den Regelkreis, daß die Führungsgröße W gleich Null gesetzt wird, der linke Term der Gleichung (5.14) fällt damit weg. Die Regelgröße X muß invertiert und im Regler A_R verstärkt werden.

5.3.2 Entwicklung und Bau einer Regelelektronik

Abb. 5.7 zeigt das Blockschaltbild der selbstentwickelten Regelschaltung für den Sendewandler. Die Breite des Sendeimpulses am Ausgang A_1 des Doppelimpulsgenerators kann der Schwingungsdauer des verwendeten Prüfkopfes angepaßt werden.

Der Sendeimpuls (Ausgang A_1) gelangt über einen Leistungsverstärker zu der rechten Elektrode des Sendewandlers. Die maximale Sendeamplitude beträgt 250 V. Diese hohe Ausgangsspannung läßt sich mit einem diskret aufgebauten Transistorverstärker erreichen, der zwei Eingänge besitzt. Der Doppelimpulsgenerator gibt im Anschluß an den Sendeimpuls noch einen Regelimpuls (Ausgang A_2) ab, dessen Dauer zwischen 10 und 400 μs geändert werden kann. Dieser schließt den elektronischen Schalter (Integrierter Schaltkreis mit Feldeffekttransistor) und damit auch den Regelkreis. Der PID-Regler "entzerrt" den Frequenzgang des Wandlers (der die Regelstrecke bildet) derart, daß eine Verstärkung von 40 dB (100-fach) ohne Regelschwingen möglich wird. Im Regelbetrieb kann der Wandler mit einer aus seinem eigenen Nachschwingen erzeugten Gegenspannung angeregt werden, so daß der Ausschwingvorgang schnell abklingen müßte.

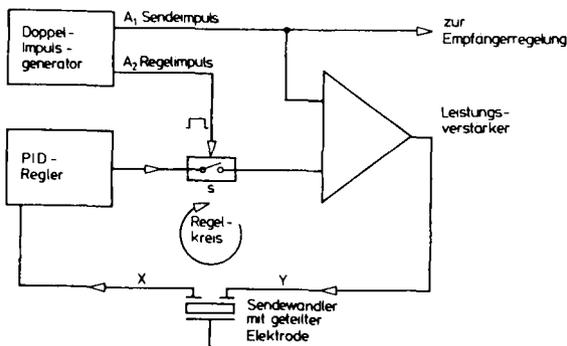


Abb. 5.7 : Blockschaltbild zur Regelung des Sendewandlers

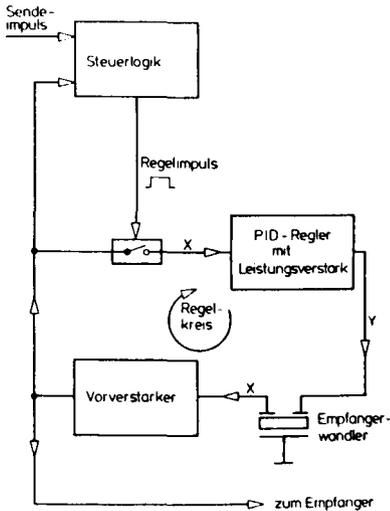


Abb. 5.8:
Blockschaltbild der Empfänger-
regelung

Unter der Annahme, daß der geregelte Sendeprüfkopf einen kurzen Schallimpuls abgibt, kann der ungedämpfte Empfängerwandler durch sein eigenes Nachschwingen den Empfangsimpuls "verlängern". Die Regelung des Sendeprüfkopfes brächte so keinen Vorteil. Für den Empfängerprüfkopf wurde daher ebenfalls eine Regelung vorgesehen.

Die Informationen über Laufzeit und Intensität sind bereits in der ersten Amplitude des Empfangssignals enthalten (vgl. 4.1 und 4.2). Später folgende Amplituden bei Durchschallungsmessungen bringen im allgemeinen keine weiteren Informationen. Der Empfängerwandler kann daher nach dem Eintreffen der ersten Amplitude mit gegenphasiger Anregung analog zum Sendewandler geregelt werden. Das Blockschaltbild der entwickelten und aufgebauten Regelschaltung stellt die Abb. 5.8 dar. Der Empfängerwandler wird über einen Vorverstärker (beschrieben unter 6.3.1) betrieben. Eine Steuerlogik, die neben dem Empfangssignal auch den Sendeimpuls erhält, dient zur Erkennung der ersten Empfangsamplitude und erzeugt im Anschluß daran einen in der Länge einstellbaren Regelimpuls (10 bis 400 μ s), der über den elektronischen Schalter den Regelkreis schließt. Eine Beeinflussung des ersten Empfangsimpulses ist damit ausgeschlossen. Er kann im Empfänger ausgewertet werden. Ähnlich wie

bei der Regelung für den Sendekopf wird hier auch ein PID-Regler zur Unterdrückung der Regelschwingungen eingesetzt.

Abb. 5.9 zeigt das Impulsdigramm der entwickelten Sende- und Empfangsregelungen. In der Abb. oben ist der Sendeimpuls dargestellt, der sich im Abstand von 100 ms wiederholt. Darunter ist der Regelimpuls für den Sendewandler abgebildet. Nach einer von den Bauteilabmessungen abhängigen Laufzeit t_L erreichen die Schallwellen den Empfangsprüfkopf. Der Schaltimpuls zur Regelung des Empfängerwandlers, unten auf der Abb. 5.9, wird aus der Steuerlogik nach Eintreffen der ersten Empfangsamplitude gebildet.

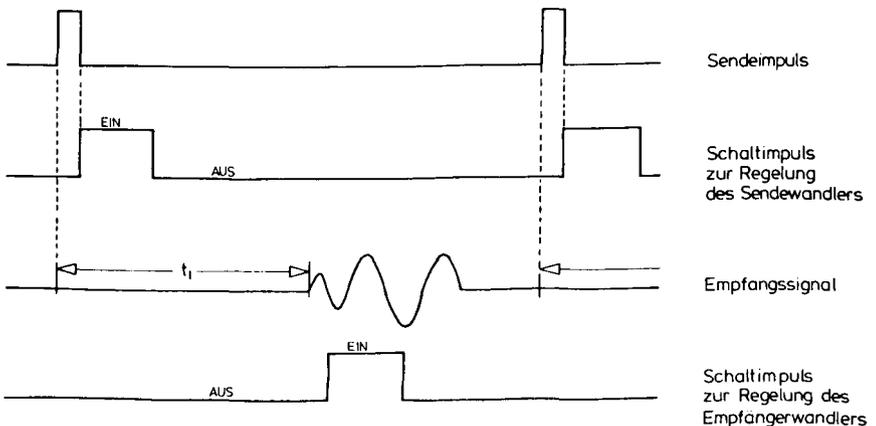


Abb. 5.9: Impulsdigramm zur Regelung des Sende- und Empfangsprüfkopfes

5.3.3 Meßergebnisse an verschiedenen Probekörpern

Die Wirkungsweise der elektronischen Prüfkopfregelung wurde bei Durchschallungsmessungen getestet.

Da die kugelförmige Richtcharakteristik der Prüfköpfe von allen Seitenflächen störende Reflexionen entstehen läßt, die

von der Regelung unabhängige Empfangssignale hervorrufen, wurden Proben mit unterschiedlicher Geometrie verwendet. Ein 30 cm langer Bohrkern mit 5 cm Durchmesser und ein 15 x 15 x 70 cm³ großer Betonbalken dienten als Prüfobjekte.

Abb. 5.10 gibt den Einfluß der Regelung des Sendewandlers auf das Empfangssignal des am anderen Ende des Bohrkerns befindlichen unregelmäßigen Prüfkopfes wieder. Der Kanal 1 stellt jeweils die Regelgröße X des Sendewandlers dar, Kanal 2 die Empfangsspannung. Ein Vergleich des Kanals 2 beider Bilder zeigt, daß das Nachschwingen im Anschluß an den Sendeeimpuls im Bild b infolge der 230 µs langen Senderregelung stark unterdrückt ist. Diese Regelung übt jedoch keinen Einfluß auf das Empfangssignal aus (Kanal 2, Bild a, b).

In den Abb. 5.11a bis c wurde zur Senderregelung zusätzlich die Empfängerregelung eingeschaltet. Der im Anschluß an die erste Empfangsschallwelle von der Steuerlogik gebildete Regelimpuls, jeweils im Kanal 2 dargestellt, war 50, 150 und 300 µs lang (Abb. 5.11a, b und c). Nach dem Abschalten der elektronischen Regelung ist in allen Fällen kein Einfluß auf das Empfangssignal festzustellen. Besonders die Abb. a und b zeigen, daß das Empfangssignal nach erfolgter Regelung innerhalb von etwa 1 µs wieder den maximalen Wert erreicht, den das Signal auch ohne Regelung gehabt hätte.

Um den Einfluß der Probengeometrie bei den Untersuchungen auszuschließen, wurden die Messungen an einem Betonbalken wiederholt und anschließend mit direktgekoppelten Prüfköpfen fortgesetzt. Die Ergebnisse der Messungen am Betonbalken stimmen mit denen am Bohrkern überein. Abb. 5.12 veranschaulicht, daß die Senderregelung keinen Einfluß auf die im Kanal 1 dargestellte Empfangsspannung hat, obwohl kein Nachschwingen bei der Regelgröße X im Bild b zu erkennen ist. Analog zu den Ergebnissen am Bohrkern ändert sich der zeitliche Verlauf der Empfangsspannung wiederum auch bei eingeschalteter Empfängerregelung nicht, als Regelzeiten wurden bei den Abb. 5.13a bis c 120, 230 und 390 µs gewählt.

In den folgenden Untersuchungen wurde als Empfängerwandler

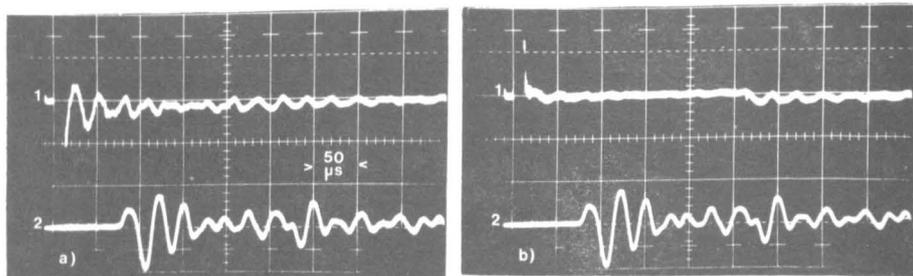


Abb. 5.10: Einfluß der Regelung des Sendewandlers

a) ohne Regelung

b) mit Regelung

1: Regelgröße X des Sendewandlers

2: Empfangssignal

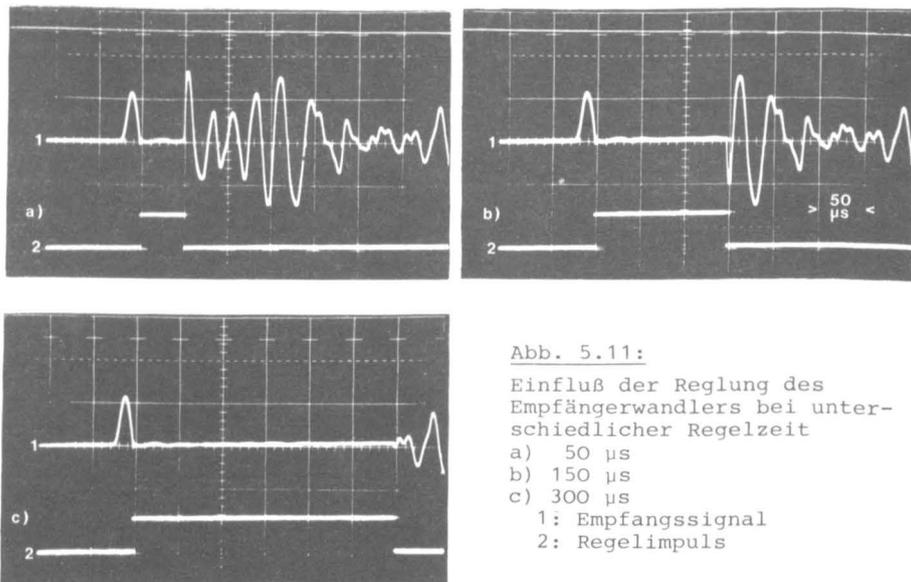


Abb. 5.11:

Einfluß der Regelung des Empfängerwandlers bei unterschiedlicher Regelzeit

a) 50 μ s

b) 150 μ s

c) 300 μ s

1: Empfangssignal

2: Regelimpuls

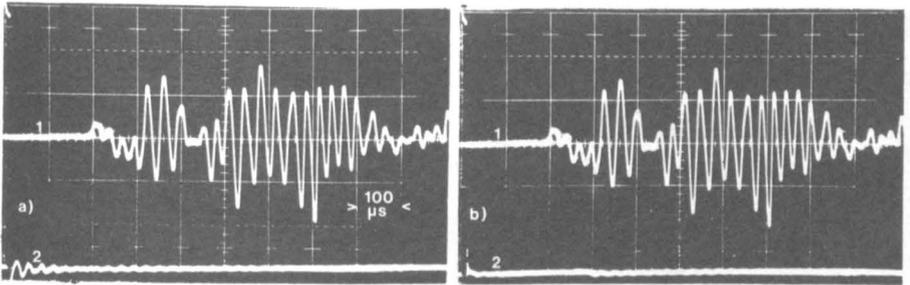


Abb. 5.12: Einfluß der Regelung des Sendewandlers

- a) ohne Regelung
 b) mit Regelung ($280 \mu\text{s}$)
 1: Empfangssignal
 2: Regelgröße X des Sendewandlers

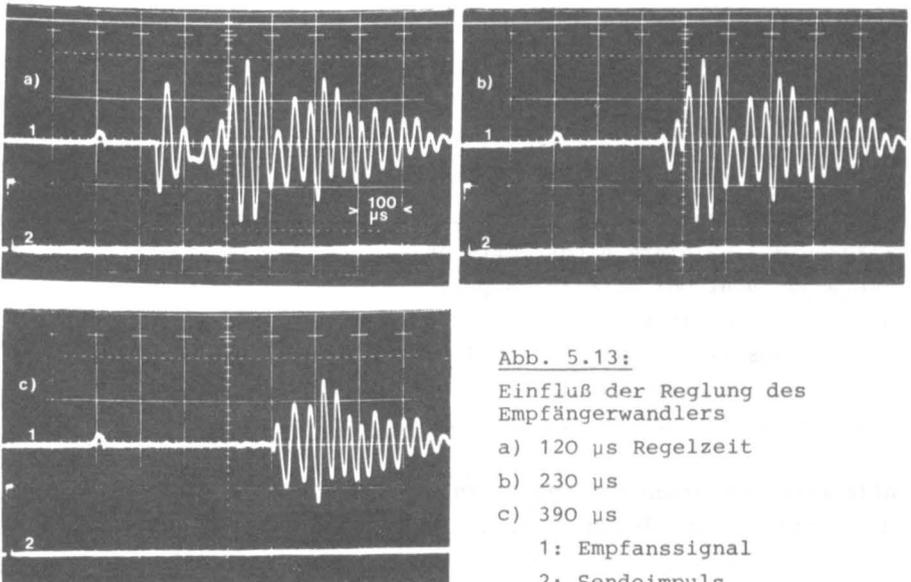


Abb. 5.13:
 Einfluß der Regelung des
 Empfängerwandlers

- a) $120 \mu\text{s}$ Regelzeit
 b) $230 \mu\text{s}$
 c) $390 \mu\text{s}$
 1: Empfangssignal
 2: Sendeimpuls

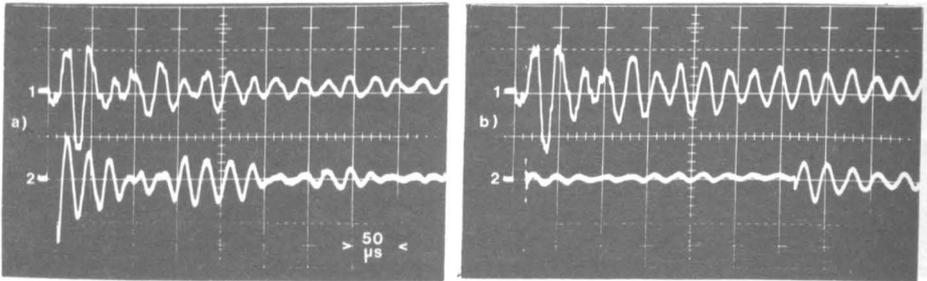


Abb. 5.14: Direkte Kopplung zwischen den Prüfköpfen Nr. 16 und S140B

- a) ohne Senderreglung
- b) mit Senderreglung

1: Empfangssignal
2: Regelgröße X des Sendewandlers

ein für Schallemissionsuntersuchungen gefertigter Serienprüfkopf der Firma Dunegan Typ S 140B (vgl. 5.4) verwendet. Mit diesem relativ kleinen Prüfkopf (2,2 cm \varnothing und 1,5 cm Länge) war eine Empfängerregelung nicht möglich, da der Kristall im Prüfkopfgehäuse eingegossen ist und deshalb die metallisierten Flächen des Wandlers nicht getrennt werden konnten. Das Empfangssignal bei direkter Kopplung des Sendeprüfkopfes Nr. 16 (im Institut für Baustoffkunde angefertigt) und der Sonde S140B ist in der Abb. 5.14 oben dargestellt, Bild a ohne, Bild b mit Senderregelung. Die Regelung des Senderwandlers zeigt auch hier keinen Einfluß auf das Empfangssignal.

Alle oben beschriebenen Messungen ergeben nach Abschaltung der Regelung den gleichen Verlauf der Empfangsspannung, den sie auch ohne Regelung gehabt hatte. Bemerkenswert ist der schnelle Spannungsanstieg nach Abschalten der Regelung. Die verwendeten piezoelektrischen Kristalle können aufgrund ihrer geringen Bandbreite von einigen kHz nicht ihr Schwingverhalten

derart ändern, daß sich innerhalb von etwa 1 μs nach Abschalten der Regelung die an den Elektroden entstehende elektrische Spannung um den Faktor 100 ändert. Daher ist anzunehmen, daß die Schwingungen der Teilchen im Piezokristall gar nicht oder nur sehr schwach durch die elektronische Regelung beeinflußt werden. Nach erfolgter Regelung der mechanischen Schwingungen auf null könnte erst 30 μs später die Empfangsspannung ihren maximalen Wert wieder erreichen. Diese Zeit entspricht der Anstiegszeit, die mit Hilfe der Gleichung 5.16 abgeschätzt werden kann:

$$t_{\text{an}}[\mu\text{s}] = \frac{350}{\Delta f[\text{kHz}]} \quad (5.16)$$

Die elektronische Regelung sorgt zwar dafür, daß die Spannung an den Elektroden gegen null geht, jedoch ändert der Piezokristall sein mechanisches Schwingen nicht oder nur unwesentlich. Dies würde einen Widerspruch zu den Gleichungen 5.1 und 5.2 bedeuten, die den piezoelektrischen Effekt und dessen Umkehrung betreffen. Der Kristall hat neben seinen piezoelektrischen Eigenschaften außerdem eine Kapazität, die hier in die Betrachtungen mit einbezogen werden muß. Die Kapazität zwischen den Elektroden liegt in der Größenordnung $n\text{F} = 10^{-9}\text{F}$. Infolge der Teilung einer Elektrode (vgl. Abb. 5.7 und 5.8) läßt sich der Kristall wie ein kapazitiver Spannungsteiler auffassen, der eine elektrische Kopplung der Regelgröße X mit der Stellgröße Y darstellt. Damit verbunden ist eine elektrische "Überbrückung" der mechanischen Regelstrecke. Kommt noch ein kleiner Koppelfaktor des Kristalls hinzu, kann der Regler die mechanischen Schwingungen nicht abnehmen und daher auch nicht regeln. Der vom Kristall gebildete Spannungsteiler kann, da er nur mit einer hohen Eingangsimpedanz des Vorverstärkers belastet wird, ein breites Frequenzband übertragen und ermöglicht die in den Abbildungen gezeigten schnellen Spannungsänderungen. Eine Verkürzung der Sendeimpulse mit Hilfe einer elektronischen Regelung der Wandler nach Abbildung 5.10 und 5.11 ist daher nicht möglich. Die Erzeugung kurzer Schallimpulse läßt sich nur mit Hilfe einer zusätzlichen mechanischen Dämpfung (z.B. Hartgummi) erreichen. Um die damit verbundene kürzere Reichweite der Ultraschallimpulse im Beton teilweise zu kompensieren, muß nach einer optimalen elektrischen Anregung gesucht werden (vgl. 6.2 und 7.6).

5.4 Auswahl der Prüfköpfe für grundlegende Ultraschalluntersuchungen am Baustoff Beton

Für die Untersuchungen zur Verbesserung der Ultraschallprüfung des Betons, insbesondere der Relativverfahren wie der Impuls-Echo-Technik und der Spektroskopie, werden höhere Anforderungen an die Prüfköpfe gestellt als bei der bisher angewandten Durchschallung. Hierfür sollten die Prüfköpfe eine höhere Bandbreite als die bisher verwendeten (z.B. Typ B4, vgl. 5.2.2) besitzen. Mit einer höheren Bandbreite können die für die Impuls-Echo-Technik notwendigen kurzen Ultraschallimpulse gesendet und empfangen werden und gleichzeitig für die Spektroskopie einen höheren Informationsgehalt liefern. Der Versuch, spezielle Prüfköpfe hierfür zu entwickeln, wurde eingestellt, da sich keine optimalen Schwingerkeramiken im Frequenzbereich von 50 bis 200 kHz beschaffen ließen. Derartige Piezoplatten müssen speziell von den Firmen angefertigt werden und sind dann nur in größeren Stückzahlen lieferbar. Da zu Beginn der vorliegenden Arbeit die optimalen Prüfkopfdaten noch nicht ermittelt waren, wurde nach einer anderen Möglichkeit gesucht. Bei der Schallemissionsanalyse werden ebenfalls Ultraschallwellen untersucht, die jedoch nicht mit einem Prüfkopf eingeschallt werden, sondern durch äußere Belastung im Bauteil selbst, z.B. durch Mikrorisse entstehen. Hierfür wird der für die Ultraschallprüfung von Beton interessante Frequenzbereich von 50 bis 500 kHz benutzt. Für die Schallemissionsanalyse werden relativ breitbandige Sonden serienmäßig hergestellt. Diese Prüfköpfe haben aufgrund ihres relativ kleinen Schwingerdurchmessers von ca. 20 mm keine Richtcharakteristik (vgl. 3.25). Erste Ultraschallanwendungen am Beton ermöglichten kurze Ultraschallimpulse bei guter Ankopplung (vgl. Abb. 5.7). Neben dem oben bereits erwähnten Prüfkopf S 140B bzw. dessen Nachfolgetyp S 9204 der Firma Dunegan/Endevco wurden zwei Sonden der Firma Piezotest Typ 0,03 SS 20 und 0,25 SS 20 am Beton erprobt. Diese brachten jedoch im Vergleich zu den am Institut für Baustoffkunde bereits vorhandenen Prüfköpfen keine Verbesserung. Für die Ultraschalluntersuchungen (s. Kap. 7) wurde daher der Typ S 9204 gewählt. Da diese Sonde nur 22,6 mm Durchmesser und eine Höhe von 14,2 mm hat, läßt sie sich leicht mit Vaseline am Beton ankoppeln und haftet anschließend ohne Halterung

infolge der Kohäsionskräfte. Die Güte der Ankopplung läßt sich leicht mit der Schaltung nach Abb. 5.2 überprüfen. Der Frequenzbereich dieser Sonde konnte mit Hilfe des unter 6.2.3 beschriebenen Schmalbandsenders bei den Ultraschallprüfungen zwischen 50 bis 180 kHz gewählt werden, wobei die Verstärkung des Empfängers um ca. 18 dB geändert werden mußte. Die Sonde ließ sich leicht mit Modellkitt abdichten, so daß sie auch unter Wasser für die Tauchtechnikprüfungen des Betons benutzt werden konnte.

6. Entwicklung und Bau einer universellen Prüfelektronik für bautechnische Anwendungen

6.1 Anforderungen an eine universelle Prüfelektronik

Eine Prüfelektronik für baupraktische Ultraschalluntersuchungen besteht prinzipiell aus einem Sender und einem Empfänger. Die Verbindung zwischen beiden Baugruppen bildet der Übertragungskanal Prüfkopf-Beton-Prüfkopf. Insbesondere der Baustoff Beton begrenzt infolge seines stark inhomogenen Aufbaus, der eine frequenzabhängige Schallschwächung verursacht, die Bandbreite des Kanals je nach Bauteildicke auf unter 100 kHz. Eine für die Elektronik vorgegebene obere Grenzfrequenz von 400 kHz ist daher für alle Messungen ausreichend.

Um das Frequenzspektrum den Untersuchungen anpassen zu können, sollten neben der üblichen Anregung der Prüfköpfe mit einem einseitigen Spannungstoß auch Sendetechniken möglich sein, die sowohl eine Variation der Prüffrequenz als auch Veränderungen von Breite und Form des Sendeimpulses zulassen. Für alle dazu notwendigen Einstellungen am Sender muß eine hohe Reproduzierbarkeit bestehen. Die Kontrolle der Prüffrequenz und der Pulsbreite sollte mit Digitalanzeigen erfolgen.

Der Empfänger hat die Aufgabe, Veränderungen des abgestrahlten Sendeimpulses zu messen, die beim Durchgang des Baustoffes Beton auftreten. Außer der üblichen Laufzeitmessung gehören hierzu Intensität (bzw. Impulsamplitude) und Frequenzanalyse.

Bei allen Ultraschallmessungen sind automatische, d.h. perso-

nenunabhängige Registrierung und Aufzeichnung der Prüfdaten anzustreben. Zu beachten ist, daß die für die Defektoskopie wichtigen Parameter nur in einem bestimmten Zeitbereich liegen. Je nach Meßverfahren und Bauteilabmessungen muß deshalb eine Blende einstellbar sein, in der das Empfangssignal ausgewertet wird. Signale außerhalb der Blende müssen hinreichend unterdrückt werden, damit sie auf die Messung keinen Einfluß haben. Für automatische Prüfung ist ferner eine Ja/Nein-Entscheidung bezüglich fehlerbehafteter Bauteilbereiche günstig.

Eine Ultraschallelektronik, die alle aufgestellten Anforderungen erfüllt, mußte im Rahmen dieser Arbeit speziell entwickelt und aufgebaut werden, da universelle Prüfgeräte für das Bauwesen noch nicht erhältlich sind. Im folgenden werden deshalb die einzelnen, teilweise recht umfangreichen Komponenten der Anlage anhand von Blockschaltbildern beschrieben, ohne auf Einzelheiten der Schaltungen einzugehen. Die Wirkungsweise wird mit Hilfe von Oszillogrammen gezeigt.

6.2 Ultraschallsender

6.2.1 Breitbandsender

Ein elektrischer Spannungsstoß, der aus der Entladung eines Kondensators C über einen Widerstand R gebildet wird, ist die elektronisch einfachste und auch in der Ultraschalltechnik verbreitetste Art der Prüfkopfanregung. Der aus dieser Entladung entstehende, meist negative Impuls mit einer Amplitude von einigen hundert bis tausend Volt erzeugt ein breites Frequenzspektrum, welches bei 0 Hz beginnt und ab der Eckfrequenz ($1/RC$) mit 20 dB/Dekade abnimmt. Im Gegensatz zu den unten beschriebenen Sinus-Burst- und Schmalbandsendern werden Prüffrequenz und Breite des Sendeimpulses vom angeschlossenen Prüfkopf bestimmt und lassen sich vom Sender nicht beeinflussen. Die Länge des Anschlußkabels zwischen Sender und Prüfkopf beeinflußt außerdem den Sendeimpuls, da die Ausgangsimpedanz des Senders aus der Parallelschaltung des Widerstandes R und des Kondensators C gebildet wird und die Impedanz des Kabels hierzu parallel geschaltet wird (vgl. [129]). Mit breitbandigen Prüfköpfen lassen sich mit der Stoßanregung die kürzesten Impulse erreichen. Für die Ultraschallspektroskopie bietet diese Art der Anregung infolge der

breitbandigen Impulse den größten Informationsinhalt.

Um die Reproduzierbarkeit der abgestrahlten Sendeimpulse auch bei unterschiedlichen Bauteilabmessungen und die damit bedingten, unterschiedlichen Kabellängen zu ermöglichen, wurde der entwickelte Breitbandsender von der übrigen Elektronik getrennt in ein kleines Aluminiumgehäuse ($7,1 \times 5,7 \times 2,8 \text{ cm}^3$) eingebaut, welches am Prüfobjekt Platz findet. Bei allen Messungen kann mit dem separat aufgebauten Sender immer dasselbe, vom Hersteller mitgelieferte Anschlußkabel für den Prüfkopf benutzt werden. Der Sender erhält von der Meßelektronik die Versorgungsspannungen und den Triggerimpuls über ein Versorgungskabel, welches auch bei unterschiedlichen Längen den Sendeimpuls nicht beeinflusst.

Der Sender besteht im wesentlichen aus einem Thyristor, der einen auf 300 V aufgeladenen Kondensator von 15 nF über einen Widerstand von 470Ω entlädt. Die Diodenschalter nach Abb. 5.2 werden ebenfalls mit in das Gehäuse eingebaut, so daß eine An-koppelkontrolle des Sendeprüfkopfes und eine gleichzeitige Verwendung des Sendeprüfkopfes als Empfangskopf für Echo-Impuls-Betrieb möglich wird. Abb. 6.1a zeigt den etwa $2 \mu\text{s}$ breiten Sendeimpuls und Bild b das zugehörige Frequenzspektrum ohne angeschlossenen Prüfkopf.

