

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG**

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen
Direktor: Prof. Dr.-Ing. K. Kordina

**Ein dreiparametriges, komplexes
Ultraschall-Prüfverfahren für die
zerstörungsfreie Materialprüfung
im Bauwesen**

von
Jürgen Neisecke



HEFT 28

BRAUNSCHWEIG

OKTOBER 1974

z. F. R +

DK: 620.179.16
691:620.1

Vorwort

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurden in den Jahren 1971 - 1973 im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt.

Mein Dank gilt daher den Herren Professoren Dr.-Ing. K. Kordina und Dr.-Ing. G. Rehm für die in jeder Hinsicht großzügig gewährte Möglichkeit, die Einrichtungen des von ihnen geleiteten Institutes zur Durchführung der Untersuchungen zu nutzen.

Die Arbeit baut auf Untersuchungen auf, die im Auftrage des Bundesministers für Raumordnung, Städtebau und Wohnungswesen durchgeführt wurden. An dieser Stelle sei daher der fördernden Institution nochmals gedankt.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Professoren Dr.-Ing. G. Rehm und Dr.-Ing. N.V. Waubke für zahlreiche Anregungen, die Betreuung der Arbeit und für die ausführliche wissenschaftliche Diskussion der Untersuchungsergebnisse.

Den Kollegen und Mitarbeitern der Abteilung Physik der Baustoffe und des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau danke ich für die sorgfältige Durchführung der Messungen und für die jederzeit gute Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Problemstellung	2
3. Theoretische Grundlagen und Stand der Technik	4
3.1 Historischer Rückblick	4
3.2 Prinzip einer zerstörungsfreien Schallprüfung von Bauteilen	5
3.3 Schallausbreitung in Baustoffen	6
3.4 Prüfverfahren, Anwendungsmöglichkeiten und Geräte	12
4. Schaffung gerätetechnischer und prüftechnischer Voraussetzungen für ein komplexes Ultraschall Prüfverfahren	23
4.1 Entwicklung und Bau von Transversalwellenwandlern für die Baustoffprüfung	23
4.1.1 Der piezoelektrische Effekt	23
4.1.2 Elektroakustische Wandler aus piezoelektrischer Keramik	25
4.1.3 Bau und Optimierung eines Transversalwandlers für baupraktische Anwendungen	29
4.1.4 Prüfung des entwickelten Transversalwandlers auf seine baupraktische Anwendbarkeit	32
4.1.4.1 Meßgenauigkeit beim Einsatz von Transversalwandlern	37
4.1.4.2 Einfluß der Prüffrequenz auf die Erkennbarkeit des Transversalimpulseeinsatzes und Auswahl der Frequenz	40
4.1.4.3 Einfluß der Ankopplung auf die Erkennbarkeit des Transversalimpulseeinsatzes und Auswahl der Koppelmittel	42
4.2 Ankopplungsverfahren für eine reproduzierbare Intensitätsmessung	45
4.2.1 Intensitätsverlust in Bauteilen aus Beton und seine Ursachen	45
4.2.2 Ankopplungsverfahren und Auswahl von Ankopplungsmedien für eine reproduzierbare Schallübertragung	49
4.2.3 Auswahl von Prüffrequenz und Meßverfahren	52
4.2.4 Entwicklung eines Ultraschall Prüfkopfes für flüssige Koppelmittel zur Intensitätsmessung an Betonbauteilen	55
4.3 Auswahl und Beurteilung der Ultraschall Meßparameter für zerstörungsfreie, komplexe Prüfverfahren	58
5. Überprüfung der baupraktischen Anwendbarkeit des vorgeschlagenen drei parametrischen Ultraschall Prüfverfahrens	59
5.1 Beobachtung des Hydratationsverlaufs hydraulischer Bindemittel	60
5.2 Ultraschallmessungen am erhärteten Beton	70
5.2.1 Messung der dynamischen Elastizitätskonstanten von Beton	70
5.2.2 Nachweis von Verdichtungsfehlern und Rezepturänderungen	75

	Seite
5.2.2.1 Fehlerhafte Frischbetonverdichtung	75
5.2.2.2 Herabgesetzte Zementmenge.	77
5.2.2.3 Veränderungen am Zuschlag	78
5.2.2.4 Hinweise für eine Kontrolle von Serienbauteilen . .	80
5.2.3 Nachweis von Hohlräumen und Rißflächen	81
5.3 Beobachtung des Entstehens und der Weiterentwicklung von Mikro- rissen bei einachsiger Druckbelastung	87
6. Zusammenfassung	93
7. Ausblick	98
8. Verzeichnis der verwendeten Bezeichnungen und Symbole	100
9. Literaturverzeichnis	101

1. Einleitung

Im Gegensatz zum Stahl- oder Maschinenbau, wo zerstörungsfreie Prüfverfahren - besonders unter Einsatz von energiereicher Strahlen oder Ultraschall - eine stürmische Aufwärtsentwicklung erfahren haben und inzwischen eine sichere und wirtschaftliche Werkstoffprüfung und Produktionskontrolle ermöglichen, können für das Bauwesen bisher keine - hinsichtlich Leistung und Aussagekraft - vergleichbaren zerstörungsfreien Prüfverfahren angegeben werden. Daher müssen auch die Werkstoffeigenschaften und -fehler von Beton und Stahlbeton zur Zeit noch nahezu ausnahmslos zerstörend ermittelt werden.

Die ersten Versuche, Stahlbetonbauteile zerstörungsfrei mit Ultraschall zu prüfen, liegen bereits vierzig Jahre zurück. Obwohl derartige Bemühungen dann in allen großen Industrienationen seit etwa 1950 erheblich verstärkt wurden, haben zerstörungsfreie Ultraschall-Prüfverfahren für den Baustoff Beton, abgesehen von vielfältigen labormäßigen Einsätzen, in der Baupraxis bisher nur geringfügig an Bedeutung zugenommen. Als eine Ursache dafür muß die im Vergleich zu den Metallen durch die Werkstoffstruktur bedingte völlig andersartige Impulsausbreitung im Beton angesehen werden, die auch bisher verhindert, daß Verfahren und Geräte zur Ultraschall-Prüfung von Metallen - wie z. B. die so erfolgreiche Echo-Impulstechnik - auf die Betonprüfung übertragen werden können. Ein weiterer und sehr wesentlicher Grund für die geringe Verbreitung der Ultraschall-Prüfverfahren im Bauwesen muß aber auch in ihrer verfahrenstechnischen Beschränkung auf nur eine Ultraschall-Meßgröße gesucht werden. Dadurch lag die Aussagesicherheit in den meisten Anwendungsfällen unter den von der Baupraxis gestellten Anforderungen.