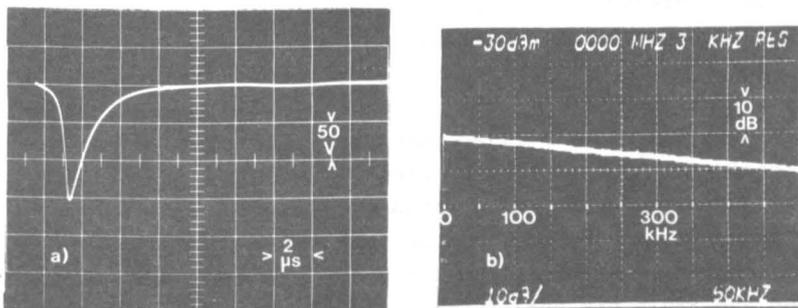


Abb. 6.1 Breitbandiger Sendeimpuls

- a) Darstellung auf dem Oszilloskop
- b) Frequenzspektrum

Der Frequenzgang verläuft im Übertragungsbereich des verwendeten Prüfkopfes S 9204 nahezu horizontal. Der Sender ist daher für Ultraschallspektroskopie am Baustoff Beton geeignet.

Das Spektrum wurde mit dem Analyser Typ 7L14 (Fa. Tektronix) aufgenommen, der zeitweise für die Messungen zur Verfügung stand. Da dieses Gerät besonders für den MHz-Bereich (bis 1600 MHz) konzipiert wurde, ist die Anwendung in dem für den Baustoff Beton benutzten Frequenzbereich nicht optimal. Deshalb wurde für Messungen am Beton im Frequenzbereich von 10-400 kHz ein Gerät selbst entwickelt (vgl. 6.3.4).

6.2.2 Sinus-Burst-Sender

Für die Durchschallung des Betons über größere Bauteildicken ist es günstig, die Sendeenergie nicht wie unter 6.2.1 beschrieben auf ein relativ breites Frequenzspektrum zu verteilen, sondern in einem für die Prüfung optimalen Frequenzbereich zu konzentrieren. Die Prüffrequenzeinstellung am Sender wird mit einem getakteten Sinuswellenzug als Sendeimpuls möglich. Ein nach diesem Prinzip arbeitender Sender ist wesentlich aufwendiger und wird selten benutzt.

Der entwickelte Sinus-Burst-Sender besteht aus drei Baugruppen (Abb. 6.2), einem Funktionsgenerator, einer Steuerlogik mit einem elektronischen Schalter und einem Leistungsverstärker. Der amplitudengeregelte Funktionsgenerator ist von 20 bis 400 kHz durchstimmbare. Die sinusförmige Ausgangsspannung gelangt auf einen elektronischen Schalter, der in Abhängigkeit der digital vorgeählten Anzahl der Sinuswellen (n -Burst) und der Folgefrequenz den Signalweg zum Leistungsverstärker öffnet. Die Steuerlogik erzeugt synchron zu den Nulldurchgängen des Sinussignals eine Rechteckspannung, die von einem Dezimalzähler verarbeitet werden kann. Dieser wird mit der Anzahl n über einen Vorwahlschalter geladen und zählt bis null rückwärts. Nur während des Zählens ist der elektronische Schalter zur Endstufe geschlossen. Die Burstfolgefrequenz (10 - 1000 Hz) bestimmt ein monostabiler Multivibrator, der sich grob in drei Stufen und zusätzlich fein einstellen läßt. Eine Optimierung des Sendeimpulsabstandes für unterschiedliche Bauteildicken ist damit leicht möglich.

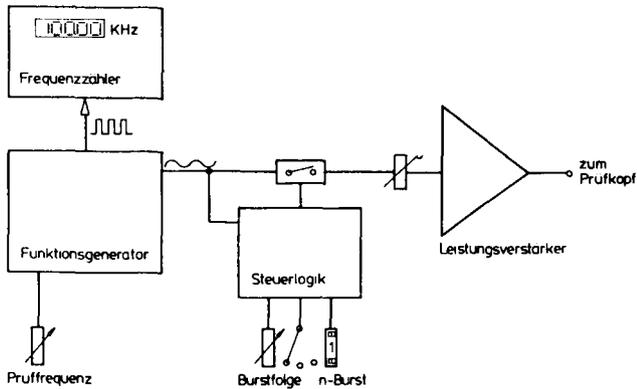


Abb. 6.2 Blockschaltbild des Sinus-Burst-Senders

Der Leistungsverstärker, ein diskret aufgebauter Operationsverstärker, liefert Ausgangsspannungen bis zu $250 V_{SS}$ (Spannung zwischen positiver und negativer Amplitude). Die Kabellänge zwischen Sender und Prüfkopf hat wegen der niedrigen Ausgangsimpedanz im Gegensatz zum Breitbandsender (6.2.1) keinen entscheidenden Einfluß auf die Form des abgestrahlten Sendeimpulses. Die gewählte Prüffrequenz zeigt ein im selben 19-Zoll-Gehäuse eingebauten Frequenzzähler mit einer Auflösung von 10 Hz an.

Abb. 6.3 gibt den Sendeimpuls bei einer Frequenz von 100 kHz für $n = 1, 2$ und 3 wieder. Die Bilder 6.3b und c stellen das Frequenzspektrum dar. Das Maximum liegt bei der eingestellten Frequenz von 100 kHz und wächst bei gleicher Ausgangsamplitude des Senders mit steigendem n an. Gleichzeitig bilden sich weitere Nullstellen im Spektrum. Wegen der Nullstellen ist diese Art der Prüfkopfانregung für eine Frequenzanalyse ungünstig. Sie hat jedoch gegenüber der Breitbandanregung nach 6.2.1 den Vorteil, daß die Sendeenergie auf einen für die Prüfung günstigeren Frequenzbereich konzentriert ist. Mit der Burst-Anregung ist daher bei gleicher Sendespannung und optimaler Wahl der Prüffrequenz mit einer höheren Empfangsamplitude zu

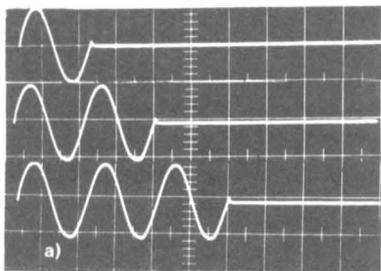
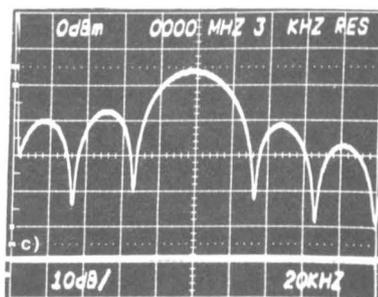
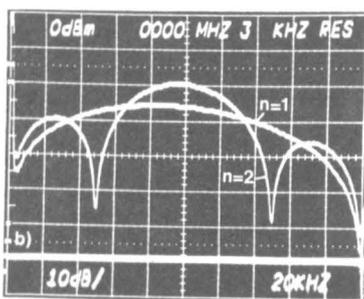


Abb. 6.3

Sinus-Burst-Sendeimpuls 100 kHz

- a) Oszilloskopdarstellung
n = 1, 2 und 3
- b) Frequenzspektrum für
n = 1 und 2
- c) Frequenzspektrum für n = 3



6.2.3 Schmalbandsendetechnik

6.2.3.1 Prinzip

Bei breitbandiger Prüfkopfkopfpanregung bestimmt der Prüfkopf die zeitliche Länge des Impulses. Ist das Sendespektrum schmäler als das Kopfspektrum, so folgt der Kopf dem Sendespektrum und eine Steuerung seines An- und Abschwingvorgangs wird möglich. Die Vorteile einer schmalbandigen Anregung bestehen darin, daß höhere Frequenzanteile unterdrückt werden, die Rauschen durch Streuung an Korngrenzen erzeugen, und niederfrequente Anteile, die aufgrund ihrer zu großen Wellenlänge die Fehler nicht auflösen, ebenfalls nicht im Sendespektrum vorkommen. Bei schmalbandigen Sendepulsen wird die spektrale Zusammensetzung

der Impulse nicht durch Dämpfung im Bauteil geändert, die Impulsform bleibt auch nach mehreren Reflexionen erhalten. Zur Erzeugung schmalbandiger Sendeimpulse wurden von Crostack [130] verschiedene Hüllkurven zur Modulation der Prüffrequenz untersucht. Eine rechteckige Hüllkurve (Sinus-Burst) verursacht neben der Trägerfrequenz im Spektrum infolge der Schaltvorgänge ein relativ breites Frequenzspektrum (vgl. Abb. 6.3 b, c). Bei der CS-Technik (Controlled Signals) [131,132,133,134] wird die Anregung aus einer monochromatischen Wechselspannung (Prüffrequenz) mit einem Dreieck- oder Sinus-Impuls verschiedener Exponenten moduliert, dessen Dauer τ stets größer als die Schwingungsdauer der zu modulierenden Prüffrequenz sein muß. Ein CS-Ultraschallsender wird von der Firma Karl Deutsch angeboten. Für Ultraschalluntersuchungen mit schmalbandigen Impulsen am Baustoff Beton mußte jedoch ein spezieller, niederfrequenter Sender mit einer höheren Ausgangsspannung entwickelt werden.

6.2.3.2 Aufbau des Schmalbandsenders

Der selbstentwickelte Schmalbandsender wurde in ein 19-Zoll-Gehäuse mit drei Höheneinheiten (13,2 cm) eingebaut (Abb. 6.4). Das Blockschaltbild (Abb. 6.5) stellt die relativ aufwendige Elektronik dar. Für den Sender sind drei Generatoren notwendig, jeweils einen für die Pulsfolge, Prüffrequenz und Hüllkurve. Die beiden Baugruppen Leistungsverstärker und Prüffrequenz-generator sind baugleich mit denen des Sinus-Burst-Senders. Die Variation der Prüffrequenz und die maximale Ausgangsspannung ($250 V_{SS}$) sind daher dem Burst-Sender gleich.

Prüffrequenz und Pulsbreite lassen sich ständig von Digitalanzeigen ablesen. Die Pulsbreite ist wählbar zwischen 5 und 500 μs . Als Hüllkurven sind Dreieck, $(\text{Dreieck})^2$, $(\sin)^2$ und $(\sin)^4$ vorgesehen. Die Funktionen Dreieck und $(\sin)^2$ werden direkt über elektronische Schalter und durch Überlagerung mit einer Gleichspannung gewonnen, $(\sin)^4$ und $(\text{Dreieck})^2$ entstehen durch Quadrieren mit einem Analogmultiplizierer. Die Prüffrequenz wird mit der gewählten Hüllkurve moduliert, wozu ein

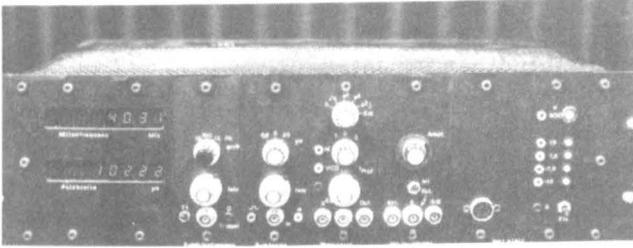


Abb. 6.4 Schmalbandsender für baupraktische Anwendungen

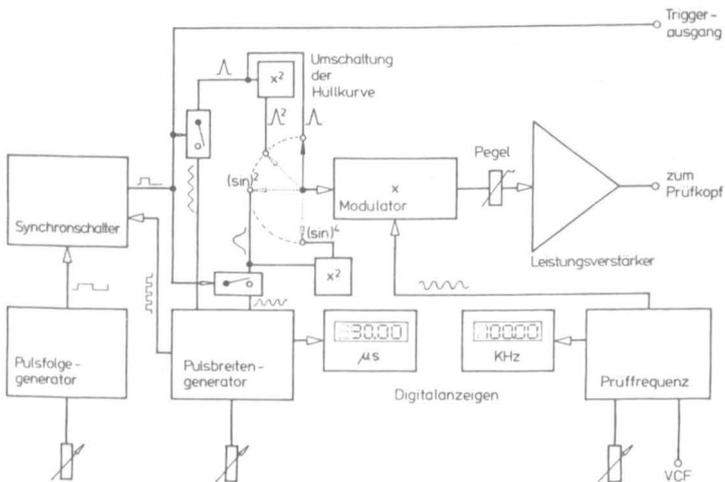


Abb. 6.5 Blockschaltbild des Schmalbandsenders

weiterer Multiplizierer vorgesehen ist. Die gesamte Schaltung besteht bis auf den Leistungsverstärker weitgehend aus integrierten Schaltkreisen, so daß eine hohe Zuverlässigkeit erreicht wird. Ein synchroner Taktschalter zwischen dem Pulsfolge-

und dem Prüffrequenzgenerator ist notwendig, damit alle Sendepulse die eingestellte Pulsbreite haben. Der Taktimpuls wird jeweils erst zu Beginn der Hüllkurve wirksam. Der Sender ist mit verschiedenen Anschlußbuchsen (BNC) versehen, die eine Funktionsüberprüfung der einzelnen Baugruppen zulassen, ohne das Gerät zu öffnen.

Der Prüffrequenzgenerator wurde zusätzlich mit einer Anschlußbuchse zur Frequenzmodulation versehen. Mit Hilfe eines extern angeschlossenen Generators kann die Frequenz periodisch auf- oder abgesteuert werden (Frequenzsweep). Für die Ultraschallprüfung ergibt sich dadurch eine einfache Methode, die geeignete Prüffrequenz zu finden.

Abb. 6.6a zeigt das Ausgangssignal des Schmalbandsenders bei $f = 100 \text{ kHz}$, $\tau = 40 \mu\text{s}$ und $(\sin)^4$. Das Frequenzspektrum läßt sich über die Wahl der Pulsbreite steuern (Abb. 6.6b); im Gegensatz zum Sinus-Burst entstehen bei größeren Pulsbreiten keine zusätzlichen Nullstellen im Spektrum (vgl. Abb. 6.3b1 und 2).

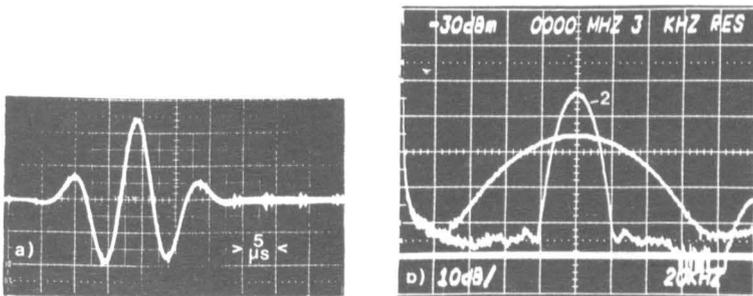


Abb. 6.6 Schmalbandiger Sendepuls 100 kHz , $(\sin)^4$

- a) Darstellung auf dem Oszilloskop $\tau = 40 \mu\text{s}$
- b) Frequenzspektrum bei $\tau = 40^{(1)}$ und $\tau = 150 \mu\text{s}^{(2)}$

6.3 Automatische Auswertung des Empfangssignals

6.3.1 Verstärkung und Gleichrichtung

Die vom Prüfkopf kommende Empfangsspannung erreicht je nach Reflexionen und Länge des Laufweges und der Homogenität des Betons Werte von einigen 100 μV bis zu einigen Volt. Für die automatische Auswertung ist es erforderlich, bei allen Messungen eine Signalspannung $\leq 2 V_{SS}$ im Monitorbereich bereitzustellen. Die erforderliche Pegelanhebung erfolgt in einem Vorverstärker und einem in der Auswerteeinheit befindlichen Hauptverstärker (Abb. 6.7).

Wichtig für die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse ist ein separater, direkt an der Probe befindlicher Vorverstärker, mit dem sich eine gleichbleibende Abschlußimpedanz des Prüfkopfes erreichen läßt, damit die Kabellänge (d.h. Lastkapazität) auch bei unterschiedlichen Bauteilabmessungen gleich bleibt. Die niederohmige Ausgangsimpedanz des Vorverstärkers (50 Ω) erlaubt nahezu beliebig lange Verbindungskabel zum Hauptverstärker.

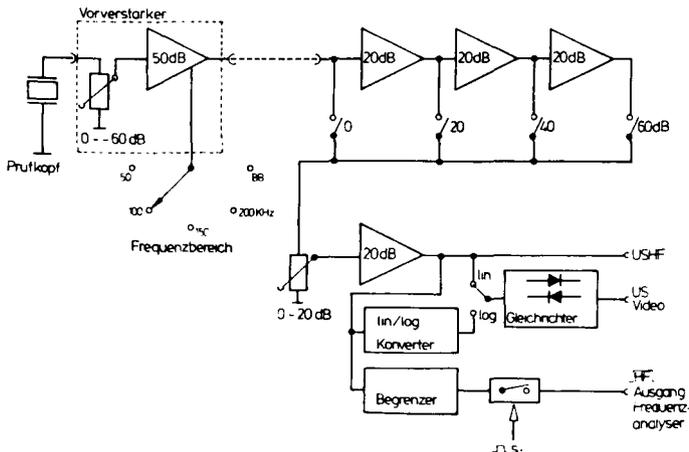


Abb. 6.7 Aufbereitung des Empfangssignals

Der Vorverstärker ist aus rauscharmen Einzelhalbleitern und einer Ausgangsstufe mit einem Operationsverstärker aufgebaut. Die Verstärkung beträgt 50 dB; eine schaltbare Abschwächung am Eingang von 0 bis -60 dB in 20 dB-Stufen ist vorgesehen. Der Eingangswiderstand beträgt in allen Bereichen 100 k Ω . Die Verstärkung läßt sich auf einzelne schaltbare Frequenzbänder (50, 100, 150 und 200 kHz) begrenzen oder breitbandig von 20 bis 400 kHz wählen. Im Gegensatz zur breitbandigen Verstärkung weist eine selektive einen größeren Störspannungsabstand auf, der sich aus einem kleineren Verstärkerrauschen und einer geringeren Empfindlichkeit gegenüber Störimpulsen ergibt. Die Breite der Frequenzbänder ist jeweils größer als 40 kHz, so daß keine nennenswerte Impulsverformung auftritt. Wird die Bandbreite des Verstärkers kleiner als die des Prüfkopfes gewählt, so erfolgt eine Verbreiterung der Ultraschallimpulse. Die Ausgangsspannung beträgt bis zu $2 V_{SS}$, wobei eine Übersteuerungsreserve von 20 dB bei einer Belastung ≥ 1 k Ω (Eingangswiderstand des Hauptverstärkers) vorhanden ist.

Der Hauptverstärker (vgl. Abb. 6.7) besitzt eine Verstärkungseinstellung von 0 bis 60 dB in 20 dB-Stufen und eine Feineinstellung (2 dB-Stufen) von 0 bis 20 dB. Mit dem großen einstellbaren Verstärkungsbereich von über 120 dB (Vorverstärker eingeschlossen) lassen sich praktisch alle vorkommenden Ultraschallsignale im baupraktischen Anwendungsbereich verarbeiten.

Die Ausgangsspannung des Hauptverstärkers (US-HF) kann zur Darstellung auf einem Oszilloskop (Typ HM 504, Firma Hameg) an einer BNC-Buchse entnommen werden.

Für den Anschluß des Spektrumanalysators (vgl. 6.3.4) gelangt das US-HF-Signal über eine Begrenzerstufe und einen elektronischen Schalter (geöffnet über den Schaltimpuls S_1 der unter 6.3.2 beschriebenen Ablaufsteuerung) zur Anschlußbuchse. Damit läßt sich die Frequenzanalyse in einem ausgewählten Zeitbereich durchführen. Infolge von Reflexionen kann die Amplitude, die innerhalb der Blende $\leq 2 V_{SS}$ betragen soll, in anderen Zeitbereichen wesentlich größer sein (max. $22 V_{SS}$).

Für den Analogschalter, der nur Spannungen bis zu $10 V_{SS}$ schalten kann, wird die maximale Eingangsspannung auf $6 V_{SS}$ begrenzt. Kleinere Spannungen werden vom Begrenzer nicht beeinflusst.

Das US-HF-Signal kann für eine Intensitätsmessung zusätzlich logarithmiert werden. Eine Logarithmierung bietet Vorteile für die Fehlerdarstellung über Amplituden-Ortskurven (vgl. 7.2). Die mit zwei Verstärkerketten erreichte Logarithmierung verarbeitet eine Dynamik von 70 dB. Der Arbeitspunkt des Konverters ist so gewählt, daß 20 dB Übersteuerungsreserve zur Verfügung stehen. Damit vereinfacht sich bei Intensitätsmessungen (vgl. 6.3.3) die Verstärkungseinstellung.

Für die automatische Laufzeit- und Intensitätsmessung ist eine Gleichrichtung des Ultraschallsignals notwendig. Dazu wurde ein Präzisionsgleichrichter aus zwei breitbandigen Operationsverstärkern und zwei Schottky-Dioden aufgebaut. Die Schaltung bildet vom Eingangssignal exakt das Betragssignal, d.h. positive Halbwellen am Eingang bleiben am Ausgang positiv, die negativen werden zu positiven Halbwellen (Abb. 6.8).

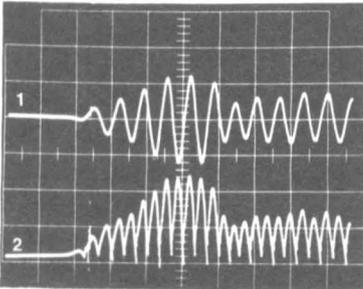


Abb. 6.8

Gleichrichtung des Ultraschallsignals

1 Eingangsspannung (US-HF)

2 Ausgangsspannung (US-Video)

Das Ausgangssignal des Gleichrichters wird mit US-Video bezeichnet und kann an einer BNC-Buchse abgenommen werden.

6.3.2 Laufzeitmessung

Die Laufzeit des Ultraschallsignals im Baustoff Beton reicht vom Sendeimpuls (Triggersignal) bis zum Eintreffen des ersten Empfangsimpulses, wenn von der Laufzeit in den Prüfköpfen abgesehen wird. Für die verwendeten Prüfköpfe S 9204 beträgt sie $0,73 \mu\text{s}$. Bei einer absoluten Bestimmung der Schallgeschwindigkeit des Betons muß dieser Wert von der gemessenen Gesamtlaufzeit subtrahiert werden, bei Relativmessungen (Defektoskopie) stört diese Laufzeit jedoch nicht, da sie bei allen Messungen gleich ist. Mit dem Triggersignal wird das Laufzeit-Flip-Flop gesetzt (Abb. 6.9). Beim Eintreffen des ersten Empfangssignals gibt der Komparator einen Impuls ab, der das Flip-Flop wieder zurücksetzt. Später eintreffende Ultraschallimpulse werden ebenfalls vom Komparator registriert, haben jedoch keinen Einfluß auf das Ausgangssignal des Flip-Flops, welches seinen Zustand bis zum nächsten Triggersignal beibehält. Der Komparator kann nur positive Eingangsspannungen verarbeiten und erhält deshalb das gleichgerichtete Ultraschallsignal. Ein Videoverstärker und ein Tiefpaßfilter (400 kHz) vor dem Komparator bereiten das Videosignal auf.

Am Ausgang des Flip-Flops entsteht das Laufzeitmeßsignal, ein Impuls, dessen Breite die Laufzeit des Ultraschallimpulses im Beton darstellt. Bei manuellen Messungen (Handankopplung) wird die Pulslänge mit einem digitalen Multifunktionszähler Typ FU 7226 B (Zählerbausatz der Firma Spezial-Electronic) gemessen. Der Zähler führt eine digitale Mittelwertbildung über 100 Einzelmessungen aus. Bei einem Sendeimpulsabstand von 10 ms (100 Hz Taktfrequenz) dauert eine Laufzeitmessung 1 s. Der Vorteil der Mittelung liegt darin, daß elektronisches Rauschen, welches dem Ultraschallsignal überlagert ist und den Komparator dadurch geringfügig früher oder später zum Ansprechen bringt, weitgehend herausgemittelt wird. Der Zähler erreicht eine Laufzeitauflösung von 1 ns. Wegen des elektronischen Rauschens ist diese Anzeigestelle jedoch Schwankungen unterworfen, so daß für die Meßpraxis 10 ns angegeben werden können. Dies entspricht einer Änderung des Laufweges im Beton von 0,04 mm.

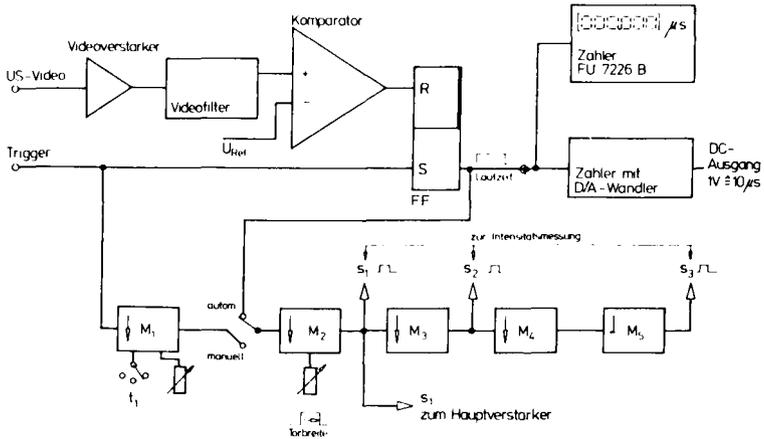


Abb. 6.9 Blockschaltbild der Laufzeitmessung und der Ablaufsteuerung

Zur automatischen Aufzeichnung der Impulslaufzeit (Laufzeitortskurve) wurde ein 4-stelliger Zähler mit Digital-Analog-(D/A-)Wandler aufgebaut, der über 10 Messungen eine Mittelwertbildung durchführt. Die Auflösung beträgt $0,1 \mu\text{s} = 100 \text{ ns}$. Eine Mittelung über 100 Messungen würde die Meßzeit vergrößern, ohne die höhere Genauigkeit bei den Schreiberdarstellungen ausnutzen zu können. Die vom D/A-Wandler abgegebene Gleichspannung beträgt $0,1 \text{ V} / \mu\text{s}$ mit einer Linearität von $0,005 \%$.

6.3.3 Intensitätsmessungen

Das Empfangssignal kann bereits nach den ersten eintreffenden Ultraschallamplituden infolge von Störreflexionen beeinträchtigt werden (vgl. 4.3). Mit einer elektronischen Blende ergibt sich die Möglichkeit, nur einen bestimmten, noch zu optimierenden (vgl. 7.2.4) Zeitbereich aus dem Empfangssignal auszutasten und in die Auswertung einzubeziehen.

Die Intensitätsmessung erfolgt automatisch in einem Blendenbereich der mit t_1 beginnt und die Dauer t_2 besitzt. Bei Durchschallungsmessungen kann t_1 gleich der Impulslaufzeit im Beton

sein. Für diesen Fall wird der Schalter in der Abb. 6.9 in die Stellung "automatisch" gebracht. Die Zeit t_1 läßt sich auch manuell mit dem monostabilen Multivibrator M_1 wählen, der vom Triggerimpuls gestartet wird. In beiden Fällen ist die Breite der Blende t_2 manuell zwischen 5 und 50 μs am Multivibrator M_2 einstellbar, der das Torsignal S_1 erzeugt.

Da die Blendenbreite im Vergleich zur Impulsdauer der Taktfrequenz (Abstand von Sendepuls zu Sendepuls) sehr klein ist (ca. 1 : 1000) und außerhalb des Tores für die Auswertung kein Signal zur Verfügung steht, mußte der Meßmethode besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Eine einfache Tiefpaßfilterung (Mittelwertbildung) ist ungünstig, weil sich mit ihr nur sehr kleine Ausgangsgleichspannungen erzeugen lassen. Eine Spitzenwertmessung erhöht zwar die Ausgangsspannung auf 2 V, ist jedoch gegenüber Störspannungsspitzen (z.B. Funkenstörungen von elektrischen Maschinen) sehr empfindlich. Innerhalb des Tores wird daher das Meßsignal integriert. Der aufgebaute Integrator (Abb. 6.10) besteht aus dem Widerstand R_1 , dem Operationsverstärker OP_1 und dem Kondensator C_1 . Da sich die Spannung am Ausgang des Integrators U_a nach jedem Meßzyklus erhöhen würde, muß dieser vor jedem Sendepuls auf null zurückgesetzt werden. Mit der Anfangsbedingung $U_a = 0$ für $t = t_1$ ergibt sich die Ausgangsspannung des Integrators zu:

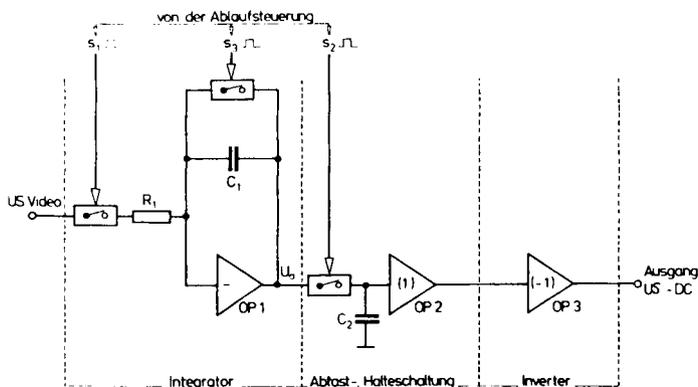


Abb. 6.10 Blockschaltbild der Intensitätsmessung

$$U_a = - \frac{1}{R_1 C_1} \int_{t_1}^{t_1+t_2} U(t') dt' \quad (6.1)$$

$U(t')$ stellt das gleichgerichtete Ultraschallsignal dar.