Die Bemühungen, zerstörungsfreie Ultraschall-Prüfverfahren für die Baupraxis zu entwickeln, sind jedoch besonders deswegen nie aufgegeben worden, weil das verstärkte Bauen mit Betonfertigteilen und die aus wirtschaftlichen Erwägungen stetig zunehmende Ausnutzung der Festigkeitseigenschaften von Beton mit den daraus folgenden dünnwandigen und schlanken Tragwerkstrukturen die Nachfrage nach einem aussagesicheren, zerstörungsfreien Prüfverfahren für das Bauwesen bestehen ließen und sogar verstärkten. Außerdem haben die

in den letzten zwei Jahrzehnten durchgeführten Untersuchungen auch gezeigt, daß bei einem Einsatz von Ultraschall-Prüfverfahren immer dann erhebliche Vorteile gegenüber zerstörenden Prüfungen erwartet werden können, wenn am Werkstoff Beton örtliche oder zeitliche Veränderungen nachgewiesen bzw. verfolgt werden sollen, die z. B. durch ungleichmäßige Verarbeitung, Änderung der Zusammensetzung, Hydratation oder Überlastung hervorgerufen werden. Zu den Untersuchungsschwerpunkten der zerstörungsfreien Materialprüfung für das Bauwesen gehört daher die apparative und verfahrenstechnische Weiterentwicklung dieser für die Betonprüfung als vorteilhaft erkannten Ultraschall-Prüfverfahren.

2. Problemstellung

Den in Kapitel 1 beschriebenen Erkenntnissen folgend ist es daher das Ziel dieser Arbeit, zunächst die in der Baupraxis eingesetzten Ultraschall-Verfahren technologisch so zu erweitern, daß nicht wie bisher nur eine, sondern wenigstens drei schalltechnische Meßgrößen bestimmt werden können. Auf diese Weise wäre erst die Möglichkeit geschaffen, eine wirklich zerstörungsfreie und gleichzeitig aussagefähige Prüf- und Untersuchungsmethode für bestimmte baupraktische Zwecke zu entwickeln, d. h. die Ultraschallprüftechnik aus der Rolle der Ergänzungsuntersuchung herauszuführen und zur eigenständigen Prüfung zu machen, die keiner weiteren Kontrolle bedarf. Neben der bisher bereits durchgeführten Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit V_L longitudinaler Ultraschall-Impulse müßten dazu auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit V_T transversaler Impulse und die ebenfalls werkstoffbedingte Empfangsintensität J der Impulse bei der Durchschallung in ein Meßverfahren einbezogen werden. Bislang noch nicht befriedigend gelöste Probleme auf dem Wege dorthin sind die Entwicklung geeigneter Schallsender und Empfänger sowie die konstruktive Realisierung der zugehörigen Ankopplungsverfahren.

Aus den drei ermittelten Meßparametern V_L , V_T und J lassen sich insgesamt die vier komplexen Prüfmöglichkeiten $P_1 (V_L, V_T, J)$, $P_2 (V_L, J)$, $P_3 (V_T, J)$ und $P_4 (V_L, V_T)$ ableiten. Es ist zu hoffen, daß ein derartiges reines Ultraschall-Meßverfahren die Nachteile der bisher verwendeten mehrparametrischen komplexen Prüfmethoden beseitigen kann, bei denen beispielsweise Ultraschall mit dem Schmidt-Hammer oder mit einer Bohrkernentnahme kombiniert worden waren.

Inwieweit hierzu die Voraussetzungen geschaffen sind, soll im weiteren Verlauf der Arbeit durch Versuche an einigen, hinsichtlich der Zusammensetzung und Verarbeitung der Baupraxis entlehnten Probekörpern getestet werden. Im einzelnen sollen die aufgeführten Prüfkombinationen auf ihre Eignung für den Nachweis von Gefügeveränderung oder Fehlern überprüft werden, wie sie z. B. durch unterschiedliche oder mangelhafte Verarbeitung, behinderte Verdichtung, äußere Belastung oder chemische Reaktion hervorgerufen sein können.

Charakteristische Eigenschaften des Betons, die seine Entstehung, seine Nutzbarkeit und Qualität und sein Verhalten unter Last (bei Überbeanspruchung) beschreiben und somit ein breites Spektrum seiner Zustände erfassen, sind:

- der Hydratationsfortschritt und der Reifegrad des jungen Betons,
- die Homogenität des erhärteten Betongefüges,
- die Rißentstehung und die Rißfortpflanzung.

Diesen drei Gesichtspunkten soll daher im Hinblick auf die baupraktische Eignung der zu entwickelnden Prüfmethode besonderes Augenmerk geschenkt werden. Da außerdem nicht vorausgesetzt werden konnte, daß der Leser dieser Arbeit mit der Theorie, den Verfahrensweisen, den apparativen Gegebenheiten und der Problematik der zerstörungsfreien Schallprüfverfahren vertraut ist, war es ein besonderes Anliegen dieser Arbeit, neben dem zum Verständnis der vorgelegten Untersuchungen unbedingt nötigen Erläuterungen gleichzeitig in straffer Form eine Einführung in die Ultraschall-Impuls-Prüftechnik speziell aus der Sicht des Bauwesens zu geben.

Gesamtergebnis dieser Arbeit soll es also sein, neben einem Ultraschall-Prüfgerät mit entsprechenden Prüfverfahren auch Anwendungsfälle für das Bauwesen anzugeben, bei denen durch den Einsatz der hier entwickelten - und nur auf Ultraschall basierenden - komplexen Meßmethoden eine zerstörungsfreie Materialprüfung sicherer bzw. überhaupt erst möglich wird.

3. Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

3.1 Historischer Rückblick

Durch Arbeiten von SOKOLOFF (1) und MÜHLHÄUSER (2) wurde bereits zu Beginn der dreißiger Jahre auf die Möglichkeit hingewiesen, Materialfehler durch den Einsatz von Ultraschall im Rahmen einer zerstörungsfreien Werkstoffprüfung festzustellen. Diese Arbeiten gründeten sich naturgemäß auch auf die Erfahrungen und Anwendungstechniken der im ersten Weltkrieg verwendeten LANGEVIN'schen Schallortung von Unterwasserfahrzeugen und der später für friedliche Zwecke von BEHM vorgeschlagenen Meerestiefenmessungen mit dem Echolot. So ist es auch verständlich, daß erste Versuche von MEYER, BUCHMANN und BOCK (3, 4) in den Jahren 1938/39, Ultraschallverfahren für eine Werkstoffprüfung auf dem Gebiet des Bauwesens einzusetzen, mit einem entsprechend umgebauten Schiffsecholot durchgeführt wurden.

Bedingt durch die von der Kriegstechnik gestellten andersartigen Anforderungen an die Industrie im zweiten Weltkrieg und die in den folgenden Abschnitten noch zu erläuternde Tatsache, daß eine Ultraschallprüfung an homogenen metallischen Werkstoffen einfacher durchzuführen ist als an Beton, wird erst wieder zu Beginn der fünfziger Jahre - hauptsächlich in der angelsächsischen Literatur von JONES (5, 6, 7), LESLIE und CHEESMAN (8) und WHITEHURST (9) - über Ultraschalluntersuchungen von Bauwerken und Bauteilen aus Beton und Stahlbeton berichtet. In der Folgezeit führen dann jedoch Fortschritte in der Elektronik und damit im Meßgerätebau sowie die Erfolge der Ultraschallprüftechniken im Stahl- und Maschinenbau zu einem sprunghaften Anwachsen entsprechender Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen auch auf dem Gebiet des Bauwesens. Eine Übersicht über die bis etwa 1970 durchgeführten Untersuchungen mit Ultraschallprüfverfahren für das Bauwesen gibt eine im Auftrage des Bundesministeriums für Raumordnung, Städtebau und Wohnungswesen als Forschungsauftrag durchgeführte Literatursichtung (10).

An der Technischen Universität Braunschweig wurden grundlegende Arbeiten von EISENMANN (11, 12, 13), STEINKAMP (14, 15) und ODEWALD (13) durchgeführt. Derartige Untersuchungen wurden später von KORDINA, ROY und WAUEKE (16, 17, 18, 19, 20, 21) fortgeführt. An diese Untersuchungen schließt die hier vorgelegte Arbeit an.

3.2 Prinzip einer zerstörungsfreien Schallprüfung von Bauteilen

Bei einer zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Ultraschall wird die von einem Schallsender abgestrahlte Schallenergie - meistens in Form kurzer Impulse - nach Durchlaufen des geprüften Bauteils von einem Schallempfänger wieder aufgenommen und einem geeigneten Meßgerät zur Anzeige und Auswertung zugeführt. Ein solches Verfahren ist immer dann für eine Werkstoffprüfung brauchbar, wenn der empfangene Meßimpuls Aussagen über Materialeigenschaften, -veränderungen oder -fehler zuläßt.

Von den unelastischen Eigenschaften und der Struktur eines Werkstoffs wird beispielsweise der Energieverlust der Schallimpulse auf ihrem Weg durch das Bauteil entscheidend beeinflusst, so daß aus der empfängerseitig aufgefangenen Intensität J eines derartigen akustischen Prüfimpulses Aufschlüsse über Strukturveränderungen (z. B. Mikrorißwachstum, Erhärtungsvorgänge) oder Strukturfehler (z. B. Verdichtungsmängel, Risse, Hohlräume) erwartet werden können. Auch ist es in den meisten Anwendungsfällen leicht möglich, die Schallgeschwindigkeit V im betreffenden Prüfkörper zu bestimmen, wenn Sender und Empfänger so an das Bauteil aufgesetzt wurden, daß der Schallweg L (z. B. die Bauteildicke) bekannt ist. Die vom Meßgerät angezeigte Schalllaufzeit t des Impulses durch das Bauteil von Sender zu Empfänger ermöglicht dann sofort die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit V aus der einfachen Beziehung

$$(1) \quad V = \text{Schallweg/Schalllaufzeit} = L/t.$$

Da die Schallgeschwindigkeiten mit den elastischen Eigenschaften eines Werkstoffs verknüpft sind, können beispielsweise - unter noch genau zu prüfenden Voraussetzungen - aus Schallgeschwindigkeitsmessungen Rückschlüsse auf die elastischen Daten oder deren Veränderungen gezogen werden.

Schon bei dieser an sich sehr einfach durchführbaren Schallgeschwindigkeitsbestimmung muß aber vor einer Auswertung der Messung - wenn beispielsweise elastische Werkstoffeigenschaften ermittelt werden sollen - bekannt sein, unter welchen Voraussetzungen sich der Schallimpuls im Bauteil ausgebreitet hat. Bekanntlich können sich in festen Stoffen, abhängig von der Bauteilgeometrie und der Anregung durch den Schallsender, verschiedene Arten elastischer Wellen ausbreiten. Bevor daher die zum Teil schon zur Anwendung

gelangten und die hier vorgeschlagenen Schallprüfverfahren für das Bauwesen im einzelnen erläutert werden, wird in dem folgenden Abschnitt dieses Kapitels zunächst über die wichtigsten und zum Verständnis dieser Arbeit unbedingt nötigen theoretischen Grundlagen kurz berichtet.

3.3 Schallausbreitung in Baustoffen

Aufgrund der elastischen Bindungskräfte zwischen den einzelnen atomaren bzw. molekularen Grundbausteinen (Stoffteilchen, Masseteilchen) fester Stoffe breitet sich eine durch periodische Wechselkräfte erzeugte Deformation mit einer dem jeweiligen Baustoff eigenen Schallgeschwindigkeit in einem Bauteil aus. Die Schallgeschwindigkeit V ist also eine Stoffkonstante. Wird eine elastische (akustische) Welle in einem sog. "unendlich" ausgedehnten Bauteil (s. u.) angeregt, können sich nur zwei unterschiedliche Wellenformen ausbilden. Je nach der Art der Anregung sind dies Longitudinalwellen (mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit V_L) oder Transversalwellen (V_T). Die Momentaufnahme einer sich in einem Bauteil ausbreitenden longitudinalen Schallwelle zeigt Abb. 1 a.

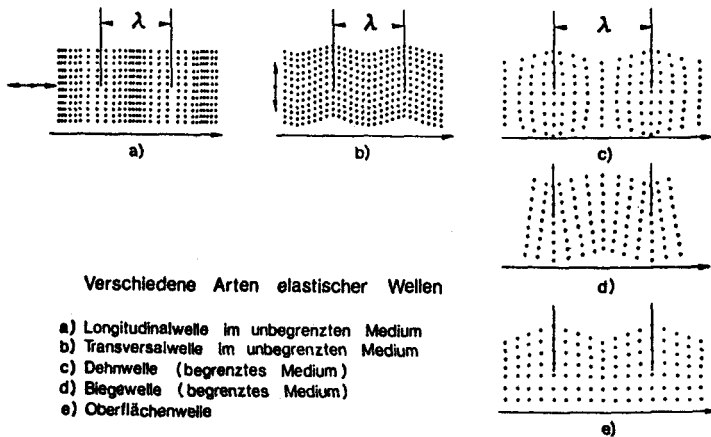


Abb. 1 Elastische Wellen in festen Baustoffen

Eine derartige Schallwelle wird durch eine sinusförmige Normalkraft erregt, die an der Bauteiloberfläche periodische Druck- und Zugspannungen erzeugt. Vom Erregungszentrum (bei der Materialprüfung also vom Sender) ausgehend, breiten sich dann abwechselnd in gleichmäßigen Abständen Verdichtungs- und Verdünnungszonen mit der Geschwindigkeit V_L in das Bauteil aus und erzeugen dort periodische Volumenänderungen. Die einzelnen Stoffteilchen schwingen dabei parallel zur Fortpflanzungsrichtung der Welle (longitudinal!) mit der Frequenz^{+) f} hin und her. Die Frequenz ist im Gegensatz zur Ausbreitungsgeschwindigkeit keine Stoffkonstante, denn sie wird der Schallwelle durch den Sender aufgeprägt. Die Longitudinalwelle heißt aus den genannten Gründen auch Dichte-, Druck- oder Kompressionswelle; sie hat von allen elastischen Wellen in festen Stoffen die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Der Abstand zweier Verdichtungszone (vgl. Abb. 1) bzw. zweier Teilchen mit gleichem Bewegungszustand ist die Wellenlänge λ . Auch sie ist keine Stoffkonstante, denn wegen der für jede Wellenausbreitung gültigen Beziehung

$$(2) \quad v = f \cdot \lambda$$

kann λ bei vorgegebenem v (Stoffkonstante!) durch die Wahl von f beliebig verändert werden.