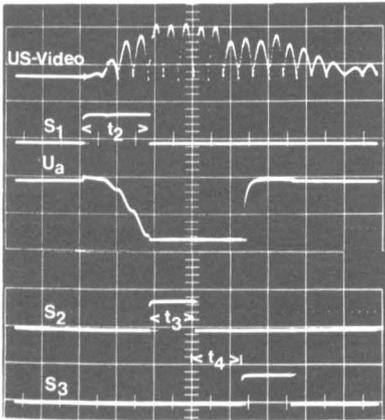


Abb. 6.11

Impulsdiagramm zur Intensitätsmessung

Eine Abtast- und Halteschaltung, aufgebaut mit dem Operationsverstärker OP_2 , dem Kondensator C_2 und einem Analogschalter (Abb. 6.10), speichert den Wert der Ausgangsspannung des Integrators bis zur nächsten Messung. Der Operationsverstärker OP_3 invertiert das Signal, so daß eine positive Spannung (US-DC) entsteht, die mit einem Digitalvoltmeter gemessen oder mit einem XY-Schreiber aufgezeichnet werden kann (Amplitudenortskurven).

Das Impulsdiagramm (Abb. 6.11) zeigt den zeitlichen Ablauf der Messung. Der Steuerimpuls S_1 öffnet das Analogtor für den Integrator. Die Ausgangsspannung U_a wird mit S_2 auf C_2 übertragen. Die Zeit t_4 sorgt dafür, daß sich S_2 und S_3 nicht überlappen. S_3 setzt den Integrator auf null. S_1 , S_2 und S_3 sowie t_4 werden von den in Serie geschalteten monostabilen Multivibratoren M_1 bis M_4 (Abb. 6.9) erzeugt.

6.3.4 Frequenzanalyse

Mit der Wahl der Prüffrequenz f läßt sich die Wellenlänge λ festlegen, die die Auflösung (kleinste Fehlergröße) der Ultraschallmessungen bestimmt. Um reproduzierbare Ultraschallmessungen zu erhalten, ist es daher wichtig, das verwendete Frequenzband zu kennen. Für die Frequenzanalyse der empfangenen Ultraschallsignale wurde deshalb ein Spektrumanalysator entwickelt und aufgebaut. Das Gerät zeichnet mit Hilfe eines XY-Schreibers das Frequenzspektrum des Eingangssignals im Frequenzbereich von $f_E = 10$ bis 400 kHz auf. Die Frequenz wird auf der Abszisse dargestellt, die Ordinate gibt die jeweilige Amplitude im Dynamikbereich von 70 dB an.

Der in ein 19-Zoll-Gehäuse eingebaute Spektrumanalysator ist nach dem Suchtonverfahren aufgebaut. Mit einem durchstimmbaren Filter wird das Eingangssignal abgetastet. Dazu ist eine Mischung der Eingangsspannung f_E auf die gewählte Zwischenfrequenz von 455 kHz erforderlich. 455 kHz wurden als Zwischenfrequenz f_Z gewählt, weil für diese Frequenz serienmäßig Schwingquarze und keramische Filter erhältlich sind.

Der Mischer multipliziert die Eingangsspannung mit der zur Frequenzumsetzung notwendigen Oszillatorspannung. Aufgrund des Additionstheorems des Sinus gibt es bei einer Zwischenfrequenz f_Z und einer Oszillatorfrequenz f_O zwei Eingangsfrequenzen f_E und $f_{E'}$:

$$f_E = f_O - f_Z \quad \text{und} \quad f_{E'} = f_O + f_Z \quad (6.2)$$

Mit der Wahl der Oszillatorfrequenz $f_O = 465 - 855$ kHz und $f_Z = 455$ kHz ergeben sich: $f_E = 10 - 400$ kHz und $f_{E'} = 920 - 1310$ kHz. $f_{E'}$ ist die Spiegelfrequenz, die mit dem 400 kHz Tiefpaßfilter am Eingang des Spektrumanalysators (Abb. 6.12) unterdrückt wird. Der LC-Oszillator ($L =$ Induktivität, $C =$ Kondensator) läßt über eine Kapazitätsdiode eine Steuerung seiner Frequenz zu. Die erforderliche Steuerspannung erzeugt ein Rampengenerator, der gleichzeitig nach Betätigung der Start-Taste den Hubmagnet für die Feder am XY-Schreiber einschaltet.

Ein "Frequenzsweep" dauert etwa 45 s. Ein voreinstellbarer Frequenzzähler bildet die Differenz zwischen f_0 und f_z und zeigt die momentane Frequenz an, deren Amplitude gemessen wird. Der eingebaute D/A-Wandler bildet für die Abszisse des XY-Schreibers eine frequenzproportionale Spannung (0,01 V/kHz). Die Genauigkeit der angezeigten Frequenz beträgt $\pm 0,1 \%$. Die Selektion der Zwischenfrequenz übernimmt im wesentlichen ein Quarzfilter mit der Bandbreite von kleiner als 50 Hz. Die für die Y-Achse des Schreibers erforderliche Gleichspannung erzeugt ein logarithmischer Zwischenfrequenzverstärker. Der Frequenzanalysator besitzt einen Eichspannungsausgang, der eine Rechteckspannung von 10 kHz mit einer Amplitude von $0,2 V_{SS}$ zur Kontrolle des Analysators bereitstellt. Infolge

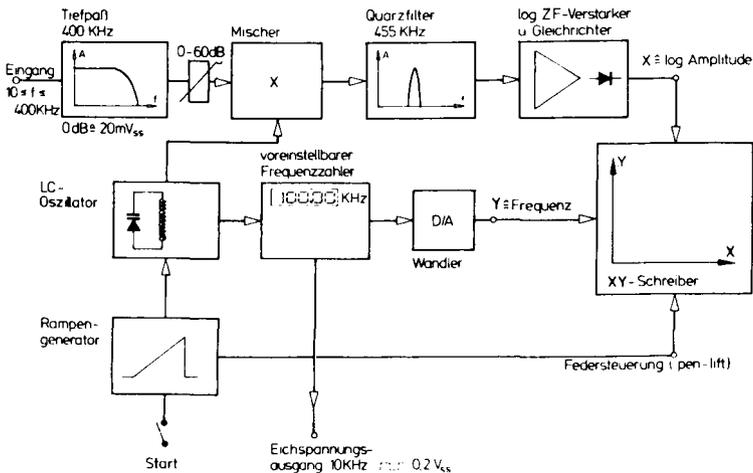


Abb. 6.12 Blockschaltbild des Frequenzanalysators

der hohen Flankensteilheit dieser Spannung reichen die Oberwellen bis in den MHz-Bereich. Abb. 6.12 zeigt die Frequenzanalyse der Eichspannung, die mit dem selbstgebauten Analysator aufgenommen wurde.

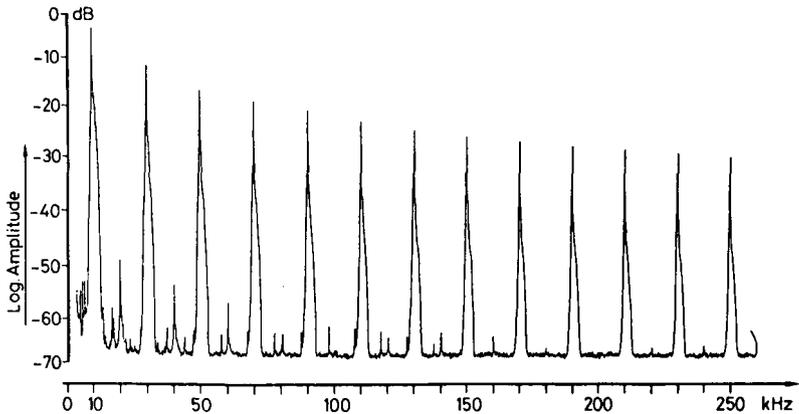


Abb. 6.13 Frequenzanalyse der Eichspannung (10 kHz, 0,2 V_{SS})

6.4 Vollautomatische Aufzeichnung von C-Scans

Um auch Bauteile aus Beton einer automatischen Prüfung unterziehen zu können und gleichzeitig eine reproduzierbare Ankopplung für Intensitätsmessungen zu erhalten, wurde die aufgebaute Elektronik mit der Tauchtechnik - Prüfanlage der DFVLR Braunschweig verbunden. Diese, zur Prüfung von faserverstärkten Kunststoffen ebenfalls vom Verfasser entwickelte und aufgebaute Anlage [135] besitzt ein etwa 1 x 1 m großes Tauchbecken und einen in X-, Y- und Z-Richtung schrittmotorgesteuerten Manipulator. Ein Koordinatensteuergerät zählt die Impulse der Schrittmotore und ermöglicht so eine direkte Anzeige der Prüfkopfposition. Die Zähler verfügen jeweils über einen A/D-Wandler, so daß ein XY-Schreiber synchron zum Prüfkopf mitbewegt werden kann. Die Auflösung der Schrittmotore beträgt 20 Impulse/min. Für unterschiedlich lange Meßwege kann der Maßstab für die Schreiberdarstellungen von 40 : 1 bis 1 : 40 umgeschaltet werden. Das Koordinatensteuergerät hat ein fest verdrahtetes, mäanderförmiges Scan-Pro-

gramm, so daß eine einstellbare Probenfläche vollautomatisch abgetastet werden kann. Die Ultraschallelektronik der CFK-Prüfanlage arbeitet im Frequenzbereich 1 bis 20 MHz und kann deshalb nicht für baupraktische Untersuchungen verwendet werden. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Elektronik liefert sowohl zur Amplitude als auch zur Laufzeit proportionale Ausgangsspannungen, die mit einem XY-Schreiber aufgezeichnet werden können. Mit der Kombination beider Anlagen sind deshalb folgende automatischen Messungen möglich:

1. Amplitudenortskurve
(Aufzeichnung der Amplitude über eine Koordinate)
2. Laufzeitortskurve
3. C-Scan, d.h. zweidimensionale Darstellung der Probe mit pen-lift im Fehlerbereich
4. C-Scan mit eingeblendeter Ultraschallamplitude in perspektivischer Darstellung
5. Laufzeit C-Scan

Für die unter Punkt 3 angegebene Darstellungsart war ein zusätzlicher Komparator erforderlich, der beim Unterschreiten einer einstellbaren Amplitudenschwelle die Feder des Schreibers abheben läßt ("pen-lift").

Die automatischen Durchschallungsmessungen in Tauchtechnik ermöglichen eine systematische Untersuchung des Einflusses der Prüffrequenz, Blendenbreite und Anregung bezüglich der Fehlerauflösung. Die hohe Reproduzierbarkeit gestattet Optimierungen der Meßparameter.

7. Ultraschallmessungen an Probekörpern mit künstlichen Fehlstellen

7.1 Probenbeschreibung

Für defektoskopische Ultraschalluntersuchungen wurden insgesamt 9 Proben angefertigt, 8 Balken mit den Querschnittsflächen $20 \times 20 \text{ cm}^2$ und eine senkrecht betonierte Platte von $100 \times 100 \times 35 \text{ cm}^3$. Störende Reflexionen von seitlichen Begrenzungsflächen lassen sich durch Probekörper mit möglichst großen Abmessungen senkrecht zur Schalleinstrahlung weitgehend ausschließen. Bei Laboruntersuchungen sind jedoch aus Gewichtsgründen zwangsläufig immer Einschränkungen hinsichtlich der Probekörperabmessungen notwendig. Erste orientierende Messungen wurden an 1,30 m langen Balken von $20 \times 20 \text{ cm}^2$ Querschnitt durchgeführt (Probe 1 - 5), die bis auf Probe 1 künstliche Fehlstellen enthielten. Für Tauchtechnikuntersuchungen mußten diese Proben auf 50 cm Länge gekürzt werden (Probe 2a - 5a). Die Länge der nachträglich angefertigten Balken (Probe 6 - 8) wurde in Hinblick auf die Größe des Tauchbeckens mit 50 cm festgelegt.

Die Herstellungsdaten der Probekörper sind in der Tab. 1 zusammengefaßt. Die Probe 8 enthält im Gegensatz zu allen anderen Proben keinen Zuschlag aus der Korngruppe 8/16. Damit läßt sich der Einfluß des Zuschlages auf die Amplitudenortskurven ermitteln. Eine kleinere Körnung bedeutet eine herabgesetzte Streuung des Ultraschalls (vgl. Kap. 3.3.2). Die Meßkurven müßten bei diesem Probekörper im fehlerfreien Bereich eine geringere Welligkeit aufweisen.

Abb.7.1 stellt die Balken mit Fehlstellen dar. Die Schnitte A-B zeigen jeweils die bei den unten beschriebenen Ultraschallprüfungen wirksamen Fehlerabmessungen. Die Proben 2a - 4a weisen Hohlräume auf, die senkrecht auf der Balkenlängsachse stehen. Die Hohlräume ($11 \text{ cm } \emptyset$) der Proben 2a und 4a bilden Durchgangslöcher, während der Hohlraum der Probe 3a nur bis zur Mitte reicht. Eine Mischung aus Grobzuschlägen, Zement und Wasser (Kiesnest) bildet die Füllung des Hohlraums der Probe 4a.

Probekörper	Zement PZ 35 F kg/m ³	W/Z	Zuschlag				Rohdichte kg/dm ³	Würfel- druckfestigkeit	
			Gewichts-% d. Korngruppe					β ₂₈	N/mm ²
			0/1	0/2	2/8	8/16			
1-5	350	0,54	0	34	26	40	2,40	53,6	
6,7	289	0,79	10	45	25	20	2,37	32	
8	294	0,84	10	40	50	0	2,36	30	
9	287	0,74	10	55	25	10	2,34	32	

Tab. 1 : Herstellungsdaten der Probekörper

Die Probe 2b bildete vor dem Absägen das rechte Anschlußstück zur Probe 2a und ist deshalb im Gegensatz zu allen anderen Balken 44,5 cm lang. Testfehler sind 10 cm tiefe Bohrungen (2 und 5 cm Ø)

Mit zunächst einbetonierten Blechen bzw. Holzplatten, die kurz vor dem Erhärten wieder herausgezogen wurden, ließen sich rechteckige "Rißflächen" in den Proben 5a, 6, 7 und 8 erzeugen. Diese "Risse" reichen, wie die Schnitte A-B rechts in Abb. 7.1 zeigen, von der Oberkante bis zur Mitte (Probe 6 und 7) oder erstrecken sich über die gesamte Höhe (P 8). Die Flächennormalen der Rißflächen stehen jeweils senkrecht auf den Probenlängsachsen, mit Ausnahme der Probe 5a, dort weist die Flächennormale in Richtung der Probenlängsachse. Die bei Durchschallung wirksame Rißbreite variiert von 0,3 bis 9,8 cm.

Abb. 7.2 zeigt die 100 x 100 x 35 cm³ große Platte, die einen einbetonierten Styroporkörper (10 x 15 x 10 cm³) als Testfehler enthält. Die Abbildung deutet ferner die Lage des gewählten Koordinatensystems an, welches zur Positionierung der Prüfköpfe benutzt wurde.

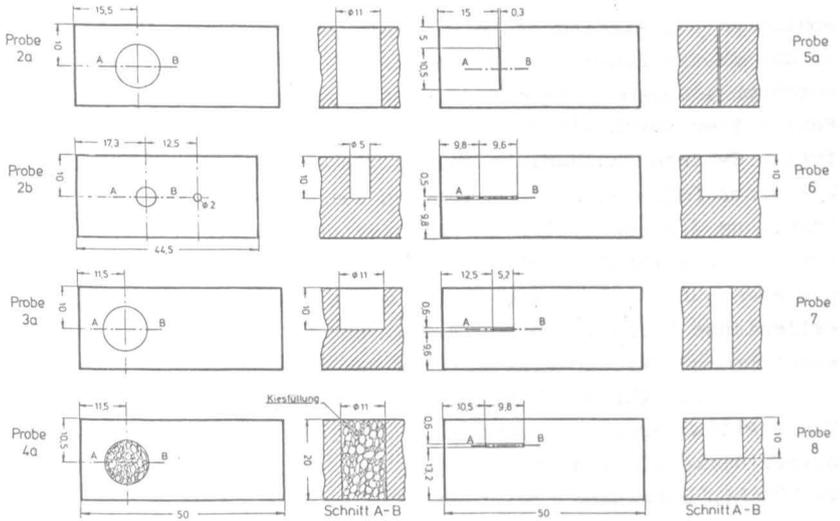


Abb. 7.1: Betonproben mit künstlichen Fehlstellen
(Maße in cm)

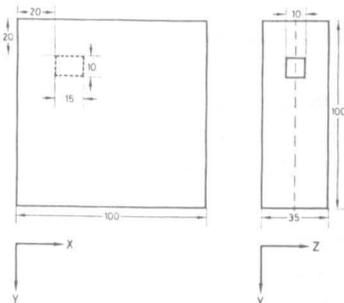


Abb. 7.2:
Probe 9 mit einbetonierter
Styroporplatte

7.2 Optimierung der Parameter für Durchschallungsmessungen

7.2.1 Problemstellung

Hohlräume und Rißflächen verursachen aufgrund des Impedanzsprungs an den Grenzflächen Reflexionen (vgl. 3.16), so daß sich bei Durchschallungsmessung mit dem Intensitätsverfahren (vgl. Abb. 4.2) Fehlstellen durch kleinere Empfangsamplituden gegenüber fehlerfreien Gebieten nachweisen lassen. Da der direkte Schalldurchgang bei einer Fehlstelle nicht möglich ist, muß der nichtreflektierte Anteil um die Fehlstelle herumlaufen. Der damit verbundene längere Laufweg führt zusätzlich zu einer Impulslaufzeitzunahme. Die Abmessungen einer Fehlstelle müssen jedoch mindestens eine Wellenlänge betragen, bevor Reflexionen stattfinden. Aufgrund der kugelförmigen Richtcharakteristik der im Bauwesen benutzten Prüfköpfe ist für den Fehlstellennachweis das Verhältnis aus Fehlstellenquerschnitt senkrecht zur Schallausbreitung und der Bauteildicke wichtig. Die Angaben in der Literatur für dieses Verhältnis schwanken zwischen $1/5$ und $1/10$ [4,85].

Bisher wurde bei defektoskopischen Untersuchungen lediglich die Messung der Impulslaufzeit automatisiert und über den Ort aufgetragen, z.B. bei der Messung von tiefliegenden Betonfundamenten, wo Send- und Empfangsprüfköpfe in Parallelkanäle heruntergelassen wurden [109]. Für den Fehlstellennachweis ist das Intensitätsverfahren (bzw. die Messung der Empfangsamplitude) jedoch der reinen Laufzeitmessung überlegen [29,85] . Bei Messungen außerhalb des Labors wird trotzdem meist auf eine Intensitätsmessung verzichtet, da die manuelle Messung der ersten Empfangsamplitude (Abb. 4.1) sehr zeitaufwendig ist. Der Verstärkungsregler am Prüfgerät muß dafür bei jeder Meßstelle so nachgestellt werden, daß die Amplitude immer die gleiche Höhe erreicht. Die eingestellte Verstärkung ist danach abzulesen und zu notieren.

Mit der im 6. Kapitel beschriebenen Elektronik erfolgt die Messung der Empfangsamplitude automatisch im Bereich der Blende. Daneben ist eine elektronische Ankopplungskontrolle der Prüfköpfe möglich (vgl. 5.3.2). Im Bauwesen wurde bisher auch noch keine automatische Amplitudenmessung bei Impulsdurchschallung durchgeführt. Die von Volkwein [120] beschriebenen automatischen Amplitudenauf-

zeichnungen an Natursteinplatten erfolgten mit Dauerschall. Für defektoskopische Untersuchungen an Betonbauteilen ist Dauerschall aufgrund der auftretenden Interferenzen jedoch ungünstig (vgl. 4.3.1).

Die Untersuchungen hatten deshalb das Ziel, die Parameter der Amplitudenmessung so zu optimieren, daß Fehlstellen sicher aus Amplitudenortskurven zu erkennen sind. Die dafür entwickelte und aufgebaute Meßtechnik erlaubt die Untersuchung der Einflüsse folgender Parameter:

A) Prüffrequenz

Die Wahl der Prüffrequenz ist mit dem Sinus-Burst-Sender und dem CS-Sender stufenlos möglich. Die Prüffrequenz bestimmt die Wellenlänge und damit die Auflösung (kleinste erkennbare Fehlergröße). Eine zu hohe Prüffrequenz (kleine Wellenlänge) ruft bereits an den Zuschlagkörnern unerwünschte Reflexionen hervor, die gegebenenfalls als Fehler gedeutet werden. Eine zu kleine Frequenz (große Wellenlänge) setzt die Nachweisempfindlichkeit so weit herab, daß kleinere Fehlstellen "übersehen" werden. Die Prüffrequenz muß deshalb optimiert werden, wobei auch die Art der Anregung (CS- oder Sinus-Burst) untersucht wird. Vor den Messungen an Betonkörpern ist zu klären, in welchem Frequenzbereich eine spektrale Steuerung (Einstellung der Prüffrequenz und Bandbreite) vom Sender her möglich ist.

B) Blendendauer

Die automatische Amplitudenmessung erfolgt in einem Zeitintervall, dessen Dauer (t_2) optimiert werden muß. Für eine möglichst hohe Amplitudenspannung im fehlerfreien Bereich sollte t_2 möglichst groß sein. Wird t_2 jedoch zu groß gewählt, lassen die Amplitudenortskurven weder in fehlerfreien noch in fehlerhaften Bereichen eine eindeutige Fehleraussage zu, da bei zu großem t_2 auch reflektierte Impulsanteile von Seiten- und Begrenzungsflächen mit in die automatische Auswertung einbezogen werden.

C) Blendenanfang

Der Blendenanfang kann automatisch mit Beginn des ersten Empfangsimpulses oder mit einem festen Zeitabstand t_2 vom Sendepuls erfolgen. Im ersten Fall wird eine echte Amplitudenmessung durchgeführt, im zweiten Fall tritt eine Beeinflussung der Impulslaufzeit ein. Im Fehlstellenbereich kann infolge der Laufzeiterhöhung das Empfangssignal aus der Blende herauslaufen, wodurch die gemessene Spannung kleiner wird. Es ist zu untersuchen, ob dieses quasi-zweiparametrische Meßverfahren Vorteile in Bezug auf die Fehlstellenermittlung bringt.

D) Darstellung der Amplitudenortskurven

Die Amplitudenortskurven sollen in fehlerfreien Bereichen möglichst horizontal verlaufen und im Fehlstellenbereich große Einbrüche zeigen. Es ist daher zu klären, ob eine lineare oder logarithmische Amplitudendarstellung günstiger ist.

Um die bei Amplitudenmessungen wichtige reproduzierbare Ankopplung zu erreichen, wurden die Proben 2a - 5a und 6 - 8 in Tauchtechnik geprüft. Die Ergebnisse dieser Messungen sind jedoch nicht nur bei der Ankopplung über eine Wasserstrecke im Labor gültig, sondern lassen sich selbstverständlich auch für Messungen auf Baustellen und an Bauwerken übertragen, wo die Prüfköpfe in Direktkontakt (mit Vaseline als Koppelmittel) an die Betonoberfläche gebracht werden. Dies wird von den unter 7.4 beschriebenen Ergebnissen bestätigt.

7.2.2 Prüffrequenzspektrum in Abhängigkeit von der Anregung

Wie bereits in der Problemstellung (7.2.1) erwähnt wurde, hängt die Fehlerauflösung entscheidend von der Wellenlänge λ des Ultraschalls ab. Diese läßt sich prinzipiell frei über die Prüffrequenz f wählen ($\lambda = v / f$, $v =$ Schallgeschwindigkeit der Probe). Während bei konventionellen Ultraschallprüfungen für unterschiedliche Prüffrequenzen auch verschiedene Prüfköpfe verwendet werden müssen, läßt sich mit einem frequenzvariablen Sender und einem breitbandigen Prüfkopf die Frequenz vom Sender her bestimmen (vgl. 6.2). Da der Prüfkopf im allgemeinen keine ideale, d.h.

horizontal verlaufende Amplitudenabhängigkeit von der Frequenz hat, ist diese Parametervariation nur in einem bestimmten Frequenzbereich möglich.

Das von den Prüfköpfen übertragene Frequenzband kann mit einem Spektrumanalysator aufgezeichnet werden, wenn der eine Prüfkopf breitbandig angeregt und der andere an den Spektrumanalysator (vgl. 6.3.4) angeschlossen wird. Die beiden Prüfköpfe werden dafür mit Vaseline direkt aneinandergesetzt. Abb. 7.3 zeigt das mit Hilfe eines XY-Schreibers aufgezeichnete Übertragungsverhalten. Das Amplitudenmaximum liegt bei 140 kHz. Die 3 dB-Bandbreite beträgt 16 kHz. Dieser Wert unterscheidet sich von dem aus Kap. 5.3.2 ermittelten (22 kHz), da dort der Prüfkopf am Beton angekoppelt war. Infolge der unterschiedlichen mechanischen Dämpfung ergibt sich eine andere Bandbreite.

Aufgrund des Übertragungsverhaltens (Abb. 7.3) können mit den Prüfköpfen S 9204 Ultraschallprüfungen im Bereich von 80 bis 185 kHz durchgeführt werden, wenn die Verstärkung spiegelbildlich zum Frequenzgang der Sonden bis zu 15 dB erhöht wird.

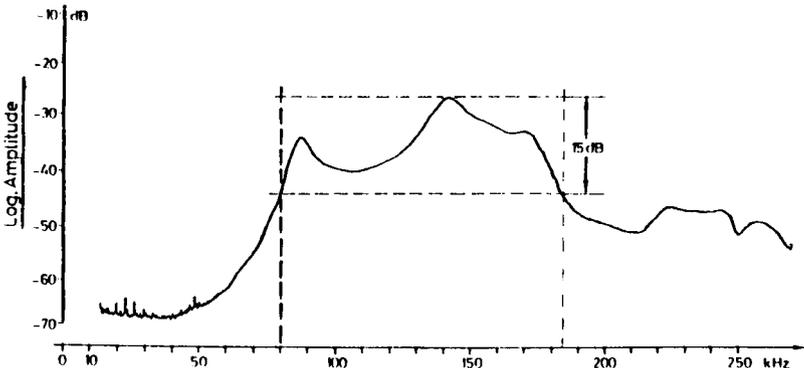


Abb. 7.3: Übertragungsbereich der Prüfköpfe S 9204 bei direkter Kopplung

Die Abb. 7.4a und b veranschaulichen inwieweit eine Steuerung des Prüffrequenzspektrums vom Sender her mit den hier verwendeten Prüfköpfen tatsächlich möglich ist. Bei Sinus-Burst-Anregung (Abb. 7.4a) treten analog zu den Sendespektren (Abb. 6.3) periodische Einbrüche auf. Die am Sender eingestellte Frequenz stimmt nicht mit derjenigen überein, die im Spektrum die größte Amplitude besitzt. Beträgt die eingestellte Frequenz 50 kHz, so treten z.B. auch im Frequenzbereich über 100 kHz große Amplituden auf. Eine spektrale Steuerung mit Hilfe des Burst-Senders ist erst bei höheren Frequenzen (180 kHz) möglich. Mit der CS-Anregung entfallen die periodischen Einbrüche (Abb. 7.4b), eine spektrale Steuerung (d.h. Verschiebung des Prüffrequenzspektrums auf der Abszisse) ist ab 100 kHz zu erreichen. Für eine Optimierung der Prüffrequenz ist daher der CS-Sender wesentlich besser geeignet als die Sinus-Burst-Anregung.

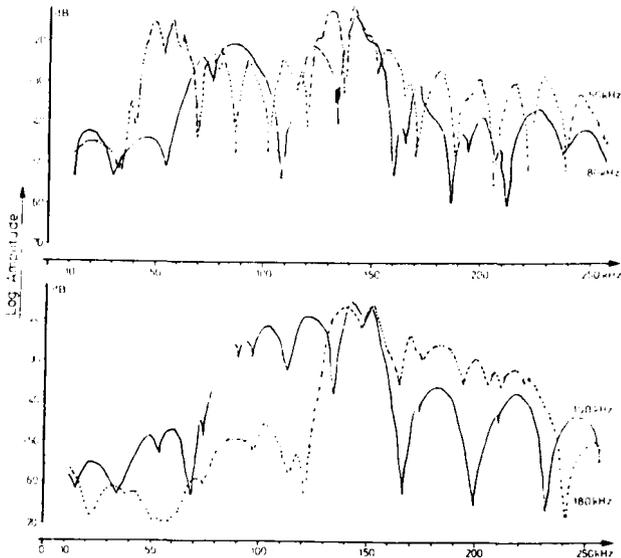
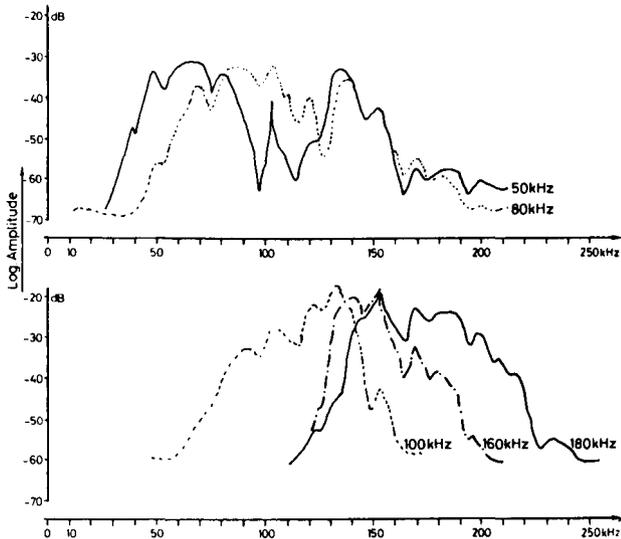


Abb. 7.4: Prüffrequenzspektrum bei unterschiedlicher Anregung
a) Sinus-Burst-Sender



b)

b) CS-Sender

7.2.3 Tauchtechnik-Meßaufbau

Abb. 7.5 stellt das etwa $1 \times 1 \text{ m}^2$ große Tauchbecken der DFVLR in Braunschweig dar. In der Bildmitte ist der Probekörper 2a zu sehen, der auf einer justierbaren Glasplatte liegt. Die Prüfköpfe werden mit Hilfe von Stativstangen gehalten, so daß ein Abstand von wenigen Millimetern von der Betonoberfläche erreicht wird. Vor den Messungen mußten die Prüfköpfe mit einem Modellkitt abgedichtet werden, da sie vom Hersteller nicht für den Betrieb im Wasser vorgesehen waren.