Literaturangaben über die Mindestabmessungen eines Bauteils, damit es im Hinblick auf eine ungestörte Longitudinalwellenausbreitung bei der Schallprüfung als "unendlich" ausgedehnt gelten kann, sind unterschiedlich. Vorherrschend ist die Auffassung, daß die Bauteilabmessungen B wenigstens größer als 2λ sein sollten, FRIELINGHAUS (86) gibt dagegen ein $B \geq 10 \lambda$ an. Für Betonbauteile mit einer mittleren longitudinalen Schallgeschwindigkeit von etwa $V_L = 4000$ m/s und einer üblichen Prüffrequenz von $f = 50$ kHz ergeben sich aus Gleichung (2) Wellenlängen von $\lambda = 8$ cm. Die Bauteilmindestabmessungen bei Beton für eine ungestörte Longitudinalwellenausbreitung soll-

+) Die Frequenz wird in Hertz (Hz) gemessen. 1 Hz = 1 Schwingung/Sekunde, 1000 Hz = 1 Kilohertz (kHz).

ten daher wenigstens 20 cm betragen. Aus Gleichung (2) folgt an sich, daß bei gegebener Schallgeschwindigkeit V_L (Materialkonstante) die Wellenlänge λ_L durch eine Frequenzerhöhung beliebig verkleinert werden kann; die Bedingung für ein "unendlich" ausgedehntes Medium ließe sich dadurch theoretisch immer erfüllen. Dem steht jedoch die an dieser Stelle noch nicht näher zu erläuternde Tatsache gegenüber, daß mit steigender Frequenz der Energieverlust der Schallwelle im Bauteil stark ansteigt, so daß eine Frequenzerhöhung sehr bald meßtechnische Grenzen gesetzt sind.

Neben der Longitudinalwelle kann sich in einem "unendlich" ausgedehnten Bauteil nur noch die Transversalwelle ausbreiten. Abb. 1 b zeigt eine Momentaufnahme der Stoffteilchenbewegung im Bauteil bei einem Durchgang dieser Wellenform. Bei der Erregung einer Transversalwelle werden an der Bauteiloberfläche durch eine sinusförmige Tangentialkraft periodische Scherspannungen erzeugt, die sich mit V_T im Bauteil fortpflanzen und bewirken, daß die einzelnen Stoffteilchen mit der vom Sender aufgeprägten Frequenz f senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle (transversal!) schwingen. Es kommt zu einer Scherbewegung benachbarter Teilchenlagen gegeneinander, weshalb die Transversalwelle auch Scher-, Schub- oder Querwelle genannt wird. Die Wellenlänge λ_T ist ebenfalls durch den Abstand zweier Stoffteilchen mit gleichem Bewegungszustand festgelegt. Für die Mindestabmessung eines Bauteils hinsichtlich einer ungestörten Transversalwellenausbreitung gilt ebenfalls die Forderung $B > 2 \lambda$. Es ist bekannt, daß V_T etwa von der Größenordnung $0,5 V_L$ ist, so daß wegen Gleichung (2) bei gleicher Frequenz f in erster Näherung $\lambda_T \sim 0,5 \lambda_L$ angenommen werden kann. Der zusätzliche Einsatz von Transversalwellen erbringt also hinsichtlich der Bauteilmindestabmessungen für eine Schallprüfung keine Verschlechterung der Situation.

Sind die Prüfkörperabmessungen B kleiner als 2λ , treten im Bauteil z.T. nicht mehr genau definierbare Wellenformen auf, für die auch kein exakter Zusammenhang mehr zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit und elastischen Konstanten angegeben werden kann. Derartige Schallwellen können aber immer noch sehr gut dazu dienen, z. B. zeitlich veränderliche Prozesse oder Strukturfehler im Bauteil durch vergleichende Schallgeschwindigkeitsmessungen (Relativverfahren) nachzuweisen.

Sonderformen einer Wellenausbreitung sind in diesem Zusammenhang die Stabwellen (Stablänge $\gg \lambda$, $\rho < \lambda$). Bei longitudinaler Anregung am Stabende entstehen Dehnwellen, bei entsprechender transversaler Anregung Biegewellen (vgl. Abb. 1 c, d). Eine weitere - nur an den Grenzflächen eines Bauteils existierende - Wellenform, die gelegentlich bei der Schallprüfung Verwendung findet, ist die Oberflächenwelle (vgl. Abb. 1 c). Daneben sind noch eine Vielzahl weiterer Wellenarten möglich, für die aber bisher in der zerstörungsfreien Schallprüfung von Betonbauteilen keine Anwendungsmöglichkeiten bekannt sind.

Die Gleichungen (3) - (7) geben die mathematischen Zusammenhänge zwischen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten der beschriebenen Wellen und den elastischen Konstanten an.

Dabei sind E (Elastizitätsmodul) und μ (Poissonkonstante, Querdehnungszahl) die elastischen Konstanten, ρ die Materialdichte, I das Flächenträgheitsmoment und F die Querschnittsfläche eines Stabes.

$$(3) \quad v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (\text{Longitudinalwelle})$$

$$(4) \quad v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (\text{Transversalwelle})$$

$$(5) \quad v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{Dehnwelle})$$

$$(6) \quad v_B = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{I}{F}} \quad (\text{Biegewelle})$$

$$(7) \quad v_O = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 - \mu} \cdot v_T \quad (\text{Oberflächenwelle})$$

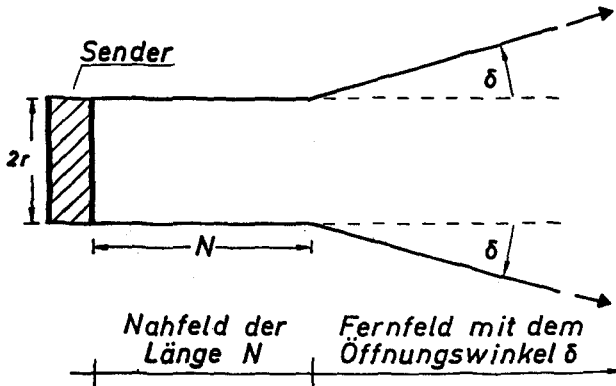


Abb. 2 Schallausbreitung im Baustoff vor dem Sender (Prinzipische Skizze)

Unabhängig von der jeweiligen Wellenart bildet sich, ausgehend vom Schallsender S , ein Schallfeld im Bauteil aus, dessen charakteristische Form in Abb. 2 dargestellt ist. Direkt an den Sender schließt sich das Nahfeld mit der Länge N an. Dort breitet sich die Schallenergie nahezu parallel in einem scharf gebündelten Strahl aus, dessen Durchmesser $2r$ dem Senderdurchmesser entspricht. Im folgenden Fernfeld öffnet sich das Schallbündel unter dem Divergenzwinkel δ , was zu einer kegelförmigen Ausbreitung der Schallenergie führt. Optimale Bedingungen für eine Schallprüfung ergeben sich bei großen Nahfeldlängen und kleinen Divergenzwinkeln, also wenn sich die Schallenergie durch das ganze Bauteil hindurch scharf gebündelt fortpflanzt. Nahfeldlänge N und Divergenzwinkel δ errechnen sich aus der Schallwellenlänge im jeweiligen Baustoff und dem Senderdurchmesser $2r$ nach den Gleichungen (8).