Bei ersten Tauchtechnikuntersuchungen wurde der Hohlraum der Probe 2a ebenfalls abgedichtet, so daß kein Wasser eindringen konnte. Es zeigte sich jedoch, daß luftgefüllte Hohlräume im Beton, die anschließend mit Wasser gefüllt wurden, keine unterschiedlichen Einbrüche in den Amplitudenortskurven verursachen. Auf eine Abdichtung der Fehlstellen konnte deshalb bei allen Probekörpern

verzichtet werden.

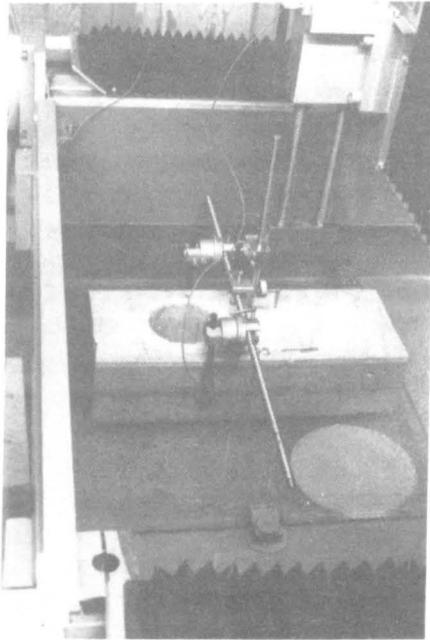


Abb. 7.5:
Tauchtechnik-Prüfung
der Probe 2a

Die Prüfköpfe werden für eine automatische Aufzeichnung der Amplitudenortskurven von dem schrittmotorgesteuerten Manipulator von links nach rechts bewegt (Abb. 7.5), wobei die Höhe (Y-Koordinate) konstant bleibt. Synchron zum Manipulator erfolgt die Auslenkung des XY-Schreibers in X-Richtung. Der Abbildungsmaßstab war 1 : 2,5 gewählt.

Zur Aufnahme von C-Bildern (C-scans) ist nach erfolgter Abtastung des Probekörpers in X-Richtung eine Bewegung der Prüfköpfe nach oben (Schrittbreite Y) und eine Bewegung in umgekehrter X-Richtung erforderlich, so daß die Prüfköpfe mäanderförmig zwischen den Anfangswerten (X_a, Y_a) und den Endwerten (X_e, Y_e) bewegt werden. Der Abtastweg der Prüfköpfe und der zugehörige Probenbereich ist jeweils unter den C-Bildern in Kap. 7.3 dargestellt.

Das Wasser im Tauchbecken muß vor den Prüfungen einige Tage ab-

stehen, damit die im Wasser gelösten Gase aufsteigen können. Luftblasen, die sich an den Betonoberflächen absetzen, stören den Schalldurchgang erheblich, da infolge des Impedanzsprungs zusätzliche Schallreflexionen entstehen.

7.2.4 Amplitudenortskurven fehlerhafter Proben bei unterschiedlichen Frequenzbereichen und Blendeneinstellungen

Zur Optimierung der unter 7.2.1 erläuterten Meßparameter wurden Amplitudenortskurven der Proben 2a,2b und 6 aufgenommen. Die Prüfzeile war bei allen Kurven gleich ($Y = 15 \text{ cm}$). Zur Anregung wurde bei diesen Untersuchungen der CS-Sender benutzt, da mit dem Sinus-Burst-Sender keine eindeutige Steuerung des Prüffrequenzspektrums vom Sender her möglich war (vgl. 7.2.2).

Abb. 7.6 stellt den Einfluß der am CS-Sender eingestellten Frequenz auf den Verlauf der Amplitudenortskurven dar. Die Amplitude ist sowohl linear (linkes Bild) als auch logarithmisch aufgetragen. Die Blendenposition (t_1) wurde konstant gehalten und die Dauer (t_2) mit $10 \mu\text{s}$ gewählt. Die Rißfläche der Probe 6, deren Lage in bezug auf die Amplitudenkurven unterhalb der Abszisse angedeutet ist, verursacht erwartungsgemäß ein starkes Absinken der Empfangsamplitude. Die Fehlstelle zeichnet sich bei allen Prüffrequenzen im Bereich von 50 bis 180 kHz deutlich aus dem Verlauf der Amplitudenkurven ab. Mit zunehmender Prüffrequenz wird allerdings die Welligkeit der Amplitude im fehlerfreien Bereich größer, die besonders bei der linearen Auftragung (linkes Bild) störend ist. Die Welligkeit wird vom Zuschlag im Beton hervorgerufen, dessen Körnung maximal 1,6 cm beträgt. Die Ultraschallwellenlänge verringert sich von 8 cm bei 50 kHz auf 2 cm bei 180 kHz. Liegt die Wellenlänge in der Größenordnung der Inhomogenitäten, so verursachen die dann auftretenden Reflexionen Amplitudenschwankungen in fehlerfreien Bereichen.

Die logarithmische Amplitudendarstellung (Abb.7.6, linkes Bild) erleichtert die Interpretation der Kurven, da die Welligkeit in fehlerfreien Bereichen unterdrückt wird und gleichzeitig die Fehlstellen aufgrund des Amplitudeneinbruchs von über 30 dB gut hervorheben.

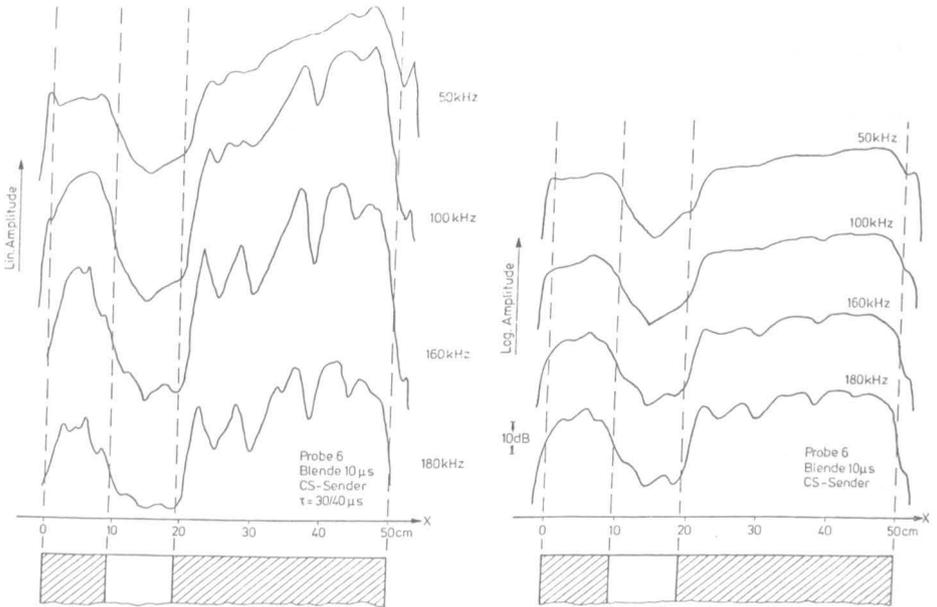


Abb. 7.6: Einfluß der Prüffrequenz auf die Amplitudenortskurven
links lineare, rechts logarithmische Darstellung

Die Amplitudenortskurven der Probe 2a (Abb. 7.8) weisen nicht so steile Einbrüche bei der Fehlstelle (zylindrischer Hohlraum) auf wie die in der Abb. 7.6 (rechteckige Rißfläche). Die unterschiedliche Steigung ist jedoch nur am rechten Fehlerrand festzustellen. Sie beträgt bei der Rißfläche 9,2 dB/cm und 5,2 dB/cm bei einem zylindrischen Fehler. Ähnlich wie in der Abb. 7.6 läßt sich die Fehlstelle aus der logarithmischen Darstellung (Abb. 7.7, rechtes Bild) leichter erkennen als bei der linearen, wo die Inhomogenitäten betont werden.

Aus den bisherigen Ergebnissen läßt sich folgern, daß eine höhere Prüffrequenz wegen der zur kleinen Wellenlänge im Vergleich zur Körnung des Zuschlags keine Vorteile bringt. Punkt D der unter 7.2.1 beschriebenen Problemstellung ist bereits geklärt: Die Amplitudenortskurven werden logarithmisch aufgetragen, um die Fehlstellen, die Amplitudeneinbrüche von 40 dB verursachen, besser von denen der Inhomogenitäten trennen zu können, die etwa 6 dB hervorrufen.

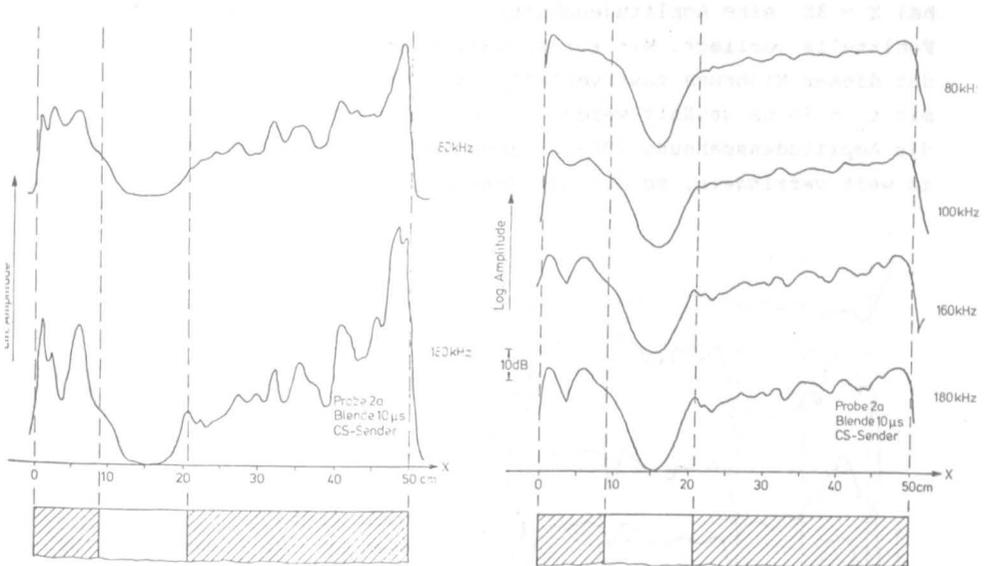


Abb. 7.7: Einfluß der Prüffrequenz auf die Amplitudenortskurven der Probe 2a, links lineäre, rechts logarithmische Darstellung

Abb. 7.8 zeigt den Einfluß der Blende auf die Amplitudenortskurven der Probe 6. Die CS-Anregung des Sendeprüfkopfes erfolgte bei allen Kurven mit 160 kHz Mittenfrequenz, als Hüllkurve wurde $(\sin)^4$ gewählt. Die Auftragung der Amplitude erfolgte im logarithmischen Maßstab. Da ohne Blende (obere Amplitudenkurve) der Mittelwert über die Empfängergesamtspannung gebildet wird und die Prüfköpfe eine kugelförmige Richtcharakteristik aufweisen, kann der Ultraschall über "Umwege" zum Empfangskopf gelangen, so daß im Fehlstellenbereich keine Amplitudenabnahme erfolgt. Defektoskopische Untersuchungen erfordern eine elektronische Blende, die einen Zeitbereich für die Amplitudenmessung selektiert. Ultraschallwellen, die über indirekte Laufwege (Reflexionen) zum Empfangsprüfkopf gelangen, können deshalb bei richtig dimensionierter Blende das direkte Empfangssignal nicht beeinflussen. Die Blendendauer wurde zwischen 30 und 10 μs gewählt. Wie aus der Abb. 7.8 hervorgeht, läßt sich der Fehlstellennachweis umso eindeutiger führen, je kürzer die Blendendauer ist. Bei 30 μs Blendendauer tritt z.B.

bei $X = 38$ eine Amplitudenabnahme von 15 dB auf, obwohl keine Fehlstelle vorliegt. Mit kürzer werdender Blendendauer verschwindet dieser Einbruch fast vollständig. Die Blende sollte deshalb mit $t_2 = 10 \mu\text{s}$ gewählt werden. Eine kürzere Blendendauer würde die Amplitudenspannung (US-DC) auch im fehlerstellenfreien Bereich zu weit verringern, so daß die Meßgenauigkeit abnimmt.

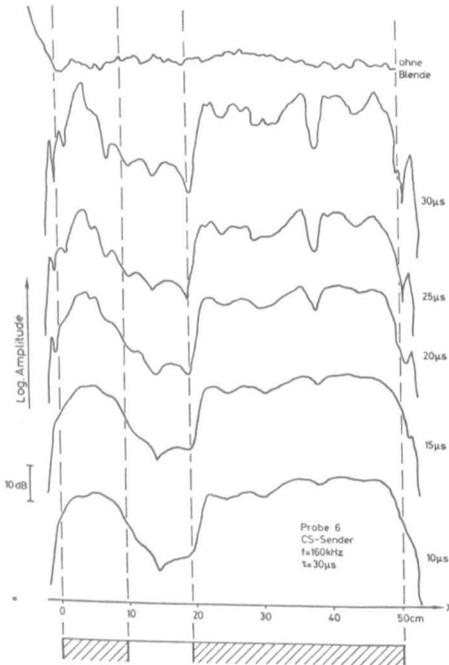


Abb. 7.8:

Einfluß der Blende auf die Amplitudenortskurven der Probe 6

Alle bisher diskutierte Amplitudenortskurven wurden in einem festen Laufzeitbereich durchgeführt (t_1 konstant). Wie anfangs erwähnt, läuft bei dieser Einstellung das Empfangssignal in Fehlerstellenbereichen aus der Blende heraus. Diese Laufzeitbeeinflussung der Amplitudenmessung wurde quantitativ untersucht, indem die Blende bei den Amplitudenverläufen der Abb. 7.9 automatisch nachgeführt wurde. Probe, Prüffrequenzen und Blendendauer entsprechen denen der Abb. 7.7, so daß ein Vergleich beider Abbildungen möglich ist. In der Abb. 7.9 beträgt die maximale Amplitudendifferenz zwischen fehlerfreiem Bereich und Fehlerstellen bei 180 kHz nur noch 13 dB gegenüber 26 dB in der Abb. 7.7. Dieser

Unterschied wird bei geringeren Frequenzen etwas niedriger (9 dB). In fehlerfreien Bereichen ist die Amplitudenwelligkeit in beiden Abbildungen gleich. Die größten Amplitudendifferenzen zwischen den Inhomogenitäten und Fehlstellen lassen sich bei fester Blendendeposition (t_1 konstant) erzielen. Werden Prüffrequenzen um 100 kHz verwendet, so beträgt die größte Amplitudendifferenz 28 dB.

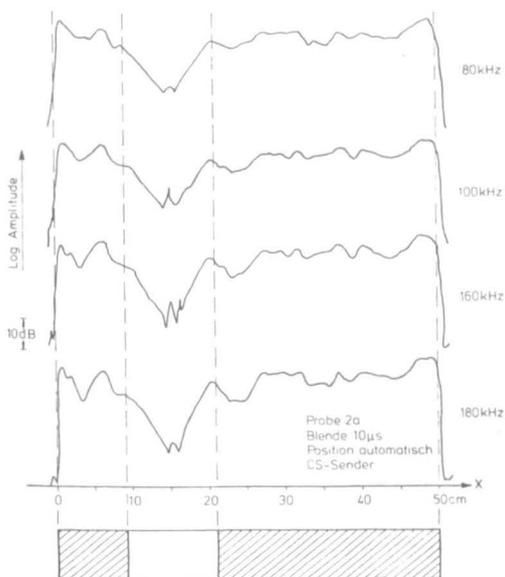


Abb. 7.9:

Amplitudenverlauf bei automatischer Blendendeposition

Die Probe 2a besitzt im Vergleich zur Probendicke eine relativ große Fehlstelle (50 % der Dicke). Um die Auflösbarkeit von kleineren Fehlstellen in Abhängigkeit der Prüffrequenz zu untersuchen, wurden Amplitudenortskurven der Probe 2b aufgenommen, deren Fehlstellenabmessungen 10 und 25 % der Bauteildicke betragen (2 und 5 cm Durchmesser). Die 2 cm große Bohrung kann erwartungsgemäß aus den Amplitudenkurven nicht von den Inhomogenitäten getrennt werden. An der entsprechenden X-Position ist zwar ein Amplitudeneinbruch zu erkennen (untere Kurve mit 160 kHz in Abb. 7.10), der jedoch noch nicht für eine sichere Detektion ausreicht.

Die Fehlstelle kann nicht detektiert werden, da die Inhomogenitäten (Zuschlagkörnung) in der gleichen Größenordnung (1,6 cm) liegen. Die 5 cm große Bohrung ist deutlich anhand des Amplitudenverlaufs zu erkennen. Die Amplitudenabnahme im Vergleich zu den Inhomogenitäten liegt bei 13 dB, wenn eine Prüffrequenz von 160 kHz gewählt wird.

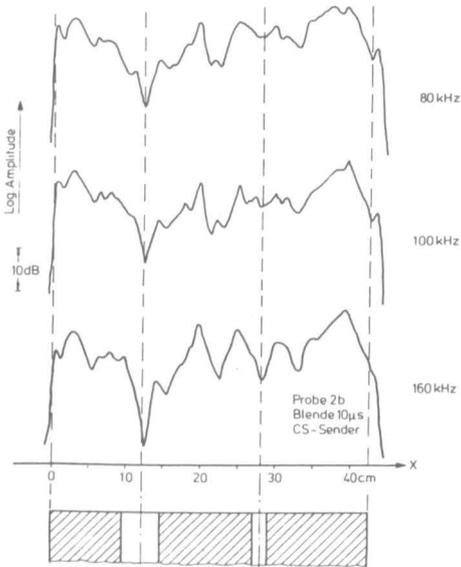


Abb. 7.10:
Amplitudenkurven der
Probe 2b bei unterschiedlichen
Prüffrequenzen

Damit sind die unter 7.2.1 beschriebenen Optimierungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden zur besseren Übersicht hier noch einmal zusammengestellt:

A) Wahl des Senders und Prüffrequenz

Eine eindeutige Beeinflussung des Prüffrequenzspektrums war nur mit dem CS-Sender möglich, wie die Untersuchungen unter 7.2.2 ergaben.

Die Prüffrequenz muß im Bereich zwischen 100 und 160 kHz liegen, wobei 160 kHz nur dann empfehlenswert ist, wenn auch kleinere Fehler (5 cm ϕ) interessant sind.

B) Blendendauer

Die Blendendauer sollte 10 μ s betragen. Größere Werte erschweren die Fehlerauflösung durch Auswertung von Störreflexionen, kleinere Werte bringen zu geringe Amplitudenspannungen.

C) Blendenanfang

Der Blendenanfang sollte fest eingestellt werden (t_1 konstant). Das infolge der Laufzeitbeeinflussung quasi-zweiparametrische Prüfverfahren ergibt im Fehlstellenbereich die größten Amplitudenänderungen gegenüber den fehlerfreien Bereichen.

D) Darstellung der Amplitudenortskurven

Es empfiehlt sich eine logarithmische Darstellung, da die Amplitudenschwankungen, hervorgerufen durch Inhomogenitäten, im Gegensatz zu den Amplitudeneinbrüchen im Fehlstellenbereich unterdrückt werden.

In Kap. 7.5 wird gezeigt, daß mit Hilfe dieser Optimierungen sogar vollautomatische Prüfungen durchgeführt werden können.

7.2.5 Einfluß der Prüffrequenz auf die Impulslaufzeit

Eine Fehlstelle im Baustoff Beton verursacht gegenüber dem fehlerfreien Bereich eine Laufzeiterhöhung, da die Ultraschallwellen durch Beugung um die Fehlstelle zum Empfänger gelangen. Die Laufzeiterhöhungen sind infolge des Umweges von den Abmessungen der Fehlstelle sowohl senkrecht als auch parallel zum Schalldurchgang abhängig [87] .

Da die Prüffrequenz einen entscheidenden Einfluß auf die Amplitudenabnahme im Fehlstellenbereich hat, sollte auch die Frequenzabhängigkeit der Laufzeitänderung untersucht werden. Kadecek und Dohnálek [136] stellten eine Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Frequenz fest (Dispersion), jedoch keine frequenzabhängige Laufzeitänderung bei Fehlstellen. Die eigenen Untersuchungen zeigen nur einen relativ geringen Einfluß der Prüffrequenz im Fehlstellenbereich. Der Unterschied beträgt 5 %, wenn

die Prüffrequenz von 50 - 60 auf 180 - 200 kHz erhöht wird (Abb. 7.11). Die automatischen Laufzeitmessungen werden mit breitbandiger Anregung durchgeführt, um den Vorteil der kürzeren Impulsanstiegszeit gegenüber anderen Sendern nutzen zu können. Eine kürzere Anstiegszeit erlaubt genauere Zeitmessungen, da Amplitudenschwankungen dann kleinere Einflüsse auf das Ergebnis ausüben.

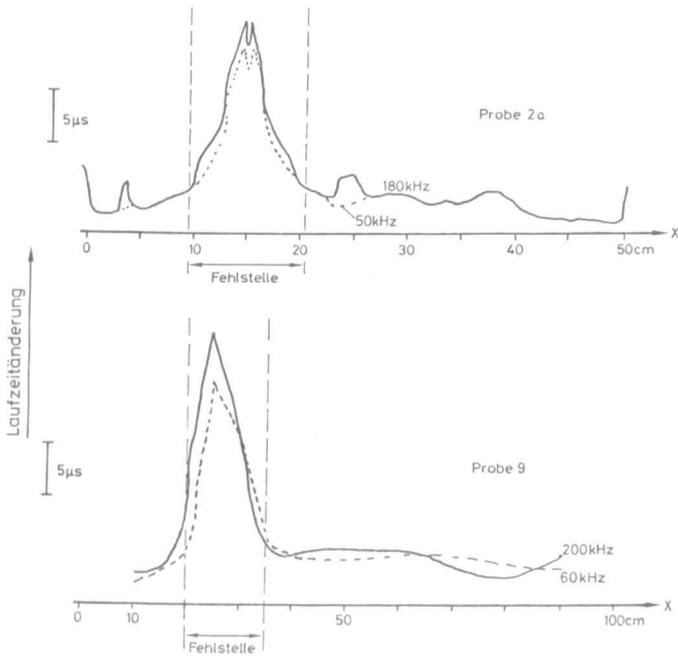


Abb. 7.11: Einfluß der Prüffrequenz auf die Laufzeitänderung

7.3 Durchschallungsmessungen an der Probe 9

Die an der Betonplatte durchgeführten Ultraschallprüfungen sollen die Einsetzbarkeit der unter 7.2.4 beschriebenen Optimierungen auch für Prüfungen im Direktkontakt zeigen. Gleichzeitig ist für erste Untersuchungen der Impuls-Echo-Technik (Kap. 7.4) eine genaue Kenntnis über die Lage und Ausdehnung von Fehlstellen notwendig.

Vor den Durchschallungsmessungen mußte die Betonplatte beidseitig mit Rasterlinien sowohl in X- als auch in Y-Richtung versehen werden. Auf den Seitenflächen wurden die Mittellinien aufgezeichnet, so daß die Platte auch in Y-Richtung definiert durchschallt werden konnte.

Abb. 7.12 zeigt die aus Messungen in Dickenrichtung auf den Geraden $Y = 20 - 40$ im Bereich von $X = 10 - 90$ cm gewonnenen Amplitudenortskurven. Die Mittenfrequenz des CS-Senders betrug 160 kHz. Die elektronische Blende zur Amplitudenmessung hatte eine Dauer von $10 \mu\text{s}$. Die Position (t_1) wurde konstant gehalten, so daß sich eine quasi-zweiparametrische Prüfung ergab. Amplitudeneinbrüche von 30 - 40 dB im Bereich von $X = 20 - 30$ und $Y = 25 - 35$ beschreiben deutlich Lage und Größe der Fehlstelle. Außer der einbetonierten Styroporplatte sind aus den Amplitudenkurven keine weiteren Fehlstellen und Inhomogenitäten festzustellen.

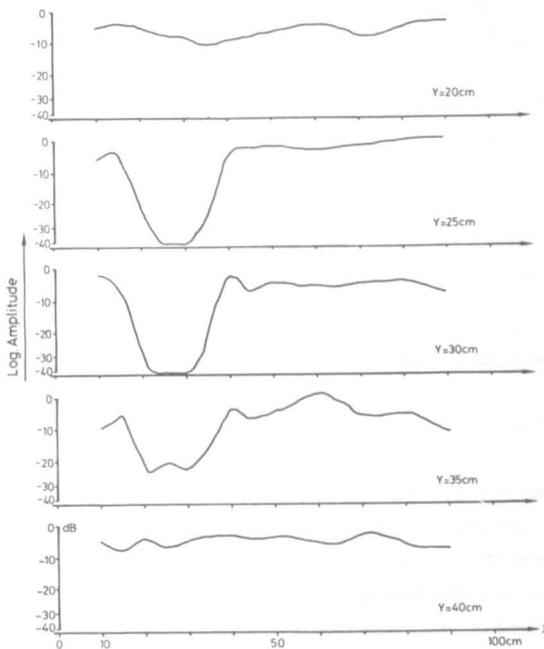


Abb. 7.12: Amplitudenortskurven der Probe 9
Durchschallung in Z-Richtung

Wie aus Abb. 7.13 hervorgeht, verringert sich die Amplitude im Fehlstellenbereich auf etwa 10 dB, wenn die Abmessungen senkrecht zum Schalldurchgang 10 % der Bauteildicke betragen. Die Bauteildicke war in diesem Fall 1 m. Außer dem künstlich eingebrachten Fehler zwischen $Y = 20$ und 30 ist eine weitere Fehlstelle zwischen dem linken Probenrand und $Y = 15$ infolge der geringen Amplitude zu vermuten. An dieser Stelle wurde eine Eisenstange zur Markierung der Fehlstelle einbetoniert, die wahrscheinlich Inhomogenitäten verursacht hat. Bemerkenswert sind die relativ kleinen Amplitudenschwankungen mit ca. 3 dB zwischen $Y = 40$ und 90 . Die gute Fehlerauflösung ist ein Ergebnis der unter 7.2.4 durchgeführten Optimierungen.

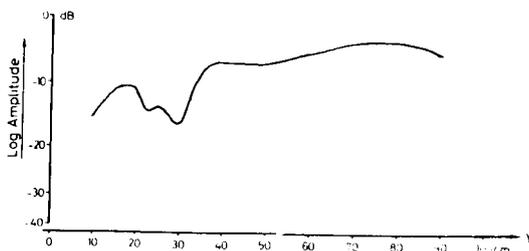


Abb. 7.13: Amplitudenortskurve der Probe 9
Durchschallung in X-Richtung

7.4 Untersuchungen zum Einsatz der Impuls-Echo-Technik

7.4.1 Problemstellung

Der Einsatz der Impuls-Echo-Technik (vgl. Kap. 4.4) im Bauwesen könnte der zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen und Bauwerken aus Beton mit Ultraschall zu einem entscheidenden Durchbruch verhelfen. Eine bisherige Voraussetzung, die Zugänglichkeit des zu untersuchenden Bauteils von zwei Seiten her, wäre nicht mehr erforderlich, da die Prüfköpfe nur an einer Bauteilseite angekoppelt werden müßten. Ferner wäre das zeitaufwendige Aufbringen von Rasterpunkten nur auf einer Seite erforderlich.

Eine notwendige Bedingung für den Einsatz der Impuls-Echo-Technik ist die Erzeugung von ausreichend kurzen Ultraschallimpulsen, so daß die zum Prüfkopf reflektierten Wellen nicht vom Nachschwingen des Sendeprüfkopfes "übertönt" werden. Mit Hilfe des unter 5.2.1 beschriebenen Diodenschalters konnte die Dauer des abgestrahlten Sendeimpulses mit $60 \mu\text{s}$ ermittelt werden. Der Prüfkopf S 9204 wurde dazu breitbandig angeregt und gleichzeitig als Empfänger benutzt. Während der Sendedauer legt der Schall im Baustoff Beton eine Strecke von 24 cm zurück. Ein Echo kann daher erst aus einer "Tiefe" größer als 12 cm empfangen werden.

Eine weitere Voraussetzung für die Impuls-Echo-Technik ist eine Richtcharakteristik der Prüfköpfe. Bei den verwendeten Prüfköpfen breiten sich die Ultraschallwellen auf Kugelflächen um den Sender herum aus (vgl. Gl. 3.24). Eine Zuordnung von Echos zum Fehlerort im Bauteil wird erschwert, da Reflexionen aus allen Richtungen zum Empfänger gelangen können.

Die zweite Voraussetzung ließ sich mit den verwendeten Prüfköpfen nicht erfüllen. Deshalb wurde für erste Untersuchungen zur Impuls-Echo-Technik die Betonplatte (Probe 9) gewählt. Die Prüfkopfposition kann dort so gewählt werden, daß die von der Probenrückwand kommenden Echos im Vergleich zu den unerwünschten Reflexionen von den seitlichen Begrenzungsflächen wesentlich kürzere Laufzeiten hervorrufen. Eine Zuordnung der Echos müßte ebenfalls möglich sein, da die Fehlstelle bereits mit Hilfe der unter 7.5 beschriebenen Durchschallungsmessungen lokalisiert wurde. Die Prüfkopfposition kann gezielt im fehlerfreien und im fehlerhaften Bereich erfolgen.

Impuls-Echo-Messungen lassen sich mit getrennten, auf einer Seite befindlichen Sende- und Empfangsprüfköpfen oder mit einem als Sender und Empfänger betriebenen Kopf durchführen. Der Vorteil gegenüber dem Einkopfbetrieb liegt darin, daß die hohe Sendespannung nicht den Empfänger "zustopfen" kann, wodurch eine gewisse Totzeit auftritt. Nachteilig ist der Empfang einer zusätzlichen Welle, die unterhalb der Betonoberfläche von einem Prüfkopf zum anderen läuft und ein weiteres Empfangssignal verursacht, welches im folgenden "Koppelecho" genannt werden soll.

Mit der Impulsdauer von $60 \mu\text{s}$ ist das axiale Auflösungsvermögen festgelegt. Die einzelnen Ultraschallimpulse müssen sich mindestens um diese Laufzeit unterscheiden, wenn sie sich nicht gegenseitig beeinflussen sollen. Deshalb wurden die Echolaufzeiten für Rückwand- und Fehlerecho in Abhängigkeit des Prüfkopfabstandes berechnet und in der Abb. 7.14 dargestellt. Die Laufzeit des Koppechos stammt aus Messungen. Für die Berechnungen wurde ein Wert für die longitudinale Schallgeschwindigkeit von $v_L = 4000 \text{ m/s}$ angesetzt. Die gemessene Schallgeschwindigkeit beträgt 3980 m/s . Da außerdem Transversalwellen auftreten können, wurde diese mit in die Berechnungen einbezogen, wobei eine halb so große Schallgeschwindigkeit eingesetzt war. Der Grenzfall Prüfkopfabstand null beschreibt die Messung mit einem einzigen Prüfkopf. Wie aus der Abb. 7.14 ersichtlich, ergeben sich dann die größten Zeitdifferenzen der einzelnen Echos. Die Untersuchungen begannen deshalb mit nur einem Prüfkopf.

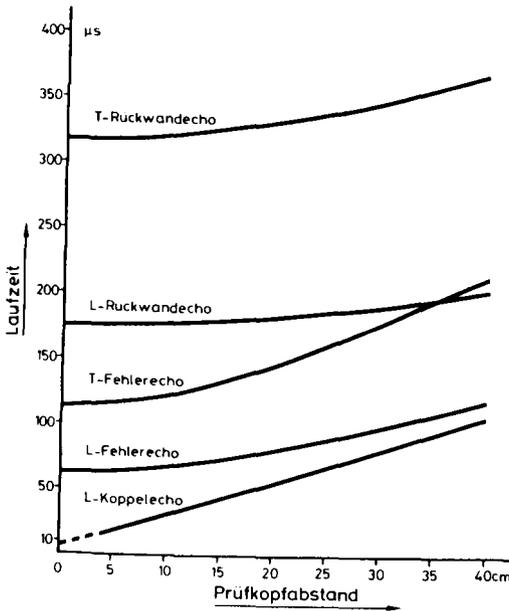


Abb. 7.14:
Berechnete Echolaufzeiten der Probe 9 in Abhängigkeit des Prüfkopfabstandes

7.4.2 Interpretation des Empfangssignals bei einseitiger Prüfkopfkopplung

sich bei der Prüfkopfposition $(X,Y) = (40,50)$ an der Probe 9 ergab. Der Prüfkopf wurde breitbandig angeregt und gleichzeitig als Empfänger benutzt. Zur Signalumschaltung diente der Diodenschalter nach Abb. 5.5. Der Sendeimpuls hat eine Dauer von 60 μs . Infolge der Amplitudenbegrenzung ist eine Unterscheidung des Sendeimpulses von den Echos möglich. Im Anschluß daran dürfte bis zum Einsatz des longitudinalen Rückwandechos kein Impuls auftreten. Der Einsatz dieses Echos wäre bei 1,5 Teilungen vom rechten Bildrand entfernt zu erwarten, entsprechend einer Laufzeit von 175 μs (vgl. Abb. 7.14). Wie aus der Abb. 4.3 hervorgeht, würde das Auftreten von Ultraschallimpulsen im Laufzeitbereich zwischen Sendeimpuls und Rückwandecho Fehlstellen anzeigen. Aufgrund der Durchschallungsmessungen (Abb. 7.12, untere Amplitudenkurve) ist jedoch eine Fehlstelle in diesem Bereich mit Sicherheit auszuschließen.

Der Prüfkopf wurde in X-Richtung um 1 cm nach rechts verschoben, so daß die Position $(41,50)$ erreicht war. Abb. 7.15 (rechts) zeigt das zugehörige A-Bild. Im Gegensatz zu den bisher durchgeführten Untersuchungen entstand bei einer so relativ kleinen Prüfkopfverschiebung nie ein völlig anderes A-Bild. Die Amplitudenortskurven der Abb. 7.10 zeigen z.B. selbst am Fehlerrand keine sprunghaften Veränderungen, da die Auflösung mit der Wellenlänge (ca. 2,5 cm) festgelegt ist. Es lag deshalb die Vermutung nahe, daß es sich bei den Signalen gar nicht um reflektierte Longitudinalwellen handelte, die von Reflexionen aus dem Probeninnern kamen, sondern um Wellen, die unterhalb der Betonoberfläche verliefen und an den Grobzuschlägen reflektiert wurden. Um diese Vermutungen zu erhärten, wurden die von Rückwand- und Fehlerecho zu erwartenden Signal-Amplituden berechnet. Dafür kann die Gleichung 3.30 benutzt werden, wenn sie in der Form

$$U(x) = \frac{c^1}{x} e^{-\alpha x} \quad (7.1)$$

geschrieben wird. $U(x)$ bezeichnet dabei die Empfangsamplitude nach Durchschallung der Strecke x im Beton. Der Schallschwächungskoeffizient α läßt sich, wie unter 3.3 beschrieben, aus Messungen der Empfangsamplitude jeweils bei Längs- und Querdurchschallung ermitteln. Der Schalldruckverlauf ist infolge der kugelförmigen

men. Die ermittelten Werte für die Konstanten c' und α waren

$$c' = 305 \text{ V cm} \quad \text{und} \quad \alpha = 0,0122 \text{ 1/cm} .$$

Für eine Abschätzung der Reflexionsamplituden kann jeweils der Reflexionsfaktor (Gl. 3.16) aufgrund der Impedanzsprünge Beton - Luft (Rückwand) und Beton - Styropor (Fehlstelle) gleich eins angenommen werden. Mit dem Einsetzen der doppelten Schallaufwege, 70 cm für das Rückwandecho und 24 cm für das Fehlerecho, ist eine Berechnung der Reflexionsamplituden möglich. Zur Kontrolle wurde ein zweiter Prüfkopf auf der gegenüberliegenden Probenseite als zusätzlicher Empfänger angebracht. Die Ankopplung erfolgte sowohl im fehlerfreien (40,50) als auch im Fehlstellenbereich (25,25). Das Oszilloskop stellte die Empfangssignale von beiden Prüfköpfen dar, wobei die Verstärkungs- bzw. Ablenkungskoeffizienten so gewählt waren, daß sich gleiche Amplitudenhöhen ergeben mußten. Die Abschwächung des Diodenschalters fand ebenfalls Berücksichtigung. Die beiden auf Abb. 7.16 dargestellten Empfangsamplituden haben jedoch ein Amplitudenverhältnis von 1:40. Die Abbildung zeigt die A-Bilder bei der Position (40,50). Im Fehlstellenbereich waren die Verhältnisse ähnlich. Aufgrund der zu hohen Amplituden und des Zeitbereichs konnten die Signale von dem als Sender und Empfänger benutzten Prüfkopf nicht das Fehler- bzw. Rückwandecho sein. Da die unterhalb der Betonoberfläche vermuteten Wellen zu hohe Reflexionsamplituden verursachen, wird das Rückwandecho nicht auflösbar, sondern "übertönt".

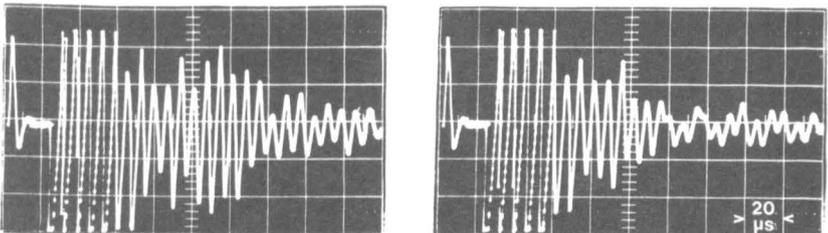


Abb. 7.15: Empfangssignale bei den Prüfkopfpositionen $X = 40$, $Y = 50$ (links) und $X = 41$, $Y = 50$ (rechts) der Probe 9

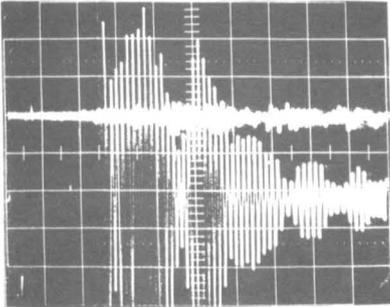


Abb. 7.16:

Empfangssignale von den an der Vorder- und Rückseite der Probe 9 befindlichen Prüfköpfe
oben: Rückseite
unten: Vorderseite

Während der Untersuchungen stellte sich heraus, daß beim Berühren der Betonoberfläche in der Nähe des als Sender und Empfänger benutzten Prüfkopfes eine Amplitudenänderung auftrat. Dieser Effekt konnte zur Schallgeschwindigkeitsbestimmung benutzt werden, wenn zwei Prüfköpfe im Abstand von 20 cm an einer Seite der Probe angekoppelt waren. Aus der Kenntnis der Schallgeschwindigkeit läßt sich auf die Wellenart schließen (vgl. Abb. 3.1). Interessant war die Beobachtung, daß sich das A-Bild der vom Empfangsprüfkopf kommenden Spannung bei Berührung der Betonoberfläche nur in einem Zeitintervall änderte, welches bei $72 \mu\text{s}$ begann, während die ersten ab $57,6 \mu\text{s}$ einsetzenden Amplituden davon unbeeinflusst blieben. Dies deutet darauf hin, daß es sich mindestens um zwei Wellenarten handeln muß. Die Schallgeschwindigkeit der ersten eintreffenden Welle beträgt etwa $3\,500 \text{ m/s}$, es kann sich daher um Longitudinalwellen handeln. Diese Vermutung wird dadurch bekräftigt, daß der tatsächliche Schallweg nicht direkt von einem Prüfkopf zum anderen verlaufen kann, sondern noch etwas länger durch das Eindringen der Welle in den Beton werden muß. Bei einem Laufweg von 23 cm ergibt sich eine Schallgeschwindigkeit von $4\,000 \text{ m/s}$.

Die ab $72,3 \mu\text{s}$ eintreffenden Impulse gehören zu Wellen, die eine Schallgeschwindigkeit von etwa $2\,770 \text{ m/s}$ besitzen. Mit der Berechnung der Schallgeschwindigkeit der Oberflächenwellen (Gl. 3.10), wobei für $v_T = 0,5 v_L$ und für $\mu = 0,2$ gesetzt war, ließ sich v_O zu $v_O = 2770 \text{ m/s}$ ermitteln. Da der berechnete mit dem experimentell gefundenen Wert sehr gut übereinstimmt (2 % Abweichung), sind Oberflächenwellen vorhanden. Die Wellenlänge der

Oberflächenwellen liegt in der Größenordnung der Grobzuschläge, so daß Reflexionen auftreten, die eine Auflösung des longitudinalen Rückwand- und Fehlerechos aufgrund der wesentlich höheren Amplituden verhindern.

Mailer [126] benutzte bei Fahrbahndickenmessungen einen 5 MHz Longitudinalwellenprüfkopf, der sich optimal für den Empfang eines 200 kHz-Rückwandechos eignete. Ein bei der DFVLR Braunschweig vorhandener 5 MHz-Prüfkopf Typ Panametrics V 309 konnte jedoch als Empfänger bei einseitiger Ankopplung die vorhandenen Oberflächenwellen nicht unterdrücken.

Mit einem Kronenbohrer wurde um den als Sender und Empfänger benutzten Prüfkopf ein Ring (5 cm ϕ) in die Betonoberfläche in Stufen bis zu einer Tiefe von 25 mm gebohrt. Die Hoffnung, damit die Oberflächenwellen an der Ausbreitung zu hindern, konnte nicht erfüllt werden.

Obwohl im Rahmen dieser Arbeit die Meßparameter für die Impuls-Echo-Technik im Bauwesen optimiert und dem Meßproblem besser angepaßt werden konnten, erscheint ein baupraktischer Einsatz nicht durchführbar. Ursache sind in erster Linie die akustischen Eigenschaften des Betons wie hohe Dämpfung und stoffliche Inhomogenität, die einen Einsatz hoher Prüffrequenzen wie im Stahl- und Maschinenbau ausschließen. Infolge der ungünstigen Abmessungen der Piezoplatten im Vergleich zur Wellenlänge treten zusätzlich unerwünschte Oberflächenwellen auf, die die Auswertung der longitudinalen Echos von Fehlstellen und der Bauteilrückwand aufgrund der höheren Amplituden verhindern.

7.5 C-Bilder als Ergebnis automatischer Tauchtechnikprüfungen

Mit Hilfe der entwickelten Meßelektronik (Kap. 6) ist eine vollautomatische Kontrolle von Fertigteilen aus Beton möglich. Die Bauteile müssen dafür im Tauchbecken von zwei gegenüberliegenden Prüfköpfen abgetastet werden (Abb. 7.5). Das zeitaufwendige Auftragen von Rasterpunkten und manuelle Ankoppeln von Prüfköpfen ist nicht mehr notwendig. Die benutzte Tauchtechnik-Prüfanlage, die für hochauflösende Messungen an kohlefaserverstärkten Bauteilen entwickelt wurde, ermöglicht eine mechanische Auflösung von

20 Schritten pro mm, so daß die Rasterpunkte quasikontinuierlich liegen. Für die Betonprüfung wäre bereits aufgrund der relativ großen Ultraschallwellenlänge eine Schrittweite von 1 cm ausreichend.

Der Abstand der Rasterlinien (ΔY) wurde mit 1 cm gewählt. Die Position des 10 cm hohen und aus 11 Rasterlinien bestehenden Meßfeldes bezüglich der Probekörper ist jeweils in den Abb. 7.12 bis 7.19 unter D dargestellt, wo auch die Fehlstellenabmessungen senkrecht zum Schalldurchgang angegeben sind.

Vor den Beschreibungen der Prüfergebnisse der Balkenproben anhand der Abb. 7.13 - 7.19 sollen die einzelnen Bilder A - D der Abbildungen erläutert werden, da derartige Präsentationen im Bauwesen bisher nicht üblich sind.

Bild A in Abb. 7.17 - 7.24 stellt jeweils die Impulslaufzeitänderungen in einem perspektivischen C-Bild dar. Ein elektronischer Zähler mit Digital-Analog-Wandler (s. 6.3.2) erzeugte eine zur Laufzeit proportionale Ausgangsspannung, die zu 95 % im fehlerfreien Probenbereich elektronisch kompensiert wurde. Ein dafür notwendiger Baustein befindet sich in der Elektronik zur Tauchtechnikprüfanlage. Ohne Kompensation könnten die Fehlstellen nicht deutlich aus dem Laufzeitbild ermittelt werden, da selbst der Hohlraum der Probe 2a (11 cm ϕ) nur eine um 15 % größere Laufzeit gegenüber den fehlerfreien Bereichen verursacht. Erst die Aufzeichnung der Laufzeitänderungen ermöglicht defektoskopische Aussagen anhand der C-Bilder. Absolutwerte der Laufzeit bzw. der Schallgeschwindigkeit sind dagegen für diese Untersuchungen uninteressant. Die durch elektronische Addition der Y-zur X-Koordinate entstandenen perspektivischen Darstellungen bieten eine bessere Übersichtlichkeit, da bei jedem Zeilenwechsel die X-Achse um den Zeilenabstand ΔY versetzt wird.

Im Gegensatz zu den Amplitudenmessungen (siehe Bild B und C) erfolgte bei Laufzeitmessungen eine breitbandige Anregung, da die Laufzeitänderungen nur unwesentlich vom Prüffrequenzspektrum abhängig sind (vgl. 7.2.5).

reich, sondern auch an den Probenrändern ermöglicht eine Positionsangabe der Fehlstelle in bezug auf die Probenabmessungen. Für die Randerkennung beim Laufzeitbild (A) wurde zusätzlich die Ultraschallamplitude in einer feststehenden Blende ausgewertet. Am Probenrand und außerhalb des Probenbereichs breitet sich der Ultraschall nur im Wasser aus. Da die Schallgeschwindigkeit von Wasser im Vergleich zu der von Beton wesentlich kleiner ist (1 500 gegenüber 4 000 m/s), vergrößert sich die Laufzeit außerhalb des Probenbereichs entsprechend, so daß die Empfangsimpulse aus der festgehaltenen Blende herauslaufen. Der damit verbundene Amplitudeneinbruch wird von einem Komparator festgestellt, so daß die über einen Schaltverstärker betriebene Feder des XY-Schreibers abhebt (pen-lift) und den Probenrand kennzeichnet.

Die Bilder B und C entstanden jeweils aus Amplitudenmessungen, wobei die optimierten Parameter (vgl. 7.2.4) Anwendung fanden. Die Prüffrequenz wurde mit 160 kHz relativ hoch gewählt, um auch den 5 cm großen Hohlraum der Probe 2b erfassen zu können.

Die C-Bilder in den Abb. 7.17C - 7.24C ließen sich mit einem XY-Schreiber aufzeichnen, indem die X- und Y-Eingänge mit dem Analogausgang des Koordinatensteuergerätes der Tauchtechnik-Prüfanlage verbunden waren und die Federsteuerung über einen Komparator erfolgte. Der Komparator veranlaßt einen pen-lift, wenn die Ultraschallamplitude eine einstellbare Schwelle unterschreitet. Diese Schwelle wurde so gewählt, daß die Länge in fehlerfreien Bereichen ununterbrochene Rasterlinien der Probenbreite entspricht, wenn der Abbildungsmaßstab von 1 : 2,5 berücksichtigt wird.

Die Bilder B und C unterscheiden sich in der zusätzlichen Amplitudeneinblendung des Bildes B. Die aus der Amplitudenmessung entstandene Gleichspannung (log. US-DC) mußte hierfür invertiert werden und teilweise kompensiert werden, so daß Amplitudeneinbrüche bei Fehlstellen als "Berge" aufgezeichnet werden. Die Amplitudeneinblendung gibt gegenüber den C-Bildern (C) zusätzlich Auskunft über die Homogenität der Probekörper in fehlerstellenfreien Bereichen. Wie in den Laufzeitbildern wird auch hier eine perspektivische Darstellung gewählt.

Die Abb. 7.17 zeigt die Ergebnisse der automatischen Prüfung der

Probe 2a, die als Fehlstelle einen zylindrischen Hohlraum besitzt. Der Hohlraum geht durch die gesamte Probe hindurch. Der C-scan 7.17C stellt diese Tatsache sehr genau dar. Die in dem Amplituden-C-scan erkennbaren Inhomogenitäten werden in der Darstellung C nahezu vollständig unterdrückt. Die Laufzeitänderungen infolge des Hohlraumes gehen deutlich aus dem Bild A der Abb. 7.17 hervor. Erwartungsgemäß bereitet die Detektion derartig großer Fehlstellen keine Schwierigkeiten.

Dagegen ist die Bohrung mit 5 cm Durchmesser aus dem Laufzeitbild (Abb.7.18 A) sehr viel schwerer zu erkennen. Mit Hilfe der Amplitudenmessungen läßt sich die 5 cm ϕ -Bohrung exakt nachweisen, wie aus den Unterbrechungen der Rasterlinien (Bild C) deutlich hervorgeht. Die 2 cm große Bohrung verursacht nur eine Unterbrechung in der 7. Zeile von unten und deutet damit, wie schon die Amplitudenortskurven, die Auflösungsgrenzen an. Aus den Bildern B und C geht ferner hervor, daß es sich um keine Durchgangsbohrung handelt, da die ersten vier Rasterlinien nicht unterbrochen sind. Dies stimmt mit der tatsächlichen Fehlstellenposition (Bild D) überein. Nur in der ersten Zeile des C-scans wird eine Rasterlinie unterbrochen, obwohl dort keine Fehlstelle eingebaut wurde. Es handelt sich dort um eine Inhomogenität.

Das Laufzeitbild der Probe 3a (Abb. 7.19A) zeigt unterhalb der Fehlstelle einen Anstieg der Laufzeit von Zeile zu Zeile, obwohl der Hohlraum erst mit der vierten Rasterlinie erfaßt wird (Bild D). Wegen der relativ höheren Empfindlichkeit der Amplitudenmessung gegenüber der Laufzeitmessung in bezug auf Fehlstellen, wird der oben genannte Bereich in den Bildern B und C bereits als Fehlstelle gekennzeichnet. Es ist anzunehmen, daß beim Einbringen des Hohlraums unterhalb der Fehlstelle Risse und Verdichtungsfehler aufgetreten sind. Der weitere Probenbereich ist fehlerstellenfrei.

Das Kiesnest (11,5 cm ϕ) der Probe 4a, welches sich über die gesamte Probenhöhe erstreckt, läßt sich sowohl über die Laufzeit (Abb. 7.20A) als auch über die Amplitudenänderungen (Bild B und C) sehr gut erfassen. Im Gegensatz zu dem 11 cm ϕ großen Hohlraum der Probe 2a verursacht das Kiesnest etwa um 5 μ s kleinere Laufzeitänderungen als der Hohlraum. Offensichtlich kann der Schall

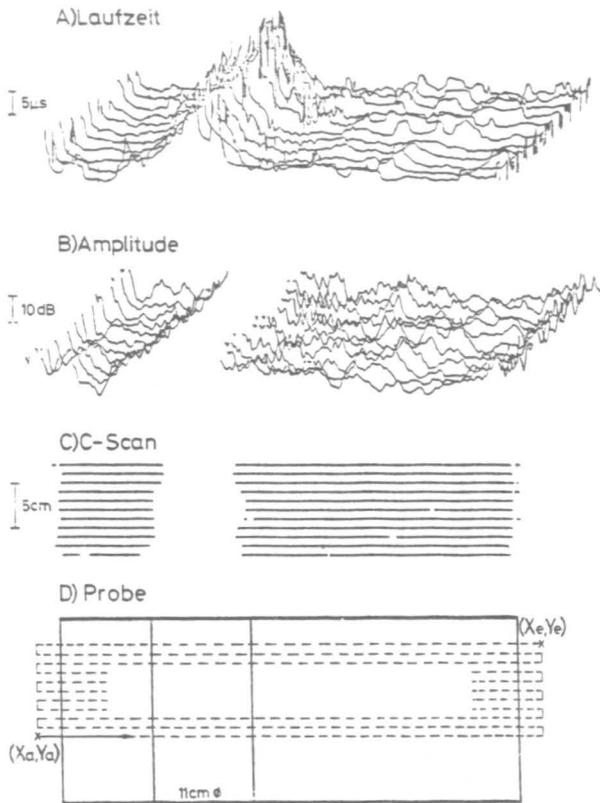


Abb. 7.17: Prüfergebnisse der Probe 2a

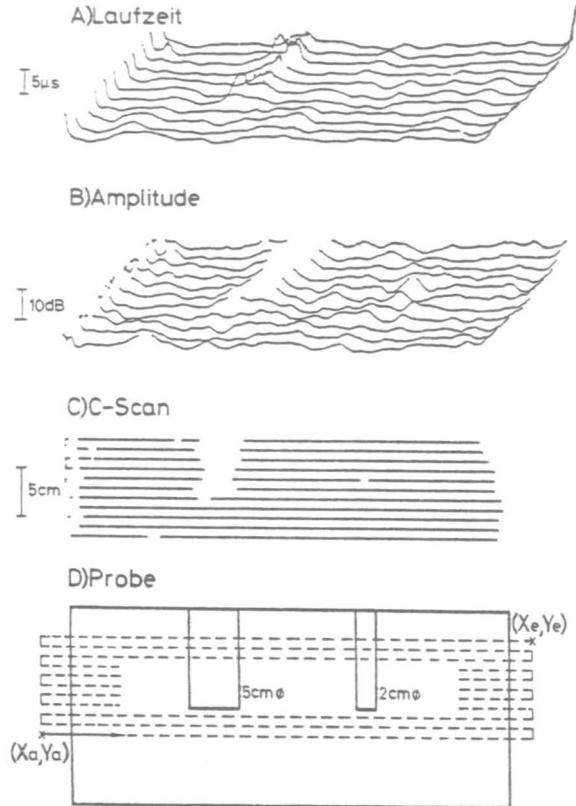


Abb. 7.18: Prüfergebnisse der Probe 2b

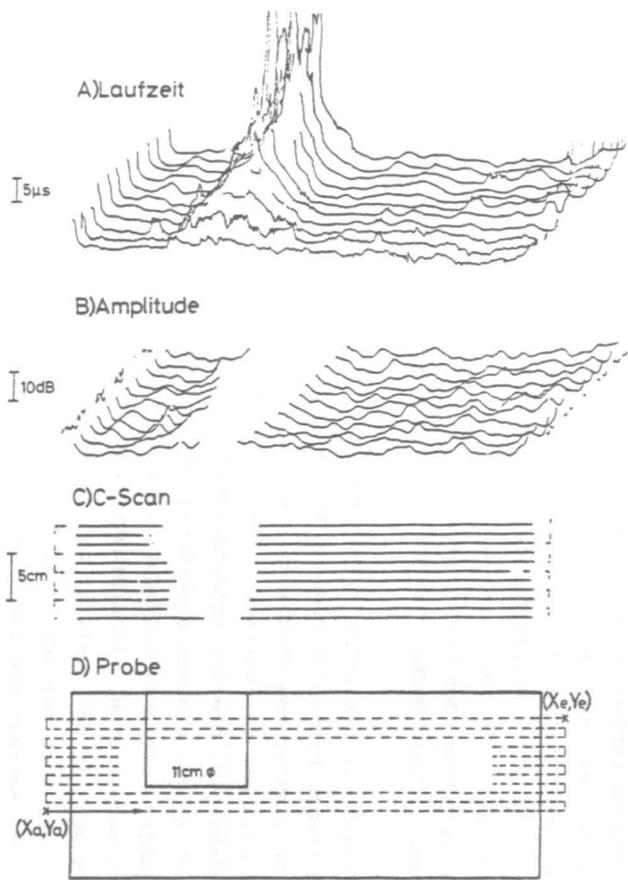


Abb. 7.19: Probe 3a

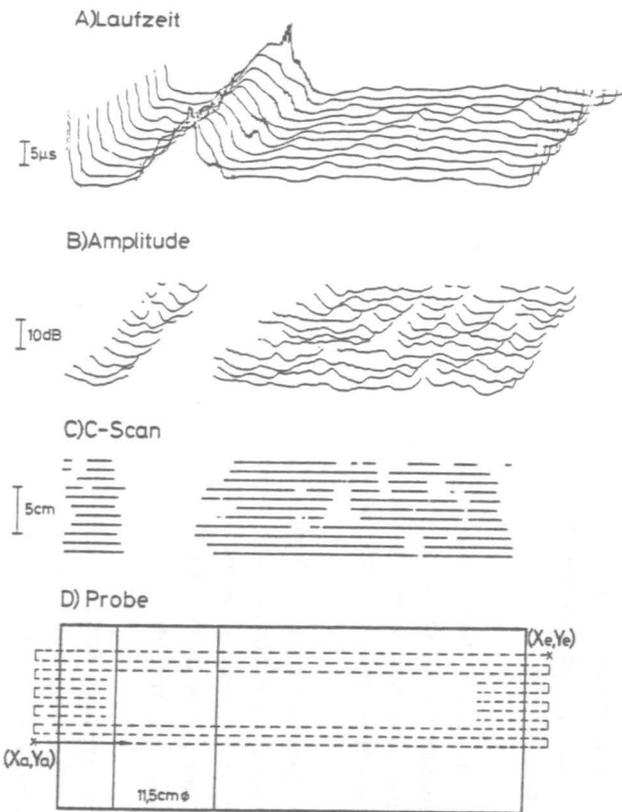


Abb. 7.20: Probe 4a

durch die Fehlstellen laufen, weil Grobzuschläge Kontaktbrücken gebildet haben, und muß nicht wie bei einem Hohlraum Defekte umlaufen [4] .

Die zum Schalldurchgang parallele Rißfläche der Probe 5a wird erwartungsgemäß nicht erfaßt, da ihre Ausdehnung senkrecht zum Schalldurchgang nur 3 mm beträgt. Abb. 7.21 deutet daher nur die Inhomogenitäten des Probekörpers an.

Demgegenüber zeigt die 9,5 cm große Rißfläche der Probe 6 (Abb. 7.22) sowohl eine Laufzeiterhöhung (5 μ s entsprechen etwa 10 %) als auch einen Amplitudeneinbruch. Ein Vergleich mit Bild D zeigt, wie gut der automatisch aufgezeichnete C-scan (Bild C) Lage und Ausdehnung beschreibt.

Die Meßergebnisse der Probe 7 gehen aus der Abb. 7.23 hervor. Bild A zeigt besonders im Bereich der 5,2 cm breiten Rißfläche eine Laufzeiterhöhung von etwa 3 % an, die mit einfachen geometrischen Betrachtungen über den Schallverlauf im Fehlstellenbereich übereinstimmt. Die Amplitudenmessungen bringen hier keine eindeutigen Aussagen. Deshalb wurde auf den C-scan ohne Amplitudeneinblendung verzichtet und statt dessen im Bild B und C der Amplitudenverlauf einmal ohne und mit pen-lift dargestellt. Neben Störungen von Inhomogenitäten ist zu vermuten, daß in diesem Fall die Messungen durch kleine Luftblasen gestört wurden, die sich auf die Oberflächen von Probe und Prüfköpfen abgesetzt hatten. Alle anderen Messungen wurden deshalb erst durchgeführt, nachdem das Wasser im Tauchbecken mehrere Tage abgestanden war.