$$(8) \quad N = \frac{4r^2 - \lambda^2}{4\lambda} ; \quad \sin \delta = 1,2 \cdot \lambda / 2r$$

Für den Baustoff Beton mit Wellenlängen zwischen $\lambda = 5 - 8$ cm und üblichen Senderdurchmessern $2r \sim 5$ cm ergeben sich also negative Nahfeldlängen und Divergenzwinkel von über 90° . Es kommt daher überhaupt nicht zur Ausbildung

eines Nahfeldes, sondern die Schallenergie breitet sich auf konzentrischen Kugel­flächen um den Sender herum aus. Diese für eine Werkstoffprüfung un­günstigen Verhältnisse lassen sich bei Beton nicht entscheidend verbessern. Eine in dieser Hinsicht wirksame Vergrößerung des Senderdurchmessers $2r$ führt zu technisch nicht mehr realisierbaren und baupraktisch nicht anwendbaren Senderabmessungen. Einer Verkürzung der Wellenlänge durch eine Frequenz­erhöhung (vgl. Gl. 2) setzt dagegen die damit bei Beton unweigerlich ver­bundene, erhöhte Schallschwächung rasch eine Grenze (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Neben der Kenntnis von Wellenart und Richtcharakteristik der verwendeten Schallsender und -empfänger ist für die zerstörungsfreie Prüfpraxis auch das Verhalten der Schallimpulse an Grenzflächen (Beton - Luft, Beton - Wasser, Zementstein - Zuschlag usw.) von großer Bedeutung. Ob beispielsweise eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Schallimpulses liegende, luft­gefüllte Rißfläche im Bauteil oder ein Hohlraum vom Prüfpuls wahrgenommen werden kann, hängt von dem Reflexions- und Durchlässigkeitsgrad R und D der Grenzfläche Beton - Luft ab. Es gilt

$$(9) \quad R = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1} \right)^2 \quad D = \frac{4 W_2 W_1}{(W_2 + W_1)^2} \quad R + D = 1$$

$$W_1 = \rho_1 \cdot V_1, \quad W_2 = \rho_2 \cdot V_2$$

Wird die Grenzfläche von den Medien 1 und 2 gebildet, so sind W_1 und W_2 deren Schallwiderstände. Dabei ist ρ die zugehörige Materialdichte und V die entsprechende Schallgeschwindigkeit.

Für die Grenzfläche Beton - Luft mit $V_1 = V_L$ (Beton) = 4000 m/s, $\rho_1 = \rho$ (Beton) = 2,3 kg/dm³, $V_2 = V$ (Luft) = 333 m/s und $\rho_2 = \rho$ (Luft) = 1,3 · 10⁻³ kg/dm³ folgt für einen senkrechten Schalldurchgang aus der Gleichung (9):

$$R = 99,98 \%, \quad D = 0,02 \%$$

Die Schallenergie wird also an einer derartigen Grenzfläche fast vollständig reflektiert und steht daher - je nach Ausmaß der Schadstelle - am Empfänger nicht mehr oder nur stark abgemindert zur Verfügung. Jede Grenzfläche in einem Betonbauteil trägt also in Abhängigkeit von ihrer Querschnittsfläche senkrecht zur Durchschallungsrichtung und dem Verhältnis W_1/W_2 (vgl. Gl. 9) zu einer Veränderung der empfangenen Schallimpulsenergie bei. Dieser Effekt

kann daher im Rahmen einer Intensitätsmessung für einen Nachweis von Fehlstellen (Risse, Hohlräume, Klemmer usw.) in Betonbauteilen eingesetzt werden, sofern die messtechnischen Voraussetzungen für eine reproduzierbare Ankopplung von Sender und Empfänger vorhanden sind.

Sehr ausführliche und allgemeingültige Darstellungen der hier aus der Sicht einer baupraktischen Anwendung geschilderten physikalischen Sachverhalte einer Schallausbreitung in festen Stoffen finden sich bei BERGMANN (22), KRAUTKRÄMER (23) und MATAUSCHEK (24).

3.4 Prüfverfahren, Anwendungsmöglichkeiten und Geräte

a) Prüfverfahren

Die Abb. 3 zeigt in einem Blockschaltbild das Prinzip einer Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (Schallgeschwindigkeitsmessung) und einer Intensitätsmessung (Energieverlustmessung). In einem Impulsgenerator G werden kurze, elektrische Impulse erzeugt, die im Sender S in mechanische (akustische) Impulse umgewandelt und durch eine Koppelschicht auf das Bauteil übertragen werden. Der Schallimpuls durchläuft das Bauteil mit einer dem Baustoff eigenen Schallgeschwindigkeit und wird vom Empfänger E aufgenommen. Dort wird das Signal wieder in einen elektrischen Impuls zurückverwandelt und dem Verstärker V mit angeschlossenem Laufzeit- oder Intensitätsmeßgerät zugeführt.

Derartige Messungen wurden bisher ausnahmslos mit Sendern und Empfängern für longitudinale Schallimpulse durchgeführt, da das Erzeugen, Empfangen und Übertragen dieser Impulse auf Bauteile einfach durchführbar ist. Die entsprechenden Meßgeräte vereinen normalerweise Impulsgenerator G, Verstärker V und Meßwertanzeige in einem Gehäuse. Sie sind mit Sender und Empfänger durch Meßkabel verbunden und gestatten in Bauteilen aus Beton eine sehr genaue Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit V_L longitudinaler Ultraschallimpulse. Die zerstörungsfreie Ermittlung von Bauteileigenschaften mit Impuls-Schallverfahren wurde daher - von wenigen Ausnahmen abgesehen - bisher immer über eine Messung der Schallgeschwindigkeit longitudinaler Ultraschall-Impulse durchgeführt.

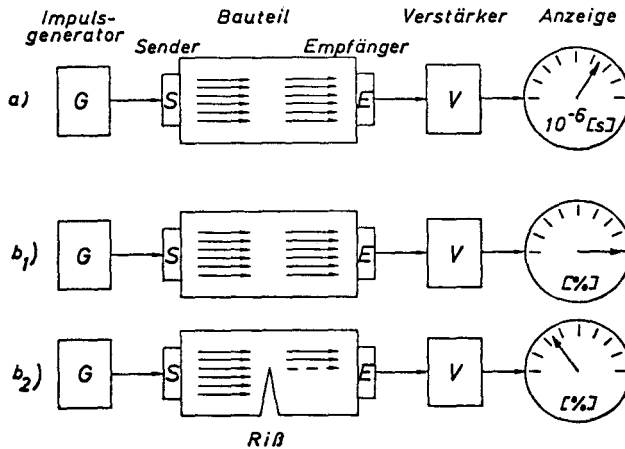


Abb. 3 Meßverfahren mit longitudinalen Ultraschallimpulsen
(a) Laufzeitmessung - (b) Intensitätsmessung

Meistens gestatten die Meßgeräte auch eine Bestimmung der empfangenen Schallintensität bzw. des Energieverlustes der Impulse auf ihrem Weg durch das Bauteil. Dieses Verfahren kann jedoch nur dann mit Erfolg angewendet werden, wenn es gelingt, das Meßergebnis von den Energieverlusten zu befreien, die bei der Impulsübertragung vom Sender auf das Bauteil und zurück auf den Empfänger auftreten. Die Intensitätsmessung wird daher im Bauwesen nur äußerst selten eingesetzt.

b) Anwendungsmöglichkeiten

Lange Zeit war es das erklärte Ziel von Ultraschalluntersuchungen im Bauwesen, die Druckfestigkeit des erhärteten Betons auf zerstörungsfreiem Wege am Bauwerk zu ermitteln. Etwa 90 % aller in der Literatur veröffentlichten Arbeiten behandeln daher speziell dieses Thema. Die große Schwierigkeit liegt bei diesen Verfahren jedoch darin, die Vielzahl der möglichen Herstellungsparameter des Betons mit ihren Auswirkungen auf die Druckfestigkeit allein durch die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit longitudinaler Impulse als einzigem Meßparameter zu erfassen. Es hat sich gezeigt, daß sich die Betonparameter wie Verdichtung, W/Z-Wert, Zement (Art und Menge), Zuschlag (Art, Menge und Sieblinie) und Betonalter teilweise unterschiedlich auf

Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit auswirken, d. h. es ist möglich, durch Änderung einzelner Betonparameter die Schallgeschwindigkeit bei konstanter Druckfestigkeit zu ändern und umgekehrt. Um die dadurch bedingten und untragbaren Meßfehler von bis zu 50 % auf ein vertretbares Maß zu verringern, wurde versucht, die Auswirkungen der unterschiedlichen Herstellungsparameter durch sog. Einflußkoeffizienten C_i bei der Berechnung der Druckfestigkeit β aus der Schallgeschwindigkeit V_L etwa nach Art der Gleichung (10a) zu berücksichtigen.

$$(10a) \quad \beta = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot \dots \cdot C_n \cdot V_L^k$$

Derartige, empirisch ermittelte Gleichungen haben dann natürlich den Nachteil, daß ihnen wegen der jeweiligen Herkunft von Zement und Zuschlägen nur eine regionale Bedeutung zukommt. Außerdem erfordern sie so genaue Kenntnisse über Verarbeitung und Zusammensetzung des Betons, wie sie normalerweise bei einer nachträglichen Druckfestigkeitsbestimmung, besonders am älteren Bauwerk, nicht mehr verfügbar sind.

FACAOARU und JONES (25) sowie POHL (26) geben daher etwas vereinfachte Beziehungen mit maximal nur drei Konstanten zwischen β und V_L (vgl. Gl. 10b) an.

$$(10b) \quad \beta = a \cdot V_L^b, \quad \beta = a \cdot c \cdot V_L^{b \cdot c}, \quad \beta = a V_L^2 + b V_L + c$$

Sie setzen aber voraus, daß die Konstanten a, b und c durch Parallelversuche während des Bauens am Bauwerksbeton ermittelt werden können. Die Gleichungen (10b) haben in diesem Fall natürlich nur für das betreffende Bauwerk Gültigkeit.

Eine Verbesserung der Prüfsituation bei der zerstörungsfreien Festigkeitsermittlung von Beton wurde durch eine Kombination (komplexe Verfahren) von Ultraschallmessungen mit anderen Bauteilkontrollen - z.B. dem Schmidt-Hammer - versucht (27 - 35). Eine zusammenfassende Darstellung zum Problem einer zerstörungsfreien Betondruckfestigkeitsprüfung findet sich bei LEERS (36).

Es ist jedoch durch die beschriebenen Verfahrensweisen nicht gelungen, die auftretenden Meßfehler so zu verringern, daß aus einer Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Ultraschallimpulse eine allgemein anwendbare

Druckfestigkeitsprüfung für Bauwerke oder Bauteile aus Beton abgeleitet werden kann.

Als wenig aussichtsreich müssen auch Versuche gelten, Absolutwerte von Betonfeuchte oder Rohdichte über eine Messung von V_L zu bestimmen (37 - 42). Derartige Untersuchungen können jedoch im Rahmen eines relativen Prüfverfahrens dann Erfolg haben, wenn sichergestellt ist, daß alle das Ergebnis beeinflussenden Baustoffparameter - abgesehen von Feuchte bzw. Dichte - konstant sind.

Ebensowenig ist es bisher befriedigend gelungen, nur mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Impulse V_L Risse in Bauteilen sicher aufzufinden und Aussagen über Rißtiefe und -weite zu gewinnen oder aber Hohlräume - mit Angabe ihrer Abmessungen - nachzuweisen. Bei derartigen Untersuchungen kann jedoch schon die zusätzliche Messung der Impulsintensität J erhebliche Fortschritte erbringen (11, 12, 25, 43 - 50).

Hinsichtlich einer Ermittlung elastischer Konstanten von Baustoffen folgt aus den Gleichungen (3) und (4) sofort, daß eine genaue Bestimmung von E (Elastizitätsmodul) und μ (Poissonkonstante) nur aus einer Messung von V_L nicht möglich ist. Bei der Berechnung von E aus der Schallgeschwindigkeit werden daher immer Schätzwerte für ρ und besonders für μ eingesetzt, die naturgemäß nicht unerheblichen Schwankungen unterworfen sind. Lediglich Gleichung (5) läßt eine exakte Bestimmung von E zu, jedoch ist hier die Anwendung des Prüfverfahrens wegen der dafür unabdingbaren stabförmigen Prüfkörper nur auf das Labor beschränkt. Eine Verbesserung der Prüfsituation kann hier durch eine zusätzliche Messung von V_T erwartet werden (36, 51 - 59).

Sehr vorteilhaft lassen sich dagegen die nur auf der Messung von V_L basierenden Ultraschall-Prüfungen im Rahmen von Relativverfahren für eine zerstörungsfreie Baustoffüberwachung einsetzen. Diese Meßverfahren liefern keine absoluten Werkstoffdaten wie z. B. Druckfestigkeit, Dichte, elastische Moduli oder Feuchtegehalt, sondern dienen dazu, Veränderungen an Baustoffen oder Bauteilen nachzuweisen.

In einer kontinuierlichen Messung der Änderung von V_L besteht beispielsweise die Überwachung von Hydrations- und Erhärtungsvorgängen beim Abbinden von hydraulischen Baustoffen. Mit diesen Verfahren lassen sich die physikalisch-mechanischen Umwandlungen in der ersten Stufe des Erstarrungsvorgangs sowie dessen Kinetik gut verfolgen. Derartige Kontrollverfahren werden bereits zur Überwachung technologischer Prozesse (thermische Nachbehandlung, Dampfhärtung) eingesetzt (9, 20, 21, 60 - 63).

Große wirtschaftliche Vorteile erbringt der Einsatz von Schallgeschwindigkeitsmessungen bei der Ermittlung von Korrosionsgrad und -geschwindigkeit unterschiedlich beanspruchter Betonproben. Die Zerstörung des Betongefüges durch aggressive Lösungen oder Frost-Tau-Wechsel läßt sich einfach und an nur wenigen Prüfkörpern über lange Zeiträume zerstörungsfrei gut verfolgen (25, 30, 64 - 68).