Im Gegensatz zur maximalen 1,6 cm-Körnung des Zuschlages aller anderen Proben hatte die Probe 8 nur 8 mm als größte Körnung. Wegen des günstigeren Verhältnisses von Wellenlänge des Ultraschalls (2,5 cm) zur maximalen Korngröße ergeben sich bessere Prüfbedingungen. Die Amplitudendarstellung (Abb. 7.24B) zeigt im Vergleich zu den anderen Proben mit max. 16 mm Körnung weniger Schwankungen, die außerhalb der 9,8 cm breiten Rißfläche keinen pen-lift hervorrufen. Die Rißfläche wird sowohl in ihrer Ausdehnung als auch in der Position im C-scan richtig dargestellt (vgl. Bild D). Wie auch bei der Probe 6, die gleiche Fehlstellenabmessungen hat, beträgt die Laufzeiterhöhung infolge der Rißfläche

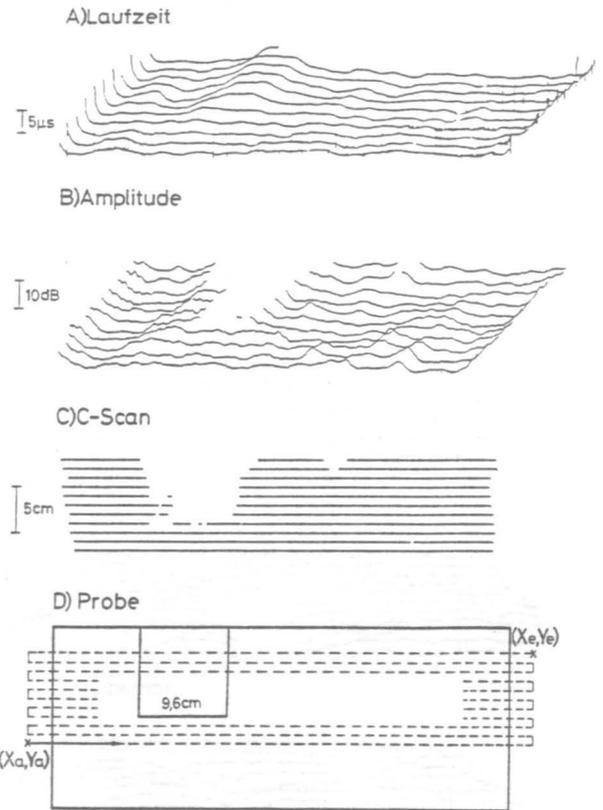
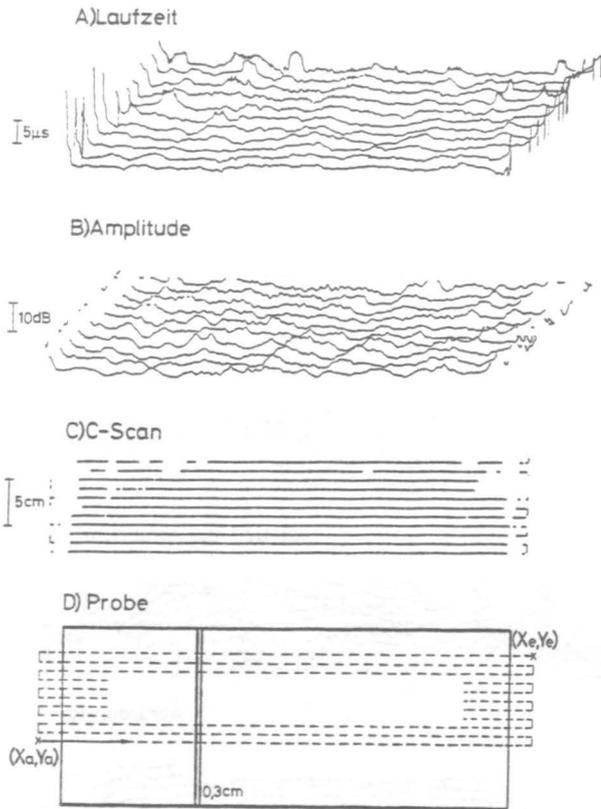


Abb. 7.21: Probe 5a

Abb. 7.22: Probe 6

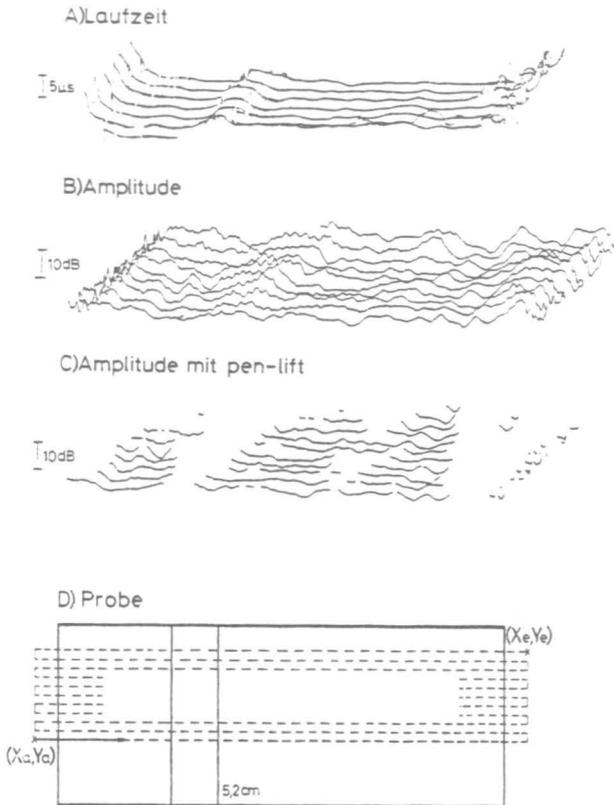


Abb. 7.23: Probe 7

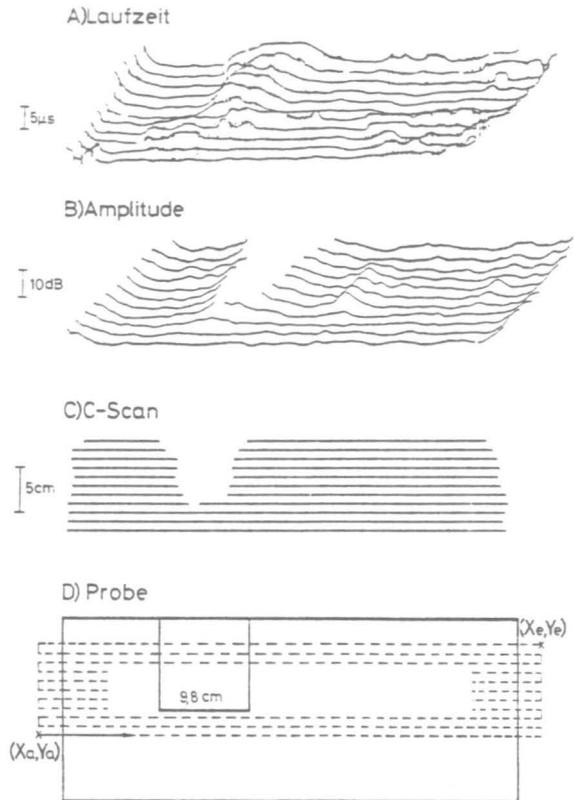


Abb. 7.24: Probe 8

5 μ s (Abb. 7.24A).

Bis auf die parallel zum Schalldurchgang befindliche Rißfläche der Probe 5a sowie die 2 cm ϕ -Bohrung der Probe 2b ließen sich alle künstlich eingebrachten Fehlstellen der Probekörper sicher auffinden. Während die 2 cm ϕ -Bohrung aufgrund der zu kleinen Abmessungen gegenüber den Inhomogenitäten und der Wellenlänge nicht gefunden werden kann, wird die Rißfläche der Probe 5a bei einer Längsdurchschallung aus dem Amplitudenverlauf sichtbar. Die automatisch aufgezeichneten C-scans liefern sowohl eine Aussage über die Lage als auch über die Ausdehnung der Fehlstelle. Die Messung der Amplitude innerhalb einer Blende erwies sich für defektoskopische Untersuchungen als sehr geeignet. Mit diesem quasi-zweiparametrischen Prüfverfahren ist eine automatische Fertigungskontrolle von hochbelastbaren Fertigteilen möglich. Um die Empfindlichkeit der Fehlerschwelle etwas herabzusetzen, sollte eine Prüffrequenz von 100 kHz gewählt werden.

7.6 Untersuchungen der optimalen Anregung zur Durchschallung großer Entfernungen

Für Ultraschallprüfungen großer Bauteile oder Bauwerke ist es wichtig, den Sendeimpuls so zu wählen, daß eine möglichst hohe Empfangsspannung für den Empfänger zur Verfügung steht. Die starke Schallschwächung des Baustoffs Beton kann nur begrenzt durch höhere Verstärkung auf der Empfängerseite ausgeglichen werden. Die Verstärkungsgrenze ist dann erreicht, wenn aus dem vom Eingangsverstärker verursachten Rauschen das Ultraschallsignal nicht mehr "herausgehört" werden kann. Für Ultraschallprüfungen ist mindestens ein Signal-Rauschspannungsabstand von 6 dB erforderlich. Im Grenzfall ist dann die Signalspannung nur doppelt so groß wie die Rauschspannung. Um dieses elektronische Rauschen möglichst gering zu halten, wurde empfängerseitig bereits eine umschaltbare Selektion auf bestimmte Frequenzbereiche vorgesehen (vgl. 6.3.1). Auf der Senderseite ist die maximale Ausgangsamplitude durch die Betriebsspannung der Sendestufe begrenzt. Bei gegebener Betriebsspannung übt die Impulsform des Senders einen Einfluß auf die Empfangsspannung aus. Die Impulsform muß derart gewählt werden, daß die Sendeenergie möglichst auf den Frequenzbereich konzentriert ist, der mit Prüfkopf nach dem Durchlaufen des Baustoffs

Beton optimal empfangen wird. Aus den Frequenzspektren der aufgebauten Ultraschallsender (vgl. 6.2) geht hervor, daß der CS-Sender die Energie auf einen relativ schmalen Frequenzbereich konzentrieren kann und deshalb bei gegebener Betriebsspannung von allen Sendern die größte Spannung am Empfangsprüfkopf entstehen lassen müßte.

Abb. 7.25 stellt die Empfangsspannung des in Längsrichtung durchschallten Balkens (Probe 1, Schallweg 1,30 m) in Abhängigkeit der Prüfkopfanregung dar. Es wurden der Breitbandsender, der Sinus-Burst- und der CS-Sender eingesetzt, wobei die Sendespannung jeweils 150 V betrug. Die Empfangsspannung ist jeweils für eine Blendendauer von 10 und 20 μs aufgetragen. Da der Breitbandsender keine Einstellung der Impulsdauer zuläßt, können nur zwei Punkte, die bei $t = 2 \mu\text{s}$ liegen, angegeben werden. Im Gegensatz zur stufenlosen Pulsbreiteneinstellung des CS-Senders kann die Pulsbreite am Burst-Sender nur über die Anzahl n der Sinuswellen angegeben werden. Die Punkte liegen jeweils bei $n \cdot T$, wobei T die Schwingungsdauer der eingestellten Prüffrequenz angibt (hier 69 kHz). Die Punkte für $n = 1-7$ sind in der Abb. 7.24 jeweils für eine 10 und 20 μs -Blende aufgetragen. Besonders auffällig ist die relativ niedrige Empfangsspannung bei Verwendung des CS-Senders im Vergleich zu den anderen Sendern. Die Empfangsspannung steigt zunächst mit zunehmender Pulsbreite an und fällt danach wieder ab. Für Pulsbreiten größer als 40 μs ergeben sich Geraden. Das Amplitudenmaximum für eine Blende von 10 μs liegt bei einer Pulsbreite von $T = 15 \mu\text{s}$. Wird die Blendendauer verdoppelt, muß für eine maximale Empfangsspannung die Pulsbreite ebenfalls verdoppelt werden. Demgegenüber bleibt ab $n = 2$ bei Sinus-Burst-Anregung die Empfangsamplitude konstant. Bei einer 10 μs -Blende ist die Änderung der Empfangsspannung in Abhängigkeit von der Anregung kleiner als 1 dB. Die Unterschiede erreichen max. 4 dB zwischen CS-Sender und Sinus-Burst-Sender, mit dem sich die größte Empfangsspannung erreichen läßt. Diese beträgt 2 dB mehr gegenüber dem Breitbandsender und 4 dB mehr gegenüber dem CS-Sender.

Obwohl der CS-Sender, wie den Frequenzspektren der Abb. 6.6b zu entnehmen ist, die Sendeleistung auf einen schmalen Frequenzbereich konzentriert (im Gegensatz zu allen anderen Sendern), läßt sich damit innerhalb der Blende nicht die größte Empfangsspan-

werden, bis der Prüfkopf auf den maximalen Wert eingeschwungen ist. Das Empfangssignal würde mit größerer Blendendauer zunehmend von Störreflexionen beeinflusst, wie aus Abb. 7.8 ersichtlich ist. Der Sinus-Burst-Sender erzeugt im Vergleich zum wesentlich einfacher aufgebauten Breitbandsender nur 2 dB höhere Empfangsspannungen. Für baupraktische Ultraschallprüfungen sind zwei Folgerungen zu ziehen:

1. Die Anregung der Prüfköpfe sollte mit einem breitbandigen Sendeimpuls erfolgen, wobei die Impulsdauer des Senders (gebildet durch R und C, vgl. Kap. 6.2) der Resonanzfrequenz der Prüfköpfe anzupassen ist.
2. Die bisher verwendeten ungedämpften Prüfköpfe haben zu große Anstiegszeiten (vgl. Gl. 5.14) und können daher innerhalb der Blendendauer nicht auf die Empfangsamplitude "eingeschwungen" sein. Empfehlenswert sind deshalb gedämpfte Prüfköpfe.

Diese Folgerungen gelten nicht nur für Messungen der Ultraschallamplitude, sondern auch für Messungen der Impulslaufzeit, wo nur der Einsatz des ersten Empfangsimpulses ausgewertet wird. (vgl. Abb. 4.1).

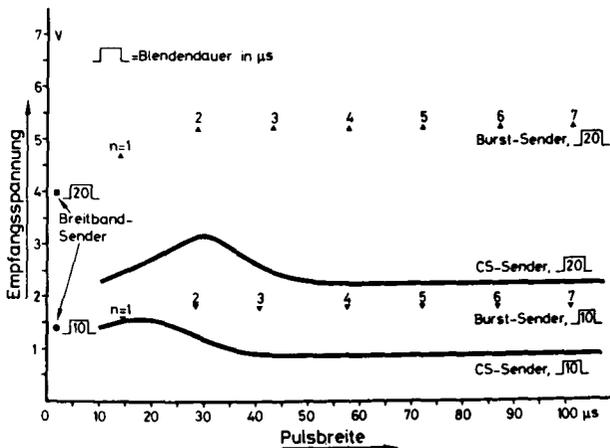


Abb. 7.25: Empfangsspannung in Abhängigkeit von der Anregung

7.7 Frequenzanalyse bei fehlerfreien und fehlerhaften Bauteilbereichen

Mit Hilfe der Frequenzanalyse soll versucht werden, einen weiteren Parameter für defektoskopische Untersuchungen bereitzustellen. Eine Frequenzanalyse sollte jedoch nur in Zweifelsfällen angewandt werden, weil der zeitliche Aufwand sonst unvertretbar groß wird. Die automatische Aufzeichnung der Funktion $F(\omega)$ von allen Rasterpunkten einer Probe dauerte jeweils etwa 45 s und führte zu einer unübersichtlichen Datenflut. Zu begrüßen wäre es, wenn mit Hilfe der Frequenzanalyse eine Klassierung von Fehlstellen möglich wäre.

Um die Auswertung von Ultraschallwellen, die auf "Umwegen" (Störreflexionen) zum Empfangsprüfkopf gelangen, weitgehend ausschließen zu können, muß die Frequenzanalyse des Empfangssignals analog zur Amplitudenmessung in einem Blendenbereich erfolgen. Während die Optimierungen für Amplitudenmessungen eine Blendendauer von 10 μ s ergaben, steht, wie sich nach ersten Untersuchungen herausstellt, innerhalb dieses relativ kurzen Zeitintervalls noch nicht ausreichend Information für eine Frequenzanalyse zur Verfügung. Unterschiede in den Spektren von fehlerfreien und fehlerhaften Bauteilbereichen ergaben sich erst ab einer Blende von 25 μ s. Die Gründe lagen darin, daß Ein- und Ausschaltvorgänge der Blende das Frequenzspektrum beeinflussen und der Prüfkopf eine bestimmte Zeit benötigt, um auf die Empfangsamplitude eingeschwungen zu sein (Impulsanstiegszeit, vgl. 5.4.3).

Der Breitbandsender diente zur Anregung des Sendeprüfkopfes. Die Messungen erfolgten im Direktkontakt der Prüfköpfe an die Betonoberfläche. Die Dämpfung und damit auch die Bandbreite ist aufgrund der Impedanzverhältnisse im Direktkontakt wesentlich größer als bei Tauchtechnikprüfungen. Eine große Bandbreite des Senders und der Prüfköpfe ist für eine Frequenzanalyse günstig, um Änderungen des Amplitudenverlaufs über einen möglichst großen Frequenzbereich registrieren zu können.

Durch Anhebung der Verstärkung ließ sich der Amplitudenabfall im Fehlstellenbereich kompensieren, so daß die Schreiberdarstellungen $F(\omega)$ im gleichen Dynamikbereich erfolgten. Die Funktionen $F(\omega)$

werden dann leichter vergleichbar. Die Position der Blende wurde so gewählt, daß der Beginn noch vor dem Einsetzen des Ultraschallsignals lag und das Ausschalten im Signaldurchgang erfolgte. Mit diesen Einstellungen beeinflußt die Blende das Spektrum am wenigsten.

Abb. 7.26 stellt Frequenzspektren der Proben 2a, 4a, 6 und 8 sowohl im fehlerfreien (gestrichelte Kurven) als auch im fehlerhaften Bereich dar. In fehlerstellenfreien Bereichen sind bei etwa 180 kHz Amplitudeneinbrüche festzustellen, die an fehlerhaften Positionen fehlen. Auffällig ist, daß der Fehlertyp "Kiesnest" (Probe 4a) ein Amplitudenminimum im Bereich von 120 kHz verursacht, das bei keiner anderen Fehlstelle zu beobachten ist. Eine allgemeine Klassierung von Fehlstellen mit Hilfe der Frequenzanalyse scheint jedoch nicht möglich, da z.B. die Rißflächen der Proben 6 und 8 unterschiedliche Amplitudenfunktionen hervorrufen. Vielmehr geht der infolge der Fehlstelle verursachte Laufweg des Ultraschalls stärker in das Ergebnis ein, da die Frequenzanalyse bei den Fehlstellen der Proben 2a (zylindrischer Hohlraum) und der Probe 6 (rechteckige Rißfläche) nahezu gleiche Ergebnisse liefern.

Auf das Frequenzspektrum der Betonplatte sind wesentlich größere Einflüsse der Fehlstelle festzustellen. Sowohl bei Durchschallung in X- als auch in Z-Richtung (35 bzw. 100 cm Schallweg) verursacht die Fehlstelle eine eindeutige Verschiebung des Amplitudenmaximums nach tieferen Frequenzen. In beiden Fällen beträgt die Verschiebung etwa 40 kHz (Abb. 7.27). Die Amplitudenfunktionen an fehlerfreien Positionen weisen jeweils einen Einbruch im Bereich zwischen 50 und 70 kHz auf, der in Fehlstellenbereichen nicht zu beobachten ist.

Bei relativ kurzen Schallwegen ist die aufwendige Frequenzanalyse für eine Detektierung der Fehlstellen nicht empfehlenswert, da mit Hilfe des quasi-zweiparametrischen Amplitudenmeßverfahrens eine sichere Fehlstellenerkennung möglich ist. Erst bei längeren Schallwegen, z.B. der Durchschallung in X-Richtung der Probe 9, wo im Fehlstellenbereich nur ein Amplitudeneinbruch von 10 dB auftritt, kann die Frequenzanalyse zusätzliche Information bezüglich fehlerfrei oder fehlerhaft geben. Die Verschiebung des Amplitudenmaximums von 40 kHz ist im fehlerhaften Bereich deutlich aus dem Fre-

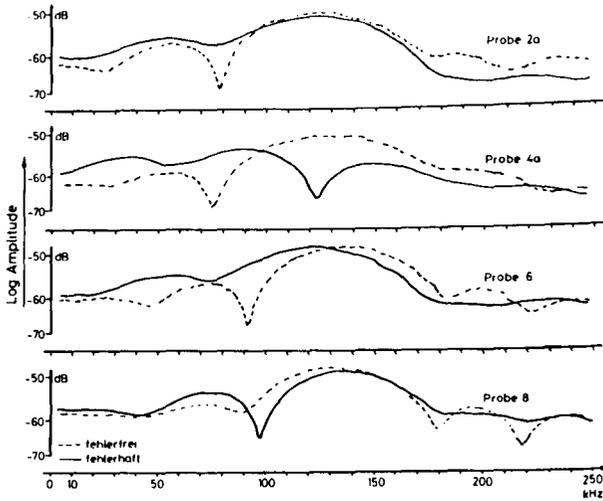


Abb. 7.26: Einfluß verschiedener Fehlstellen auf das Frequenzspektrum

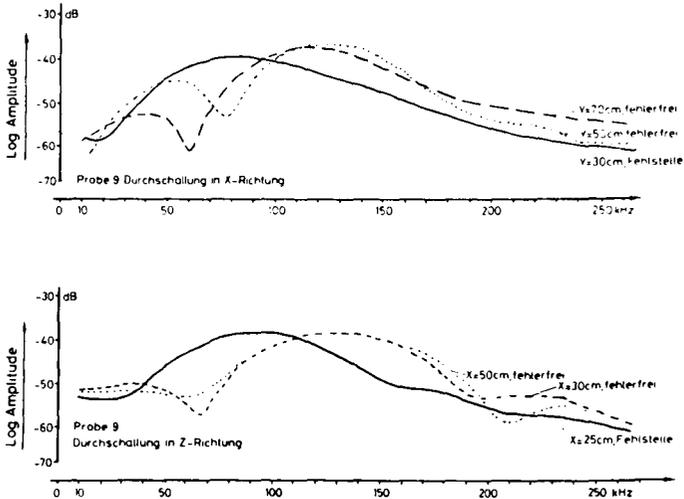


Abb. 7.27: Einfluß der Fehlstelle der Probe 9 auf das Frequenzspektrum

oben: Durchschallung in X-Richtung

unten: Durchschallung in Z-Richtung

8. Zerstörungsfreie Kontrolle der Zementsteinhydratation

Die entwickelte und aufgebaute Ultraschallelektronik für Messungen am Baustoff Beton eignet sich aufgrund der automatischen Meßwertverarbeitung auch gut zur Überwachung von zeitlich veränderlichen Größen der Laufzeit und Amplitude, wie sie bei der Hydratation hydraulischer Bindemittel auftreten. Die Registrierung der als zeitabhängige Spannungen vorliegenden Ultraschallmeßgrößen kann mit Hilfe eines zweikanaligen X-t-Schreibers erfolgen. Zusätzlich kann eine Frequenzanalyse bei verschiedenen Hydratationszeiten eingesetzt werden. Eine automatische Aufzeichnung der Amplitude in Abhängigkeit der Hydratationszeit sowie eine Frequenzanalyse wurden bisher noch nicht durchgeführt.

Die Hydratation ist ein zeitabhängiger Prozeß, der einsetzt, sobald die Zementkörner mit dem Anmachwasser in Verbindung kommen. Wie Abb. 8.1 zeigt, läßt sich der Hydratationsablauf in drei Stufen unterteilen [137], die im folgenden kurz beschrieben werden:

In der Hydratationsstufe I bilden sich im zunächst plastischen Zementleim geringe Mengen an Calciumhydroxid und Trisulfat. Das Ansteifen wird durch die Trisulfatnadeln hervorgerufen.

Nach etwa vier Stunden, in der zweiten Hydratationsstufe, bilden sich wesentliche Mengen langfaseriger Calciumsilicathydrat-(CSH-) Kristalle, die den wassergefüllten Raum zwischen den Zementpartikeln überbrücken und dem Gefüge bereits eine Festigkeit geben.

Eine Füllung der Poren durch feinkristallines Calciumsilicathydrat und Calciumaluminathydrat erfolgt in der dritten Hydratationsstufe. Das Grundgefüge verdichtet sich dadurch und die Festigkeit wird erhöht.

Kenntnisse über den Hydratationsverlauf und Hydratationsgrad ermöglichen Aussagen, bis zu welchem Zeitpunkt das Bindemittel thixotrop, d.h. verarbeitungsfähig ist. Im fortgeschrittenen Stadium lassen sich Rückschlüsse auf die bereits erreichte Baustofffestigkeit ziehen.

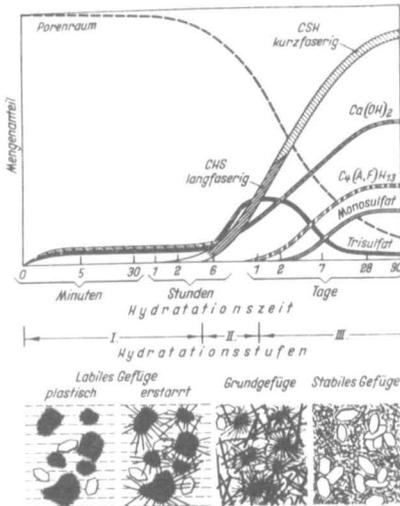


Bild 102. Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements (nach W. Richartz)
 CSH = Calciumsilicathydrat
 $\text{C}_4(\text{A,F})\text{H}_{13}$ = Eisenoxidhaltiges Tetracalciumaluminathydrat

Abb. 8.1:

Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen bei der Hydratation des Zements (n. W. Richartz), s. 137!

Meyer und Buchmann [10] unternahmen erste Versuche, mit Hilfe von Schallmeßverfahren den Verfestigungsvorgang von hydraulischen Baustoffen zu erfassen, die Ende der sechziger und Anfang der siebziger Jahre von Dohnalik, Leskie und Flaga [75], Waubke und Neisecke [4] fortgesetzt wurden. Waubke [26] versuchte erstmals, einen formalen Zusammenhang zwischen Impulslaufzeit und Hydratationsgrad anzugeben, wobei der Wasserzementwert sowie Schrumpf- und Schwinderscheinungen berücksichtigt wurden. Während die Untersuchungen dabei auf eine Ultraschallmeßgröße beschränkt blieben, setzte Neisecke [4] dann ein dreiparametrisches Ultraschallverfahren ein, welches neben der Messung der longitudinalen Schallgeschwindigkeit v_L auch die transversale Schallgeschwindigkeit v_T sowie die Intensität J beinhaltet. Während die Intensitätsmessung keine zusätzliche Information lieferte, konnte aus v_L und v_T die dynamische Poissonkonstante μ_d in Abhängigkeit des Hydratationsgrades ermittelt werden.

Erfahrungen aus der Praxis sind selten und wurden bisher nur bei der Kontrolle des Verfestigungsverhaltens von Plattformen für

die Ölproduktion bekannt. Winden und Brant [78] führten während der ersten 24 Stunden nach dem Anmachen Impulslaufzeitmessungen durch. Die Anfangswerte von v_L lagen unter 1000 m/s, ab 1500 m/s bestand keine Verarbeitungsfähigkeit mehr. Der Erstarrung wurden erst Werte über 3500 m/s zugeordnet.

In der hier vorgelegten Arbeit wurde zur Messung des Hydratationsvorgangs eine Meßzelle aus Styropor mit den Innenmaßen (10 x 10 x 10 cm³) angefertigt. An zwei gegenüberliegenden Seiten waren Aussparungen für die Ultraschallprüfköpfe S 9204 vorgesehen. Styropor hat einerseits den Vorteil einer schlechten Wärmeleitung, so daß die Hydratation annähernd adiabatisch verlaufen konnte, andererseits verhindert Styropor den Schalldurchgang über das Gehäuse. Prüfköpfe und Innenraum der Meßzelle wurden mit Vaseline eingestrichen, so daß einerseits eine akustische Kopplung der Prüfköpfe an den Zementleim bestand und andererseits die Meßzelle durch " Ausschalen " des Prüfkörpers wieder verwendbar war. Wegen der während der Hydratation auftretenden Schrumpf- und Schwunderscheinungen mußten die Prüfköpfe mit einer Anpreßvorrichtung an den sich erhärtenden Zementleim ange drückt werden.

Für die Ultraschallmessungen des Hydratationsverlaufs wurde eine breitbandige Anregung gewählt, um bei der parallel zu den Laufzeit- und Amplitudenmessungen durchgeführten Frequenzanalyse Veränderungen in einem möglichst großen Bereich erfassen zu können. Die Blendendauer war im Hinblick auf die Frequenzanalyse (vgl. Kap. 7.6) 40 μ s gewählt.

Abb. 8.2 stellt Schallgeschwindigkeit und Amplitude in Abhängigkeit von der Hydratationszeit einer Zementpaste aus PZ 35 F dar. Die ersten Meßwerte konnten erst drei Stunden nach dem Anmachen erhalten werden. Ein Vergleich mit der Abb. 8.1 ergibt, daß zu diesem Zeitpunkt das Ende der Hydratationsstufe I erreicht ist. Die größten Veränderungen der Ultraschallmeßgrößen treten in der Hydratationsstufe II auf. Die Ultraschallamplitude ändert sich um 65 dB, so daß die Verstärkung schrittweise vermindert werden mußte. Der Amplitudenverlauf (Abb. 8.2) mußte deshalb aus mehre-

ren der vom X-t-Schreiber aufgezeichneten Teile zusammengesetzt werden. Die Schallgeschwindigkeit änderte sich 3 Stunden nach dem Anmachen von Werten um 800 m/s bis auf etwa 3 500 m/s nach 24 Stunden. Die größte Änderung lag im Bereich von 3 bis 8 Stunden, also im Übergangsbereich zwischen den Hydratationsstufen I und II.