Eine weitere Anwendung der Schallgeschwindigkeitsmessung besteht in der Beobachtung des Auftretens von Mikrorissen und des Rißwachstums an belasteten Betonbauteilen. Durch eine Änderung der Schallgeschwindigkeit können hier die einsetzenden Gefügezerstörungen bereits zu einem Zeitpunkt nachgewiesen werden, an dem andere Verfahren noch keine Anzeige erbringen. In diesem Zusammenhang kann der zusätzliche Einsatz der Intensitätsmessung eine Steigerung der Aussagekraft zur Folge haben, wenn es gelingt, die Ankopplung der Schallprüfköpfe von Einflüssen der Lastaufbringung freizuhalten (69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76).

Während die vorstehend beschriebenen drei relativen Meßverfahren in ihrer Anwendung auf den Laborbetrieb beschränkt sind, kann die in Form einer Homogenitätskontrolle durchgeführte Relativmessung mit gutem Erfolg auf Baustellen oder an bereits fertigen Bauwerken eingesetzt werden. Dazu wird das beanstandete oder zu prüfende Bauteil mit einem dem Umfang des erwarteten Schadens angepaßten Raster von Schallmeßpunkten überzogen. Örtliche Schwankungen der Schallgeschwindigkeit oder ein beträchtlicher Abfall von Meßwerten unter einen als "normal" erkannten Grenzwert weisen dann auf eine Gefügestörung hin. Im Rahmen sogenannter "quasizerstörungsfreier" Prüfverfahren können dann an kritischen Meßpunkten des Bauwerks durch eine gezielte Entnahme von nur wenigen Bohrkernen beispielsweise Rückschlüsse auf das Tragverhalten der gesamten durchschallten Bauwerksbereiche gezogen werden, die sich sonst

nur durch eine ungleich größere - ja in den meisten Fällen schon unwirtschaftliche - Anzahl von Bohrkernentnahmen erzielen ließen. Dabei kommt noch hinzu, daß sich ein Raster für Schallgeschwindigkeitsmessungen wegen der zerstörungsfreien Werteermittlung überall dort, wo es nötig erscheint, beliebig eng anlegen läßt.

Als eine weitere Beurteilungsgröße für den Erhaltungszustand von Bauwerken kann die in den beschriebenen Meßpunktrastern ermittelte Streuung aller Schallgeschwindigkeitswerte dienen (16, 17). Für eine Homogenitätskontrolle eignen sich je nach Leistungsfähigkeit des Prüfgeräts Großbauteile mit Dicken bis zu 5 m, wandartige Elemente, Stützen, Träger und besonders - wegen der angestrebten Konstanz der Betonparameter - Fertigteile großer Serien (25, 26, 30, 77 - 85).

Als ein weiteres Prüfverfahren, das der Thematik nach zu den Relativmessungen zählt, darf die Echo-Impuls-Methode in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben. Wie in Abschnitt 3.3 gezeigt wurde, werden Schallimpulse an luftgefüllten Rißflächen oder Hohlräumen nahezu vollständig reflektiert und können daher unter bestimmten Voraussetzungen auch an ihrem Ausgangsort von einem Schallprüfkopf, der abwechselnd als Sender oder Empfänger (S/E-Prüfkopf) geschaltet wird, oder einem neben dem Sender angeordneten Empfänger als Echoimpulse wieder aufgefangen werden. Sender und Empfänger befinden sich also - im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Durchschallungsverfahren - nebeneinander auf der gleichen Seite des Prüfkörpers. Auf dem Bildschirm des entsprechenden Meßgerätes erscheint bei einem fehlerfreien Werkstück nur das von dessen Rückseite hervorgerufene "Rückwandecho" (vgl. Abb. 4). Fehlstellen werden durch "Fehlerechos" angezeigt, die wegen der kürzeren Schallwege naturgemäß vor dem Rückwandecho liegen. Aus der Lage der Fehlerechos auf dem Bildschirm kann der Fehlstellenort im Prüfstück und aus der Echohöhe unter günstigen Voraussetzungen auch die Fehlergröße ermittelt werden.

Daß dieses Verfahren einerseits für metallische Werkstoffe zur meistverwendeten Schallprüfmethode geworden ist, andererseits aber für Prüfaufgaben im Bauwesen überhaupt nicht eingesetzt werden kann, hat zwei Ursachen:

a) Nach den Gleichungen (8) breitet sich die Schallenergie in Beton auf konzentrischen Kugelflächen um den Sender herum in das Bauteil aus. Demzufolge können Echos aus allen Richtungen zurückkommen, so daß die Zuordnung "Fehlerecho - Fehlerort im Bauteil" sehr erschwert wird. Bei metallischen

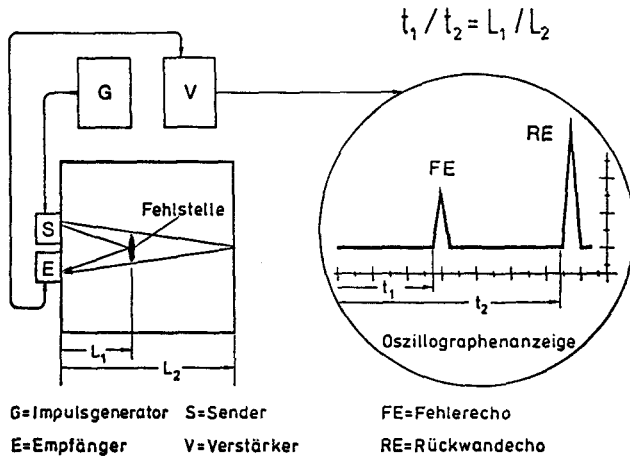


Abb. 4 Impulsecho-Verfahren (schematisch)

Werkstoffen ist im Gegensatz zu Beton die Schallabsorption so gering, daß durch eine Frequenzerhöhung (vgl. Gl. 2) ohne Schwierigkeiten Wellenlängen von nur 1 mm Länge erzeugt werden können. Nach Gleichung (8) führt das für die Schallbündelung in einen scharfen Strahl zu einem sehr günstigen Verhältnis $\lambda/2r$. Mit einem scharf gebündelten Schallstrahl geringen Durchmessers bereitet die Lokalisierung einer Fehlstelle naturgemäß keine Schwierigkeiten. Bei Beton müßte die Fehlerortsbestimmung demgegenüber mit einer 3-Punktmessung erfolgen.

b) Ein weitaus größeres Hindernis für den Einsatz des Echoimpulsverfahrens im Bauwesen ist der relativ lange Ausschwingvorgang von Sender und Empfänger nach einem kurzen elektrischen oder mechanischen Anstoß. Bei einer üblichen Prüffrequenz von 50 kHz dauert die durch einen ca. $10 \mu\text{s}^+$ langen elektrischen Spannungsimpuls am Sender ausgelöste Abstrahlung des Schallimpulses etwa $500 \mu\text{s}$ (vgl. Abb. 5). Während dieser Zeit kann der neben dem Sender angeordnete Empfänger keine Echos aufnehmen, da die Sendeenergie ein Vielfaches der Echoenergie beträgt (das Echo wird "übertönt"). Bei einer mittleren

+) 1 Mikrosekunde (μs) = 10^{-6} Sekunden (s)