Die bei unterschiedlichen Hydratationsstufen durchgeführten Messungen der Frequenzanalyse brachten die Erklärung dafür, daß erst 3 Stunden nach dem Anmachen die ersten Messungen möglich waren. Wie aus der unteren Kurve der Abb. 8.3 ersichtlich ist, überträgt die Zementpaste 3,5 Stunden nach dem Anmachen nur Ultraschallwellen, die im Frequenzbereich um 30 kHz liegen. Die verwendeten Prüfköpfe besitzen jedoch die höchste Empfindlichkeit im Bereich oberhalb von 100 kHz, wie aus der Abb. 7.3 hervorgeht. Die Empfindlichkeit der Prüfköpfe bei 30 kHz ist um über 30 dB schlechter als bei 130 kHz. Zur Beobachtung von Hydratationsvorgängen im Bereich I sind deshalb niederfrequenzere Prüfköpfe notwendig.

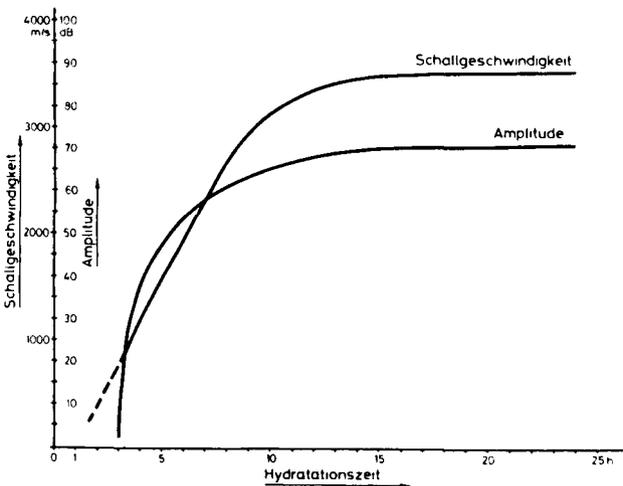


Abb. 8.2: Schallgeschwindigkeit und Amplitude in Abhängigkeit von der Hydratationszeit

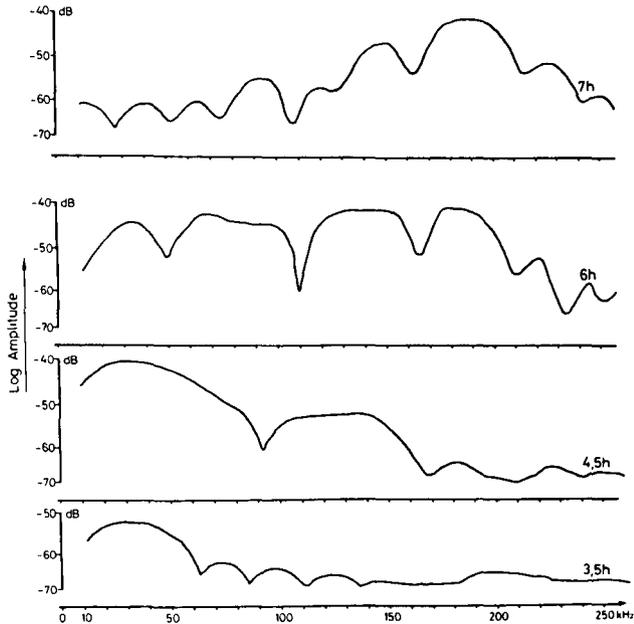


Abb. 8.3: Frequenzanalyse bei verschiedenen Hydratationszeiten

4,5 Stunden nach dem Anmachen treten zunehmend höhere Frequenzanteile auf (Abb. 8.3, 2. Kurve von unten). Eine nahezu horizontal verlaufende Frequenzabhängigkeit ist nach 6 Stunden zu beobachten. Der Frequenzbereich erstreckt sich dann von 30 bis 190 kHz. Ein Maximum bei höheren Frequenzen tritt ab 7 Stunden auf, der Frequenzverlauf ändert sich dann nicht mehr.

Aus diesen zusätzlichen und orientierenden Untersuchungen zum Einfluß des Hydratationsverlaufs auf die Schallmeßparameter wird zweifelsfrei deutlich, daß neben den bisher durchgeführten Schallgeschwindigkeits- und Intensitätsmessungen offenbar die Frequenzanalyse eine weitere Meßgröße zur Beobachtung der Zementsteinhydratation liefert, da das Übertragungsverhalten des Zementsteins für die Schallfrequenzen der eingesetzten breitbandigen Prüfköpfe

während der Erhärtung deutliche Veränderungen zeigt. Der erhärtende Zementstein wirkt dabei etwa in der Art eines zeitlich veränderlichen Frequenzfilters. Eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Frequenzübertragungsverhalten und Hydratationsfortschritt des Zementsteins hätte den Rahmen der hier vorgelegten Arbeit weit überschritten und muß daher Anschlußuntersuchungen vorbehalten bleiben. An dieser Stelle soll daher nur auf den hier erstmals beschriebenen Effekt und seine grundsätzliche Bedeutung für die zerstörungsfreie Kontrolle der Zementsteinhydratation hingewiesen werden.

9. Zusammenfassung

Im Gegensatz zum Stahl- und Maschinenbau, wo die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall zu einem seit Jahrzehnten bewährten Standardverfahren etabliert ist, werden Ultraschallprüfungen im Bauwesen selten eingesetzt. Das hat vor allem drei Gründe:

- a) Die bei homogenen Werkstoffen so erfolgreich eingesetzte Impuls-Echo-Technik kann am inhomogenen Baustoff Beton nicht angewandt werden, da hochfrequente Ultraschallimpulse einen zu starken Intensitätsverlust erleiden, so daß niederfrequente Prüfköpfe eingesetzt werden müssen. Diese erzeugen einerseits für die Impuls-Echo-Technik viel zu lange Impulse (das Echo wird "über-tönt") und besitzen andererseits keine Richtcharakteristik.
- b) Die langjährigen Bemühungen, einen festkörper-physikalischen, nicht existierenden Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit des Betons auf empirischem Wege doch noch nachweisen zu wollen, haben die Ultraschallprüfung nur in Mißkredit gebracht.
- c) Die bisherigen Untersuchungen hat man in der Vergangenheit mit Meßeinrichtungen durchgeführt, die in der Regel nur sehr unvollständig angepaßt waren.

Da Ultraschallprüfungen meist ohne Erfolg blieben, wenn sie nur zur Bestimmung absoluter Größen dienen sollten und auf nur eine Meßgröße beschränkt blieben, werden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig bereits seit über 10 Jahren mehrpapametrische Ultraschallmessungen durchgeführt, wobei Veränderungen am Bauwerk oder Baustoff mit Hilfe von Relativverfahren ermittelt wurden.

Die vorliegende Arbeit verfolgte deshalb diesen eingeschlagenen Weg und hatte insbesondere das Ziel, die Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfung an Bauteilen aus Beton bezüglich der Defektoskopie zu erhöhen.

Dazu waren folgende Arbeitsschritte notwendig:

- a) Untersuchungen an Prüfköpfen mit dem Ziel
 - die tatsächliche Dauer des in dem Baustoff Beton abgestrahlten Sendeimpulses zu ermitteln,
 - die Impulsdauer zu verkürzen und
 - geeignete Prüfköpfe für die in der Arbeit geplanten Untersuchungen und baupraktische Anwendungen auszuwählen.

- b) Entwicklung und Bau einer den speziellen Erfordernissen des inhomogenen Werkstoffs Beton angepaßten Ultraschall-Meßeinrichtung bestehend aus:
 - verschiedenen Sendern (häufig nur Impulsgenerator genannt) und
 - einer automatischen Auswertung des Empfangssignals in bezug auf Laufzeit, Intensität und Frequenzanalyse.

- c) Optimierung der Meß- und Darstellungsgrößen wie
 - Frequenz und Form des Sendeimpulses,
 - Blendendauer (für Amplitudenmessung) und Blendenanfang und
 - Aufzeichnung der Amplitudenortskurven (linear oder logarithmisch?)

Die vorstehend kurz aufgezeigten Arbeitsschritte sind zusammenfassend wie folgt realisiert:

zu a): Infolge des Empfangs störender Reflexionen aufgrund der kugelförmigen Richtcharakteristik der Prüfköpfe mußte für eine exakte Messung der Impulsdauer derselbe Prüfkopf verwendet werden, der auch als Sender arbeitet. Ein dafür mit Dioden aufgebauter elektronischer Schalter verbindet den Prüfkopf während des Sendeimpulses mit dem Impulsgenerator und anschließend nur mit dem Empfänger. Die tatsächliche

Impulsdauer verschiedener Prüfköpfe wurden damit in Abhängigkeit von elektrischer und mechanischer Dämpfung ermittelt.

Eine elektronische, d.h. aktive Dämpfung wurde erprobt, indem der piezoelektrische Kristall in einen Regelkreis einbezogen war. Durch Teilung der Elektroden konnte der Kristall gleichzeitig als Sender und Empfänger benutzt werden.

- zu b) Um das Frequenzband (Prüffrequenz und Bandbreite) dem Baustoff Beton optimal anpassen zu können, wurden außer einem bisher üblichen Breitbandsender (einseitiger, kurzer Impuls) frequenzvariable Sender gebaut. Diese gestatten im Gegensatz zum üblichen Prüfverfahren, wo die Frequenz allein vom Prüfkopf bestimmt wird, eine stufenlose Einstellung der Frequenz am Sender. Die gewählte Frequenz kann von Digitalanzeigen abgelesen werden. Hierzu wurden speziell für den baupraktischen Ultraschallfrequenzbereich von 10 - 400 kHz ein Sinus-Burst- (getakteter Sinusimpuls) und ein CS-Sender (sinusförmige Hüllkurve) aufgebaut, die statt des bisherigen Impulsgenerators zur Anregung der Prüfköpfe benutzt wurden.

Für Impulslaufzeitmessungen, die mit kommerziellen Meßgeräten ebenfalls durchgeführt werden können, wurde eine entsprechende Schaltung vorgesehen.

Intensitätsmessungen mußten bisher manuell über die Höhe der ersten Empfangsamplitude vorgenommen werden, da bei Messungen mit sogenannten "Röhrenvoltmetern" oder Millivoltmetern eine Mittelwertbildung über die Empfängergesamtspannung erfolgt und damit auch unerwünschte Störreflexionen in die Auswertung miteinbeziehen. Für defektoskopische Untersuchungen besteht die Notwendigkeit, die Amplitudenmessung zu automatisieren, um sie wirtschaftlich einsetzen zu können. Aus dem Empfangssignal wird von der Meßelektronik dafür ein Zeitintervall ausgeblendet (Setzen der Blende). Im Zeitintervall erfolgt dann eine Auswertung durch Integration des gleichgerichteten Signals. Für die Erfassung eines höheren Dynamikbereichs (bis 50 dB) kann das Signal

vor der Gleichrichtung logarithmiert werden. Die Meßschaltung stellt dadurch eine dem Mittelwert der Ultraschallamplitude proportionale Gleichspannung zur Verfügung, die mit einem (Digital-) Voltmeter angezeigt oder auf einem XY-Schreiber dargestellt werden kann.

Da die Prüffrequenz die Wellenlänge des Ultraschalls und damit auch die Auflösung (kleinste Fehlergröße) festlegt, ist es bei einer Ultraschallmessung wichtig, das verwendete Frequenzband zu kennen. Der für den Ultraschallfrequenzbereich im Bauwesen hier entwickelte Spektrumanalysator (Wobbelanalysator) zeichnet mit Hilfe eines XY-Schreibers die Amplituden (70 dB Dynamik) in Abhängigkeit von der Frequenz (quarzgenau) auf.

Die Eignung der Frequenzanalyse als weiterer Meßparameter wurde bei defektoskopischen Untersuchungen und der Beobachtung der Zementhydratation erprobt.

- zu c) Um eine reproduzierbare Ankopplung (wichtig für eine Optimierung der Meß- und Darstellungsgrößen) der Prüfköpfe an den Beton zu erhalten, wurde die entwickelte Elektronik mit der Tauchtechnik-Prüfanlage der DFVLR in Braunschweig kombiniert und die Messungen im Wasserbecken durchgeführt. Diese Anlage mit einem $1 \times 1 \text{ m}^2$ großen Tauchbecken besitzt einen schrittmotorgesteuerten XYZ-Manipulator. Durch Abzählen von Schritimpulsen ist es möglich, einen XY-Schreiber synchron zum Prüfkopf mitzubewegen, so daß erstmals automatische Aufzeichnungen von Amplitudenortskurven fehlerhafter Betonproben durchgeführt werden konnten.

Die Ergebnisse aller durchgeführten Arbeiten mit der speziell dafür aufgebauten Meßelektronik lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1) Aktive Dämpfung von Sende- und Empfangsköpfen

Eine Regelung des Sende- und Empfangskristalls zur Verkürzung der Impulse ist nicht möglich, da, wie sich bei Untersuchungen an unterschiedlichen Probekörpergeometrien

herausstellte, die durch den Kristall gebildete Regelstrecke kapazitiv überbrückt war. Die störende kapazitive Kopplung bildete dabei der Kristall selbst.

2) Elektrische und mechanische Dämpfung der Prüfköpfe

Eine elektrische Dämpfung, d.h. ein Energieentzug über die Parallelschaltung eines Widerstandes, ist wenig effektiv, da einerseits selbst bei Impedanzanpassung theoretisch nur 50 % Energie entzogen werden kann, andererseits aber infolge des Koppelfaktors der Wirkungsgrad auf wenige Prozente absinkt. Zur Verkürzung der Impulse eignet sich daher nur eine mechanische Dämpfung. Untersuchungen haben ergeben, daß sich Prüfköpfe finden lassen (vgl 3), bei denen bereits die Ankopplung an den Beton eine mechanische Dämpfung bewirkt, die für ausreichend kurze Impulse sorgt.

3) Auswahl der Prüfköpfe

Es wurde ein Prüfkopf ausgewählt, der vom Hersteller als Schallemissionssonde vorgesehen ist (Typ S 9204, Fa. Dunegan/Endevco). Dieser nur etwa 22 mm Ø Prüfkopf läßt sich mit Vaseline leicht ankoppeln und erzeugt bei guter Ankopplung an Betonbauteile (vgl. 2) etwa nur 60 µs lange Schallimpulse.

Die für Intensitätsmessungen wichtige Güte der Ankopplung der Prüfköpfe an das Bauteil läßt sich anhand der Dämpfung (Impulsdauer) der Köpfe infolge der akustischen Kopplung mit dem Baustoff kontrollieren. Unter Ausnutzung dieses Effekts wurde die Meßeinrichtung derart erweitert (Diodenschalter), daß auch die Güte der Ankopplung überprüfbar ist. Diese Zusatzschaltung ist zur Klärung der Frage, ob ein Amplitudenabfall durch eine Fehlstelle im Bauteil, der nur durch schlechte Ankopplung hervorgerufen wird, besonders wichtig. Erst mit dem hier entwickelten Ankoppelmeßverfahren ist ein baupraktischer Einsatz des Intensitätsverfahrens, welches für defekt-akustische Untersuchungen gegenüber dem

ausschließlich verwendeten Impulslaufzeitverfahren große Vorteile bringt, ohne aufwendige Flüssigkeits- ankopplung möglich.

4) Ergebnisse der Optimierungen

4.1 Prüffrequenz

- eindeutige Beeinflussung nur mit einem CS-Sender (sinusförmige Hüllkurve) möglich
- max. Prüffrequenz 160 kHz ($\lambda = 2,5$ cm) nur erforderlich, wenn Fehler ab 5 cm senkrecht zum Schalldurchgang gefunden werden sollen, sonst kleinere Frequenzen (~ 100 kHz)

4.2 Breite des Zeitintervalls für die Intensitätsmessung (Blendendauer)

- günstigste Breite: 10 μ s
- bei kürzerer Blendendauer: zu kleine Amplitudenspannung
- bei längerer Blendendauer: zunehmende Störung der Auswertung durch Reflexionen, die aufgrund von unerwünschten Amplitudeneinbrüchen die Defektoskopie erschweren

4.3 Beginn des Zeitintervalls für Intensitätsmessung (Blendenanfang)

- automatisch mit Beginn des ersten Empfangsimpulses: echte Amplitudenmessung
- fester Abstand vom Sendeimpuls: quasi-zweiparametrisches Prüfverfahren. Aufgrund der Impulslaufzeiterhöhung im Fehlstellenbereich "läuft" das Empfangssignal aus der Blende heraus. Somit ergibt sich im Fehlstellenbereich der größte Amplitudenunterschied gegenüber den fehlerfreien Bauteilbereichen

4.4 Aufzeichnung der Amplitudenortskurven

- Damit eine eindeutige Fehlstellenerkennung aus den Amplitudenortskurven möglich ist, müssen die Kurven

logarithmisch aufgetragen werden. Die durch Inhomogenitäten hervorgerufenen kleineren Amplitudeneinbrüche (ca. 6 dB) werden dann ausreichend unterdrückt und nicht als Fehlstellen gedeutet.

5) Prüfergebnisse an erhärteten Betonproben mit künstlichen Fehlstellen

5.1 Die an Betonproben durchgeführten Ultraschallmessungen zeigen, daß die Optimierung (vgl. 4) nicht nur für Prüfungen in Tauchtechnik, sondern auch im Direktkontakt der Prüfköpfe an den Baustoff gültig sind. Auch Fehlstellen von nur 10 % der Bauteildicke ließen sich bei einem Schallweg von 1 m noch nachweisen, wobei eine Amplitudenabnahme von 10 dB gegenüber den Inhomogenitäten auftrat.

5.2 Impuls-Echo-Technik

Trotz der durchgeführten Optimierungen und Verbesserungen erscheint ein baupraktischer Einsatz der Impuls-Echo-Technik nicht möglich. Wegen der stofflichen Inhomogenitäten müssen niedrige Prüffrequenzen verwendet werden, die mangelnde Richtcharakteristik aufweisen und neben den Longitudinalwellen störende Oberflächenwellen abstrahlen. Die letzteren "übertönen" Reflexionen aus dem Probeninnern.

5.3 Automatische Prüfungen

Mit einem zusätzlichen Komparator, der die Feder des XY-Schreibers bei Unterschreiten eines Amplitudenschwellwertes abhebt ("pen-lift") und in Kombination mit einer Tauchtechnikprüfanlage ließen sich mit der Meßelektronik für den Baustoff Beton erstmalig C-Bilder ("C-scans") von Betonproben aufnehmen. Diese flächenhaften Darstellungen zeigen Rasterlinien, die im Fehlstellenbereich sowie außerhalb des Probenbereichs unterbrochen sind. Die vollautomatisch durchgeführten Prüfungen wurden mänderrförmiges Abtasten der Probekörper erreicht. Die Prüf-

köpfe hatten einen Abstand von wenigen Millimetern von der Betonoberfläche. Da die Koordinaten über das Zählen von Schrittmotorimpulsen ermittelt wurden, entfällt das zeitaufwendige Anbringen von beidseitigen Rasterpunkten. Diese vollautomatische Prüfung von Bauteilen mit Hilfe des entwickelten quasi-zweiparametrischen Ultraschallprüfverfahrens wurde hier erstmals erfolgreich erprobt.

Mit einer perspektivischen Darstellung der C-Bilder ergab sich die Möglichkeit, zusätzlich die invertierte Ultraschallamplitude in den C-scan einzublenden. Die Fehlstellen zeichnen sich in diesem Fall als "Berge" ab. Der Amplituden-C-scan gibt neben der Fehlerdarstellung ein eindrucksvolles Bild über die Homogenität der Probekörper.

6) Einsatz der Frequenzanalyse

Eine Klassierung der Fehlstellen aus dem Frequenzspektrum allein erscheint nicht möglich, da keine eindeutigen Unterschiede bei verschiedenen Fehlertypen auftraten. Erst bei längeren Schallwegen im Beton erwies sich die Frequenzanalyse als zusätzlicher Parameter, um zwischen fehlerfrei und fehlerhaft unterscheiden zu können, besonders wenn die Amplitudeneinbrüche bei Fehlstellen relativ klein werden.

Bei der Beobachtung des Hydratationsverlaufs wurde erstmals die Frequenzanalyse eingesetzt. Dabei zeigte sich, daß nach dem Anmachen der Zementpaste nur Frequenzen um 30 kHz zu empfangen waren, während mit zunehmender Hydratationszeit das Frequenzband sich zu höheren Frequenzen hin verschob. Nach sieben Stunden lag das Amplitudemaximum bei 190 kHz und weitere Veränderungen im Spektrum traten nicht mehr auf. Eine Klärung, ob das Ende der Verarbeitungsfähigkeit oder eine Trennung der Hydratationsstufen I und II aus dem Frequenzspektrum möglich ist, muß weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben, die über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit, daß sich die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung von Betonbauteilen erst erfolgreich durchführen läßt, wenn die Meßapparatur speziell den besonderen Anforderungen angepaßt wird und die nötigen Optimierungen durchgeführt werden. Wie in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen wurde, ist es u.a. dann möglich, auch vollautomatische, reproduzierbare Prüfungen mit hohem Aussagewert durchzuführen, die bei anderen Werkstoffen schon seit längerer Zeit zum Stand der Technik gehören.

Diese Arbeit sollte deshalb ermutigen, den eingeschlagenen Weg konsequent weiterzuerfolgen, um die nach wie vor unbefriedigende zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen stetig zu verbessern und die noch offenen Probleme zu lösen. Die Industrie, besonders die Meßgerätehersteller, könnte ihrerseits einen Beitrag dazu leisten, indem sie Ultraschallprüfgeräte herstellte, deren Meßelektronik - wie in dieser Arbeit - speziell auf die Erfordernisse der Prüfung von Beton zugeschnitten sind.

10. Verzeichnis der verwendeten Bezeichnungen und Symbole

a	Konstante
A_R, A_S	Verstärkung des Reglers, der Regelstrecke
A_n, B_n, C_n	Amplituden
b, c	Konstanten
d	Dicke des Piezokristalls
d_{11}	piezoelektrischer Modul
d, D	Durchlässigkeitsgang, Durchlässigkeitsfaktor
dB	logarithmisches Spannungsverhältnis $A \text{ (dB)} = 20 \lg (U_1/U_2)$
d_k	Durchmesser der größten stofflichen Inhomogenität
E	Elastizitätsmodul
f, f_0, f_r	Frequenz, Eigenfrequenz, Resonanzfrequenz
F	Fläche
g	Schleifenverstärkung
g_{11}	piezoelektrische Druckkonstante
G	Schubmodul
h_{11}	piezoelektrische Deformationskonstante
I	Flächenträgheitsmoment
J	Intensität
k	Koppelfaktor
n_d	Frequenzkonstante (Piezoplatte)
p	Schalldruck
Q	Güte
r	Radius
r, R	Reflexionsgrad, Reflexionsfaktor
t	Zeit
t_{an}	Anstiegszeit
T	Schwingungsdauer
U, U_e	Spannung, Empfangsspannung
v, v_L, v_T	Schallgeschwindigkeit, longitudinal, transversal
W	Führungsgröße
X, Y, Z	Koordinaten
X	Regelgröße (5. Kap.)
Y	Stellgröße (5. Kap.)
Z	Stellgröße (5. Kap.)
z, z_B	Schallwellenwiderstand, Beton

α	Einfallswinkel (3. Kap.), Schallschwächung
β	Druckfestigkeit
γ	Divergenzwinkel
δ	Dämpfungsfaktor
Δf	Bandbreite
$\Delta \tau$	Pulsbreite
Δx	Auslenkung
λ	Wellenlänge
μ, μ_d	Poissonkonstante, dynamische
ξ	Teilchenausschlag
ρ	Dichte
ω	Kreisfrequenz

10. Literaturverzeichnis

- [1] Krautkrämer, H.,
Krautkrämer, J.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall
4. Auflage, Springer-Verlag Berlin,
Heidelberg, New York 1980
- [2] Bergmann, L.: Der Ultraschall
6. Auflage, Stuttgart, Hirzel 1954
- [3] Matauschek, J.: Einführung in die Ultraschalltechnik
VEB Verlag Technik, Berlin 1961
- [4] Neisecke, J.: Ein dreiparametrisches, komplexes
Ultraschall-Prüfverfahren für die
zerstörungsfreie Materialprüfung
im Bauwesen
Dissertation TU Braunschweig, 1974
- [5] Volkwein, A.: Zerstörungsfreie Prüfung von Natur-
stein durch Ultraschall-Schwächungs-
messungen
Materialprüfung 24, 1982, Nr. 4,
S. 119-124
- [6] Schlengermann, U.: Über die Verwendung der Begriffe
Nahfeld und Fernfeld in der Ultra-
schall-Werkstoffprüfung
Materialprüfung 15, 1973, Nr. 5,
S. 161-166
- [7] Akashi, T.: On the Measurement of Loss in
Ultrasonic Pulse in Concrete
Proc. 2-nd Japan Congress Testing
Materials Kyoto STM, 1959, S. 165-168
- [8] Röthig, H.: Ultraschalldämpfung von Beton
Schriftenreihe der Bauforschung-
Stahlbeton
Deutsche Bauinformation - Berlin 1972
- [9] Sokolow, S.J.: Zur Frage der Fortpflanzung ultra-
akustischer Schwingungen in ver-
schiedenen Körpern, E.N.T. 6
1929, S. 454-461
- [10] Meyer, E.
Buchmann, G.: Über einfache Werkstoffprüfungen
mit magnetostriktiven Ultraschall-
geräten
Akustische Zeitschrift 3, 1938,
S. 132-136
- [11] Meyer, E.
Bock, E.: Hörschall- und Ultraschallunter-
suchungen von Betonbalken mit Rissen
Akustische Zeitschrift 4, 1939,
S. 232-237

- [12] Jones, R.: The application of ultrasonics for the testing of concrete
Research 1, 1948, Nr. 8, S. 383-384
- [13] Jones, R.: Measurement of the Thickness of Concrete Pavements by Dynamic Methods: a Survey of the Difficulties
Magazin of Concrete Research 1, 1949, Nr. 1, S. 31-34
- [14] Jones, R.: Testing the Quality of Concrete in a Thick Wall Concrete and Constructional Engineering 45, 1950, S. 391-394
- [15] Leslie, J.R.
Cheesman, W.J.: An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures
Proceedings of the American Concrete Institute 46, 1949/50, S. 17-36
- [16] Whithehurst, E.A.: Use of the Soniscope for Measuring setting time of concrete
Proceedings of the American Society for Testing Materials 51, 1951, S. 1166-1175 (Philadelphia)
- [17] Eisenmann, K.: Untersuchung der Rißbildung des Betons mit Ultraschall
Beton- und Stahlbetonbau 46, 1951, S. 19
- [18] Eisenmann, K.
Steinkamp, G.: Messung der Tiefen und Weiten von Betonrissen mittels Ultraschall
Beton- und Stahlbetonbau 49, 1954, S. 36-38
- [19] Eisenmann, K.,
Odewald, G.: Untersuchung der elastischen Eigenschaften von Beton mittels Ultraschall
Beton- und Stahlbetonbau 54, 1959, S. 156-158
- [20] Steinkamp, G.: Ultraschallimpulsgeräte für Beton
Dissertation, 1953, TH Braunschweig
- [21] Steinkamp, G.: Ultraschallimpulsgeräte für Beton
Elektronische Rundschau 10, 1956, S. 172-173
- [22] Kordina, K.,
Waubke, N.V.,
Roy, V.: Ultraschallmessungen an "Laboratoriumsbetonen"
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Heft 1 und 2, S. 71-72
- [23] Kordina, K.,
Roy, V.,
Waubke, N.V.: Ultraschallmessungen an bewehrten Kiesbetonen
Materialprüfung 9, 1967, Nr. 3, S. 81-85

- [24] Kordina, K.,
Waubke, N.V.: Prüfung des Zustandes von Beton und Stahlbeton in der Baupraxis mittels Ultraschall
Bericht Az.: II A b V4 -107/66 - des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1968
- [25] Roy, V.: Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen an Beton
Dissertation TU Braunschweig, 1967
- [26] Waubke, N.V.: Versuche zur Überwachung der Zementsteinhydratation mittels Ultraschall
Tonindustrie-Zeitung 92, 1968, S. 11-14 und Mitteilungsblatt für die Amtliche Materialprüfung in Niedersachsen 6/7, 1966/67, S. 27-30
- [27] Waubke, N.V.: Versuche zur Überwachung von Erhärtungsvorgängen bei hydraulischen Baustoffen mittels Ultraschall
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik für Beton und Stahlbeton", 23.-25.04.1969, Leipzig, S. 81
- [28] Rehm, G.,
Waubke, N.V.,
Neisecke, J.: Ultraschall-Untersuchungsmethoden in der Baupraxis-Literatursichtung.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 84, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin-München-Düsseldorf 1973.
- [29] Neisecke, J.,
Waubke, N.V.: Homogenitätskontrolle und Fehlstellennachweis an Bauteilen mittels Ultraschall
Mitteilungsblatt für amtliche Materialprüfung in Niedersachsen 12/13, S. 24-27, 1972/73
- [30] Neisecke, J.: Ultraschall-Impulstechnik für Bauteile
Bericht zu den vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau geförderten Forschungsaufträgen II A 6-800167-12, 16-800171-15 und B I 5-800173-30
TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen
- [31] Dalta, M.R.,
Anand, G.: Nondistructive Concrete Analyses
Student's Journal, Inst. Electron. u. Telecomm. Eng. Vol. 20, No. 3, 1979

- [32] Malhotra, V.M.: Testing hardened concrete: nondestructive methods
American Concrete Institute Monograph Series, ACI Monograph No. 9, 1976, Kap. 5
- [33] Jones, R.
Facaoaru, I.: Recommendations for Testing Concrete by the Ultrasonic Pulse Method
Report for the RILEM Working Group for Nondestructive Testing Meeting, Varna 1968
- [34] Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1969
- [35] Röthig, H.: Zuverlässigere Festigkeitsprüfung mit Ultraschall durch verbesserte Auswertung
Materialprüfung 20, 1978, Nr. 6, S. 225-229
- [36] Seifert, H.,
Machts, H.: Zerstörungsfreie Prüfung von Feuerbetonen
Baustoffindustrie 21, 1978, Nr. 4, S. 9-12
- [37] Wassmann, H.: Results of nondistructive testing methods by use of ultrasonic - in connection with small drill cores
Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig, 1979, Nr. 11, S. 61-66
- [38] Borjān, J.: Compressive strength estimation of concrete based on different characteristics
Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig, 1979, Nr. 10, S. 7-12
- [39] Bungey, J.H.: The validity of ultrasonic pulse velocity testing of in place concrete for strength
NDT International 13, 1980, Nr. 6, S. 296-300
- [40] Khilji, Z.M.,
Mian, Z.: In service application of non-destructive testing to concrete structures
Ninth World Conference on Non-Destructive Testing 19.-23. Nov. 79, Melbourne, Paper 5 A-DD1, 1979

- [41] Mahmood, K.,
Khalifa, S.: Non destructive testing of concrete
in Pakistan
Ninth World Conference on Non-
Destructive Testing, 19.-23. Nov. 79,
Melbourne, Paper 5 A-1, 1979
- [42] Röthig, H.: Bessere Voraussetzungen für die
Qualitätskontrolle von Betonfertig-
teilen mit Ultraschall
Wissenschaftliche Berichte der
Technischen Hochschule Leipzig, 1979,
Nr. 14, S. 23-28
- [43] Brunarski, L.: Non-Destructive Methods of Testing
Concrete Draft instructions on the
application of sclerometric, ultrasonic
and resonance methode
Paper prepared for the conference of
the RILEM Working Group to be held
in Bucarest, September 1964,
Warschau 1964
- [44] Facaoaru, I.,
Dumitrescu, J.,
Stamate, Gh.: New Developments and Experience in
Applying Combined
Non-destructive Methods for Testing
Concrete Report for the RILEM Working
Group for Nondestructive Testing
Meeting, Varna 1968, Bucarest, 1968
- [45] Horn, W.: Betrachtungen zur komplexen zer-
störungsfreien Prüfung von Beton
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie
Prüf- und Meßtechnik für Beton und
Stahlbeton", Leipzig, 23.-25.4.69,
S. 85
- [46] Jones, R.,
Facaoaru, I.: An Analysis of Answers to a
Questionnaire on the Ultrasonic
Pulse Technique
Matérioux et Constructions, 1968,
Heft 5, S. 457-465
- [47] Pohl, E.: Überblick über die modernen zerstö-
rungsfreien Prüfverfahren von Beton
und Abgrenzung ihrer Anwendungsgebiete
Wissenschaftliche Zeitschrift der
Hochschule für Bauwesen Leipzig 9,
1963, S. 137-148, Sonderdruck
- [48] Pohl, E.: Kombination der Ultraschall- und der
Drehmomentmethode zur Bestimmung der
Druckfestigkeit und der Homogenität
von verarbeitetem Beton
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie
Prüf- und Meßtechnik für Beton und
Stahlbeton", 23.-25.4.1969, Leipzig,
S. 93

- [49] Skramtajev, B.G.,
Lesčinsky, M.J.: Größere Genauigkeit bei der Bestimmung der Betonfestigkeit in Konstruktionen und Bauwerken durch Anwendung komplexer Methoden und Geräte
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Nr. 1 und 2, S. 81
- [50] Wesche, K.H.: Die Prüfung der Betonfestigkeit im Bauwerk
Betonstein-Zeitung, 1967, Heft 6, S. 267-277
- [51] Wiebenga, J.G.: A Comparison between Various Combined Non-Destructive Testing Methods, to Derive the compressive Strength of Concrete
TNO-Report Nr. Bi-68-61/1 H. 1.8, Delft, August 1968
- [52] Reynolds, W.N.,
Wilkinson, S.J.: The non-destructive physical analysis of concrete
British Journal of Non-Destructive Testing, 21, 1979, Nr. 1, S. 35-38
- [53] Galan, A.: Modell der statistischen Verteilung der Druckfestigkeit des Betons - ermittelt nach der Ultraschall- und Rückprallmethode - und ihr Einfluß auf die Beurteilung der Betonqualität
Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig, 1979, Nr. 10, S. 13-23
- [54] Dobbert, W.: Komplexe Bestimmung mechanischer und elastischer Stoffkennwerte von Beton
Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig, 1979, Nr. 10, S. 59-64
- [55] Müller, K.F.: Wirtschaftliche Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung am Beispiel einer vor 50 Jahren erbauten Stahlbetonbrücke
Materialprüfung 22, 1980, Nr. 7, S. 286-287
- [56] Mellmann, G.: Zur Abschätzung der Druckfestigkeit von Beton mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren.
12. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, März 1981, S. 71-80
- [57] Mellmann, G.: Zerstörungsfreie Untersuchung von Beton
Materialprüfung 22, 1980, Nr. 5, S. 208-210

- [58] Bellander, U.: Concrete strength in finished structure (Part 1-3)
Cement och beton institutet
Stockholm, 1976/77
- [59] Leers., K.-J.: Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit mechanischen Schwingungen und ihre Anwendung bei Werkstoffen der Steine und Erden-Industrie
Habilitationsschrift TU Clausthal, 1969
- [60] Hönig, A., Zapletal, V.: Ultraschall- und radiometrische Rohdichtemessung von Strahlenschutzbeton
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Heft 1 und 2, S. 23
- [61] Marko, P.: Eine Möglichkeit zur Anwendung der Impuls-Ultraschall-Methode in der Baupraxis
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Heft 1 und 2, S. 51
- [62] Gensel, J.: Einfluß der Stahlbewehrung und der Feuchtigkeit auf die Geschwindigkeit von Ultraschall-Impulsen in Beton
Bauezeiten 19, 1965, Nr. 9, S. 464-467
- [63] Gensel, J.: Einfluß der Bewehrungsdichte und der Feuchtigkeit auf die Geschwindigkeit von Ultraschall-Impulsen in Beton.
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Heft 1 und 2, S. 61
- [64] Jones, R., Wright, P.J.F.: Some Problems Involved in Destructive and Non-Destructive Testing of Concrete
Roads and Road Construction 32, 1954, S. 249-251
- [65] Vadász, J.: Korrektur der Meßwerte bei den zerstörungsfrei ermittelten Betonfestigkeiten
Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 17, 1968, Heft 6 (B) - Reihe 63, S. 1615
- [66] Dawance, G.: Principe Méthode et Appareillage de Mesure Annales Institut Technique du Batiment et des Traveaux, Publics 140, Paris 1950

- [67] Facaocar, I.,
Stamate, CH.: On the Relation between some Static and Dynamic Constants of Concrete Report for the RILEM Working Group for Nondestructive Testing Meeting, Varna 1968, Bucarest 1968
- [68] Kaplan, M.F.: Ultrasonic Pulse Velocity, Dynamic Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio and the Strength of Concrete made with Thirteen Different Coarse Aggregates
RILEM Bulletin, 1959, Nr. 1, S. 58-73
- [69] Morscichin, W.N.: Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Beton mit der Schallimpulsmethode Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik für Beton und Stahlbeton", 23.-25.4.1969, Leipzig, S. 45
- [70] Pohl, E.: Prüfung von Beton mit nieder- und hochfrequenten mechanischen Schwingungen
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1962, Heft 1, S. 19-64
- [71] Rentsch, W.,
Krompholz, G.: Die Bestimmung der Poisson'schen Zahl durch Schallgeschwindigkeitsmessungen
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig 9 1963, S. 177-181 (Sonderdruck)
- [72] Wesche, K.G.: Möglichkeiten für die Anwendung von Ultraschall bei der Betonprüfung
Bautechnik 32, 1955, Nr. 5, S. 151-155
- [73] Whitehurst, E.A.: Dynamic Tests
Special Technical Publication of the American Society for Testing Materials 169-A-1966 (Philadelphia)
- [74] Avram, C.,
Voina, N.,
Friedrich, R.: Untersuchung der Verfestigung des einfach und wiederholt gerüttelten Zementsteins und Betons mit zerstörungsfreien Verfahren
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 13 1967, Heft 5, S. 95
- [75] Dohnalik, M.,
Leskie, E.,
Flaga, K.: Ultraschalluntersuchung des Erstarrungsprozesses von Zement
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik für Beton und Stahlbeton", Leipzig, 23.-25.4.1969, S. 35

- [76] Gemesi, J.: Messung mit Ultraschall zur Feststellung der optimalen Bedampfungszeit von Beton
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 13, 1967, Heft 5, S. 99
- [77] Nepper-Christensen, P.: Measurements of Ultrasonic Pulse Velocity in Green Concrete
Highway Research No. 1, Part I, 1968, S. 451 (Abstract)
- [78] Winden, N.G.B. van der Brand, A.W.: Ultrasonic testing for fresh mixes
Concrete 11, 1977, Nr. 12, S. 25-28
- [79] Sutherland, H.J.: Acoustic wave measurements on reactor-grade concretes
Transactions of the 4th Internat' l Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, San Francisco, Calif., 15-19.8.1977, S. 1-10
- [80] Ebering, R.: Zur Ortung von Hohlräumen an Betonbrücken
Deutsche Eisenbahntechnik 10, 1962, Nr. 12, S. 562-565
- [81] Facoaru, I.: Ultraschallprüfung von Beton in der rumänischen Baupraxis
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Heft 1/2, S. 19-22
- [82] Hütter, A.: Methoden zur Prüfung des Betons mit Ultraschall
Bauplanung - Bautechnik 9, 1955, S. 383-389
- [83] Jones, R., Gatfield, E.N.: Testing Concrete by an Ultrasonic Pulse Technique
Road Research Technical Paper 34 1955, S. 1-48, London
- [84] Malhotra, V.M.: Nondestructive Methods for Testing Concrete
Department of Energy, Mines and Resources
Ottawa-Mines Branch Monograph 875
- [85] Weigler, H., Kern, E.: Über die Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschallverfahrens zur Beurteilung der Betongüte
Betonstein-Zeitung 31, 1965, Heft 5, S. 279-286
- [86] Whitehurst, E.A.: Evaluation of Concrete Properties from Sonic Tests
Monograph of the American Concrete Institute (ACI), Series 2, 1966

- [87] Chung, H.W.: An appraisal of the ultrasonic pulse technique for detecting voids in concrete
Concrete 12, 1978, Nr. 11, S. 25-28
- [88] Pohl, E.: Quality Control in buildings by means of non destructive test procedures
International Symposium on Testing in Situ of Concrete Structures, 12.-16.9.1977, Budapest
- [89] Thornton, H.T.: Development of procedures for non-destructive testing of concrete structures
Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Rept. No.WES-MP-C-77-11-1 (AD-A046 113), 1977.
- [90] Beshai, Z.A.: Untersuchung der Strukturänderung des auf Druck beanspruchten Leichtbetons mittels Ultraschall
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik für Beton und Stahlbeton", Leipzig 23.-25.4.1969, S. 19
- [91] Galan, A.: Die Bildung und Verbreitung von Mikrorissen im Beton bei mittiger Druck- und Zugbeanspruchung
Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 17 1968, Heft 6 (B) - Reihe 63, S. 1526
- [92] Jones, R.: The Elasticity and Rupture of Concrete and Stone at Constant Rates of Loading
Nature 165, 1950, Nr. 4184, S. 39-40
- [93] Jones, R.: A Method of Studying the Formation of Cracks in a Material Subjected to Stress
British Journal of Applied Physics 3 1952, Nr. 7
- [94] Jones, R.: The Effect of Coarse Aggregate on the Mode of Failure of Concrete in Compression and Flexure
Magazin of Concrete Research 9 1957, Nr. 26, S. 89-94
- [95] RILEM: Ergebnisse einer Tagung der RILEM Working Group on the Non-Destructive Testing of Concrete, 26.-28.4.66 in Aachen
RILEM Bulletin, 1966, Nr. 33, 367-369
- [96] Rüsçh, N.: Der Einfluß der Deformationseigenschaften des Betons auf den Spannungsverlauf
..... 20/05/2016

- [97] Wenzel, K.: Über die Möglichkeiten einer Betonuntersuchung mittels Ultraschall
Dissertation TH Braunschweig, 1950
- [98] König, P.: Bestimmung der Festigkeitsverteilung mit Ultraschall bei in Batterieformen gefertigten Betonplatten
Baustoffindustrie 18, 1975, Nr. 4, S. 24-26
- [99] Ciganek, M.: Prüfung großer Bauwerke bzw. Bauteile mittels Ultraschall
Zement und Beton, 1963, Nr. 27, Wien
- [100] Ciganek, M., Sedlak, J.: Statistische Veränderlichkeit der Betongüte bei fertiggestellten Bauten nach den Meßergebnissen mittels Ultraschallverfahren
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1963, S. 149-162
- [101] Cyganek, M.: Prüfungen großer Bauwerke bzw. Bauteile durch Ultraschall-Messungen
Die Bauwirtschaft, 1964, Heft 21-22
- [102] Kuda, R., Sedlak, I., Ciganek, M.: Einfluß des Herstellungsvorganges auf die Homogenität tragender Großplatten, überprüft mit Ultraschall
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Heft 1 und 2, S. 13
- [103] Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüfung von Strahlenschutzwänden im VEB-Atomkraftwerk I mit Ultraschall
Bauplanung - Bautechnik 16, 1962, Nr. 9, S. 446-448
- [104] Pohl, E.: Prüfung von Betonbauteilen mit Ultraschall, Arbeitsanweisung für die Baupraxis
Baustoffindustrie, 1964, Nr. 11, S. 333-337, und Nr. 12, S. 374-376
- [105] Pohl, E.: Bedeutung und Anwendungsbereiche der zerstörungsfreien Prüfmethode für Beton in der Baupraxis
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1966, Heft 1 und 2, S. 7

- [106] Wesche, K.H.: Betonprüfung mit Hilfe von Ultraschall
Beton- und Stahlbetonbau 48, 1955, Nr. 5, S. 116-119
- [107] Paquet, J.
Briard, M.: Contrôle non destructif des piens en béton
Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (Frankreich) 29, 1976, Nr. 337, S. 50-80
- [108] Walter, J.
Sletten, R.: Underwater inspection of offshore structures
Eighth World Conference on Nondestructive Testing, Cannes 1976, Paper 5A1
- [109] Vold, R.C.
Hope, B.R.: Ultrasonic testing of deep concrete foundations
British Journal of Non-Destructive Testing 20 (1978), Nr. 5, S. 232-241
- [110] Misonow, A.W.: Homogenitätskontrolle von Außenwandelementen aus Leichtbeton
Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Leipzig 3 1979, Nr. 4, S. 197-205
- [111] Becker, S.: Der Einsatz der Ultraschallmeßmethode in Betonsperrmauern
Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig 1975, Nr. 11, S. 35-40
- [112] Busby, R.F.: Underwater inspection / testing / monitoring of offshore structures
Ocean Engineering 6, 1979, Nr. 4, S. 355-491
- [113] Dobbert, W.: Prüftechnische Neuerungen bei Zustandsuntersuchungen an Betonbauwerken über und unter Wasser
Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig, 1979, Nr. 12, S. 3-7
- [114] Mühlhäuser, O.: Verfahren zur Zustandsbestimmung von Werkstoffen, besonders zur Ermittlung von Fehlern darin
DRP 569 598, 1931
- [115] Shnyrev, P.D.: Problems in the method of preparing piezotransducers for the UF-90 PTs Instrument
Soviet Journal of Nondestructive Testing 13, 1977, Nr. 5, S. 587-588

- [116] Facaoaru, I.
Teodoru, G.
Bubulac, L.:
R cherches sur l'Utilisation des
M surages d'Atténuation des Ultrasons
pour la Détermination de la
Résistance du B ton
Rapport présenté à la Session du
Groupe de Travail RILEM pour
l'Essai Non-d structif,
Bucarest 1964
- [117] Facaoaru, I.
Dumitrescu, J.
Constantinescu, L.:
Concrete Strength Determination
by Non-Destructive Combined
Methods
Report for the RILEM Working
Group for Non-Destructive Testing
Meeting, Aachen 1966, Bucarest
1966
- [118] Galan, A.:
Prüfung elastischer und nicht
elastischer Eigenschaften von
Beton mit Hilfe von Ultraschall-
Impulsen
Wissenschaftliche Zeitschrift
der Hochschule für Bauwesen
Leipzig, 1966, Heft 1/2, S. 55
- [119] Röthig, H.:
Meßtechnische Probleme bei der
Dämpfungsmessung an Beton
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie
Prüf- und Meßtechnik für Beton
und Stahlbeton", 23.-25.4.1969,
Leipzig, S. 115
- [120] Volkwein, A.:
Untersuchung über die Beziehung
zwischen Ultraschallschw chung
und Festigkeit von Naturstein
Abschlußbericht über den For-
schungsauftrag (Az.: B I 5-800-
178-39), 1980
Inst. für Bauingenieurwesen II,
Lehrstuhl für Baustoffkunde und
Werkstoffprüfung und Pr famt für
Bituminöse Baustoffe und Kunst-
stoffe der TU München
- [121] Mailer, H.:
Pavement thickness measurement
using ultrasonic testing.
Highway Res. Rec. 378, 1972, 20-28
- [122] Hölzer, E.
Holewarth, H.:
Pulstechnik, Bd. 1 Grundlagen
2. Auflage Springer-Verlag, Berlin,
Heidelberg New-York, 1982
- [123] Nabel, E.:
Bewertung von Echoanzeigen durch
Ultraschall-Impulsspektroskopie
nach Amplitude und Phase
Materialprüfung 19, 1977, Nr. 2
- [124] Lloyd, E.A.:
Wide-Band Ultrasonic Techniques
Symp. Fut. Ultrasonic Spectroscopy,
London, 1970, Paper 2

- [125] Gericke, O.R.: Theory and NDT Application of ultrasonic Pulse-Echo-Spectroscopy Symp. Fut. Ultrasonic Spectroscopy, London, 1970, Paper 1
- [126] Vorobjew, V.A.
Gorškov, V.A.
Kaledin, A.N.
Syrkov, V.B.: Möglichkeit der Schätzung des Spannungszustandes in Beton mit der Ultraschallspektroskopie Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig, 1979 Nr. 14, S. 47-50
- [127] Malson, W.P.: Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics New York: Van Nostrand (1950)
- [128] Tietze, U.,
Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1978
- [129] Elvery, R.H.: Development in the measurement of ultrasonic pulse velocity in concrete 7 th Internat. Conf. Nondistr. Testin Warsaw, 1973, Vortrag I - 17
- [130] Crostack, H.-A.: Beitrag zur Verbesserung der Ultraschallprüfung beim Ermitteln von Fehlern in schwer prüfbareren Werkstücken. Habilitationsschrift Univ. Dortmund, 1978
- 131) Crostack, H.-A.:
Deutsch, V.,
Steffens, H.-D.,
Stelling, H.A.,
Voigt, M. Ultraschallprüfung mit Sendeimpulsen stufenlos veränderlicher Frequenz und steuerbarer Spektralverteilung
Materialprüfung 20 (1978), Nr. 10, S. 372/377
- [132] Steffens, H.-D.: Untersuchungen zur Steuerung von Ultraschallimpulsen und ihr Einsatz in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Europ. Tagung "Zerstörungsfreie Materialprüfung", 24.-26. April 1978, Mainz
- 133) Deutsch, V.,
Vogt, M.: Verbesserte Lösung verschiedener Ultraschall-Prüfprobleme durch Wahl eines optimalen Sendespektrums. Europ. Tagung "Zerstörungsfreie Materialprüfung", 24.-26. April 1978, Mainz
- 134) Stelling, H.-A.,
Crostack, H.-A.: Untersuchungen zur Optimierung der Ultraschallprüfung von Gußeisenwerkstoffen. Europ. Tagung "Zerstörungsfreie Materialprüfung", 24.-26. April 1978, Mainz
- 135 Hillger, W.: Ultraschallprüfung von CFK-Laminaten Vortrag I-20. 2. Europ. Tagung für zerstörungsfreie Prüfung, Wi@0/05/2016

- [136] Kadlecek, V.,
Dohnálek, I.: Zur Frage der Ultraschalldispersion
in Beton
Wissenschaftl. Berichte der Techni-
schen Hochschule Leipzig 1979, Nr. 10,
Seite 43-51
- [137] Wischers, G.
Locher, F.: Beiträge im Zementtaschenbuch,
neueste Ausgabe, Herausgeber:
Verein deutscher Zementfabrikanten
Bauverlag 1976

In der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, die im Selbstverlag herausgegeben wird, sind bisher erschienen:

- Heft 1: Über das Verdunstungsverhalten und den Nachweis öligler Holzschutzmittel. (1962)
von Rolf Deters -vergriffen-
- Heft 2: Das Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff. (1963)
von Karl Kordina -vergriffen-
- Heft 3: Zur Stabilitätsfrage des Zweigelenkbogens mit biegeweichem Zugband und schlaffen Hängestangen. (1963)
von Josef Eibl -vergriffen-
- Heft 4: Ein Verfahren zur Bestimmung des Vorspannverlustes infolge Schlupf in der Verankerung. Zur Frage der Temperaturbeanspruchung von kreiszylindrischen Stahlbetonsilos. (1964)
von Karl Kordina und Josef Eibl
- Heft 5: Über den Schalungsdruck von Frischbeton. (1964)
von Helmut Ertingshausen
- Heft 6: Transportphänomene in Betonporen. (1966)
von Nils Valerian Waubke
- Heft 7: Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. (1967)
von Herbert Ehm -vergriffen-
- Heft 8: Möglichkeiten der Bestimmung der kritischen Last von Stab- und Flächentragwerken mit Hilfe ihrer Eigenfrequenz. (1967)
von Joachim Steinert -vergriffen-
- Heft 9: Untersuchungen an dämmschichtbildenden Feuerschutzmitteln. (1967)
von Axel Lämmke -vergriffen-
- Heft 10: Beitrag zur Frage der Kippstabilität aufgehängter Balkenträger und gerader, flächenartiger Träger. (1968)
von Kamal Fouad Rafla -vergriffen-
- Heft 11: Die Traglast von offenen, kreisförmigen Stahlbetonquerschnitten - Brazier-Effekt -. (1968)
von György Iványi -vergriffen-
- Heft 12: Brandverhalten verschiedener Bauplatten aus Baustoffen der Klassen A und B, insbesondere aus Baustoffen der Klasse A 2. (1969)
von Claus Meyer-Ottens -vergriffen-

- Heft 13: Zum Tragverhalten von kreisförmigen Doppelsilos unter Berücksichtigung der Eigensteifigkeit des Füllgutes. (1969)
von Günther Fuchs -vergriffen-
- Heft 14: Wände aus Holz und Holzwerkstoffen unter Feueranriff. (1970)
von Claus Meyer-Ottens -vergriffen-
- Heft 15: Beurteilung von Bauwerksfestigkeiten an Hand von Betongütewürfeln und -bohrproben. (1970)
von Ralf Lewandowski -vergriffen-
- Heft 16: Untersuchungen zur Frage der Rissesicherung von leichten Trennwänden aus Gips-Wandbauplatten. (1970)
von Fritz Joachim Neubauer -vergriffen-
- Heft 17: Brandverhalten von Bauteilen aus dampfgehärtetem Gasbeton. (1970)
von Claus Meyer-Ottens und Karl Kordina
- Heft 18: Die Stahlblech-Holz-Nagelverbindung und ihre Anwendung - Grundlagen und Bemessungsvorschläge -. (1971)
von Wilfried Bödeker
- Heft 19: Bauaufsichtliche Brandschutzvorschriften - Beispiele für ihre Erfüllung bei Wänden, Brandwänden und Decken -. (1971)
von Claus Meyer-Ottens -vergriffen-
- Heft 20: Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenpfeilern mit Rollenlagern. (1972)
von Kurt Liermann
- Heft 21: Zum Trag- und Verformungsverhalten ebener Stockwerksrahmen aus Stahlbeton. (1972)
von Béla Jankó
- Heft 22: Zur Frage des Spannungsrißkorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in Nitratlösungen unter Berücksichtigung praxisnaher Verhältnisse. (1972)
von Ulf Nürnberger
- Heft 23: Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. (1972)
von Claus Meyer-Ottens -vergriffen-
- Heft 24: Über die Steinkohlenflugasche und ihre Wirkung auf die Eigenschaften von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge im frischen und festen Zustand. (1973)
von Hassan Taha El-Arousy
- Heft 25: Mechanismen der Spannungskorrosion von Spannstählen im Hinblick auf ihr Verhalten in Spannbetonkonstruktionen. (1973)

- Heft 26: Beitrag zur rechnerischen Ermittlung von Zwangsschnittgrößen unter Berücksichtigung des wirklichen Verformungsverhaltens des Stahlbetons. (1974)
von Eckhard Tennstedt
- Heft 27: Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen. (1973)
von Ulrich Schneider -vergriffen-
- Heft 28: Ein dreiparametrisches, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen. (1974)
von Jürgen Weisecke
- Heft 29: Traglastermittlung an Stahlbeton-Druckgliedern. (1974)
von Karl Kordina, Peter Maack und Olaf Hjorth
- Heft 30: Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit von Randbalken bei Stahlbetondecken. (1974)
von Josef Eibl und György Iványi -vergriffen-
- Heft 31: Stabilitätsnachweise von Rahmensystemen im Stahlbetonbau. (1974)
von Karl Kordina und Béla Jankó
- Heft 32: Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des hohen Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. (1976)
von Olaf Hjorth
- Heft 33: Traglastberechnung instationär thermisch belasteter Stahlbetondruckglieder mittels zwei- und dreidimensionaler Diskretisierung. (1976)
von Wolfram Klingsch -vergriffen-
- Heft 34: Thermische Zerstörung natürlicher Zuschlagstoffe im Beton. (1977)
von Farid Djamouh -vergriffen-
- Heft 35: Zur Frage des Trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen im Brandfall. (1977)
von Ataman Haksever -vergriffen-
- Heft 36: Ein Beitrag zur Traglastermittlung von vierseitig gelagerten Stahlbetonwänden. (1977)
von Karl-Heinz Storkebaum
- Heft 37: Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall. (1977)
von Rolf Bechtold
- Heft 38: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesbeton aus dem Wassereindringverhalten. (1978)
von Joachim Steinert
- Heft 39: Ein haufwerkstheoretisches Modell der Restfestigkeit geschädigter Betone. (1978)
von Rolf Weis

- Heft 40: Zum Schwingkriechen von Beton. (1978)
von Willi Alda
- Heft 41: Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton-
und Spannbetonbalken mit rechteckigem Querschnitt
unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung,
Querkraft und Torsion. (1979)
von Manfred Teutsch
- Heft 42: Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Rela-
xation von Beton unter hohen Temperaturen.
(1979)
von Ulrich Schneider -vergriffen-
- Heft 43: Veröffentlichungen 1967 - 1979.
- Heft 44: Druckmessungen in Silozellen mit einer neu ent-
wickelten Sonde. (1979)
von Karl Kordina und Helmut Fröning
- Heft 45: Ein Beitrag zur Zuverlässigkeit frei gelagerter
Stahlbetonstützen unter genormter Brandeinwirk-
ung. (1980)
von Volker Henke -vergriffen-
- Heft 46: Wärmebilanzrechnungen für Brandräume mit unter-
schiedlichen Randbedingungen (Teil I). (1981)
von Ulrich Schneider und Aysen Haksever
-vergriffen-
- Heft 47: Partiiell brandbeanspruchte Stahlbetondecken - Be-
rechnung des inneren Zwanges mit einem Scheiben-
modell -. (1981)
von Robert Walter
- Heft 48: Zum Verformungsverhalten gerissener Stahlbeton-
balken unter Einschluß der Mitwirkung des Betons
auf Zug in Abhängigkeit von Last und Zeit.
(1981)
von Björn Svensvik
- Heft 49: Veröffentlichungen 1967 - 1981.
- Heft 50: Die Steifigkeit und das Verformungsverhalten von
Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter kombinier-
ter Beanspruchung aus Torsion, Biegemoment, Quer-
kraft und Axialkraft. (1982)
von Surendra K. Ojha
- Heft 51: Zusammenstellung und Anwendung Bayes'scher Ver-
fahren bei der Stichprobenbeurteilung. (1982)
von Volker Henke
- Heft 52: Stahlbetonstützen mit Rechteckquerschnitten bei
natürlichen Bränden. (1982)
von Ataman Hakasever
- Heft 53: Untersuchung des Riß- und Verformungsverhaltens
segmentärer Spannbetonbauteile. (1982)
von Viggo Weber

- Heft 54: Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Baustahl und Beton - Geklebte Bewehrung -. (1982)
von Ernst-Holger Ranisch
- Heft 55: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton. (1982)
von Günter Wiedemann
- Heft 56: Ein geometrisch und physikalisch nichtlineares Rechenmodell zur optimalen Biegebemessung ebener Stahlbetonrahmen. (1982)
von Reiner Timm
- Heft 57: Untersuchungen über den Verbund zwischen Stahl und Beton bei hohen Temperaturen. (1983)
von Ulrich Diederichs
- Heft 58: Wärmebilanzrechnungen in Verbindung mit Versuchen in Brandräumen (Teil II). (1983)
von Ulrich Schneider
- Heft 59: Wärmebilanzrechnungen in Brandräumen unter Berücksichtigung der Mehrzonenmodellbildung (Teil III). (1983)
von Reinhold Dobbernack und Ulrich Schneider