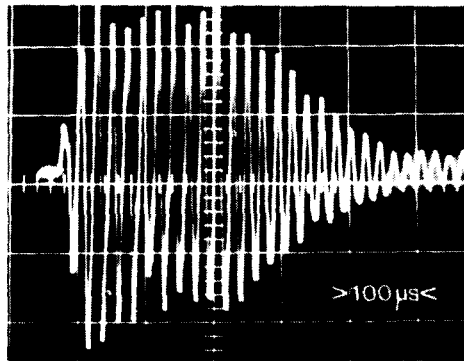


Abb. 5 Longitudinaler Ultraschallimpuls

Schallgeschwindigkeit von V_L (Beton) = 4000 m/s kann die erste Impulsamplitude in 500 μ s einen Weg von etwa 2 m zurücklegen. Das erste für den Empfänger wahrnehmbare Echo kann daher im günstigsten Falle aus einer Bauteiltiefe von 1 m wahrgenommen werden, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß bei derartigen Schallwegen sehr oft schon die Leistungsgrenze der Prüfgeräte erreicht ist (vgl. Abschnitt c). Kommen dagegen Echos aus einer geringeren Tiefe als 1 m zurück, kann ihr Eintreffen wegen des noch strahlenden Senders zum einen nicht genau bestimmt werden, zum anderen wird der Empfänger durch die Echos mechanisch angestoßen und ist dadurch bis zum Abklingen dieses Schwingungsvorgangs für die Aufnahme weiterer Echos blockiert.

Fortschritte können hier nur in einer geeigneten Bedämpfung von Schallsender und -empfänger erreicht werden, die eine wesentliche Verkürzung der Schwingungszeiten zur Folge haben.

c) Prüfgeräte

Die meisten aller auf dem Markt angebotenen Ultraschall-Prüfgeräte sind vorzugsweise für einen Einsatz an metallischen Werkstoffen gedacht und aufgrund ihrer hohen Prüffrequenzen ($f > 1000$ kHz) für einen Einsatz an Bauteilen aus Beton völlig ungeeignet. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Bauwesens müssen daher vielfach mit Eigenkonstruktionen der betreffenden Institute oder speziell umgebauten Geräten durchgeführt werden.

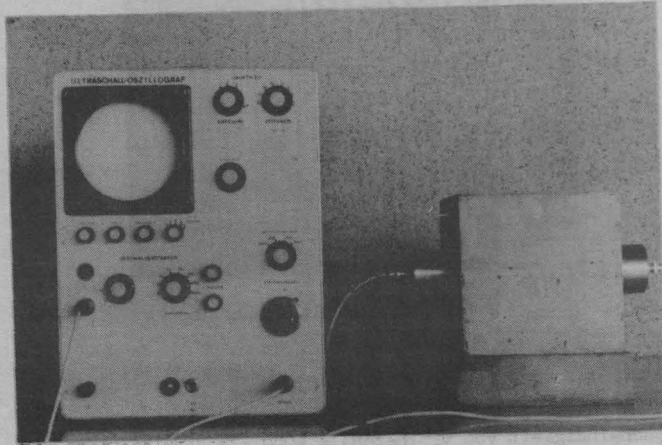
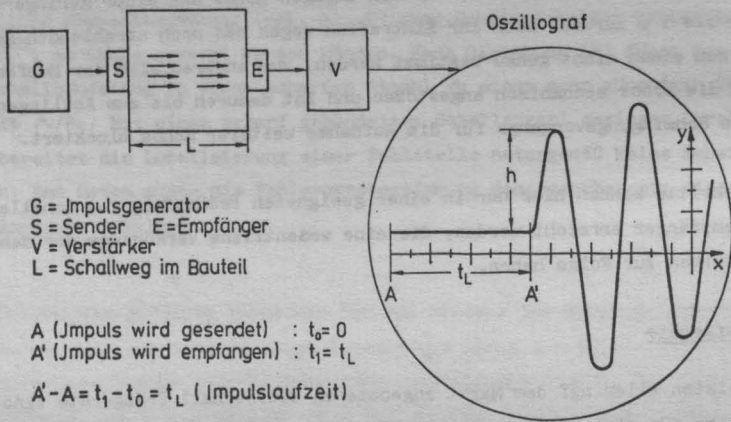


Abb. 6 Ultraschall-Oszillograf



Impulsgeschwindigkeit = L/t_L (Schallgeschwindigkeit)

Impulsintensität $\approx h$ = Höhe der ersten Impulsamplitude

Abb. 7 Meßwertanzeige auf dem Bildschirm eines Ultraschall-Oszillografen

Auch das für die vorliegende Arbeit benutzte Gerät wurde - aufbauend auf den Ergebnissen durchgeführter Untersuchungen mit Ultraschallverfahren - im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig entwickelt und aufgebaut. Die Apparatur vereinigt Impulserzeuger, Verstärker und eine Oszillographenröhre zur Meßwertanzeige in einem Gehäuse und entspricht daher in ihrem äußeren Aufbau etwa handelsüblichen Oszillographen (vgl. Abb. 6). Auf dem Bildschirm des Gerätes lassen sich sowohl die Laufzeit des Ultraschallimpulses durch das Bauteil als auch die Impulsintensität ablesen. Das Prinzip dieser Messung ist in Abb. 7 wiedergegeben: Zur Bestimmung der Impulslaufzeit t wird der Fußpunkt A' des Empfangsimpulses durch Drehen an einem geeichten Stellpotentiometer so lange auf der Zeitachse (x-Achse) verschoben, bis er mit deren Anfangspunkt A zusammenfällt. An der Potentiometerskala kann dann die Laufzeit t direkt in μs abgelesen werden. Im Meßbereich 0 - 100 μs beträgt die Einstellgenauigkeit 0,1 μs , im Bereich 0 - 1000 μs kann auf 1 μs genau abgelesen werden. Schalllaufzeiten von 100 μs bzw. 1000 μs entsprechen - bei einer mittleren longitudinalen Schallgeschwindigkeit im Beton von ca. $V_L = 4000 \text{ m/s}$ - durchschallten Bauteildicken von 0,4 m bzw. 4 m. Bei einer Prüffrequenz von 50 kHz können mit diesem Gerät bei maximaler Ausgangsleistung Betonkonstruktionen jedoch nur bis zu einer Dicke von 2 m durchschallt werden.

Die Impulsintensität ergibt sich im Oszillographenbild (vgl. Abb. 7) aus der Höhe h der ersten Impulsamplitude durch Vergleich mit der geeichten, senkrechten Maßlinie (y-Achse), wobei natürlich die jeweils eingestellte Verstärkung berücksichtigt werden muß.

Zur Messung wird im Impulsgenerator ein elektrischer Spannungsimpuls von ca. 12 μs Dauer erzeugt, der im Sender in einen etwa 500 μs langen Schallimpuls umgewandelt wird. Der Spannungsimpuls wurde hinsichtlich seiner Dauer einer Sendefrequenz von 40 kHz optimal angepaßt, jedoch können auch Sender anderer Frequenzen angeschlossen werden.

Ganz ähnlich im Aufbau und in der Handhabung ist das Ultraschallgerät USG 04.01.01. der Fa. Wazau / Meß- und Prüftechnik / Berlin.

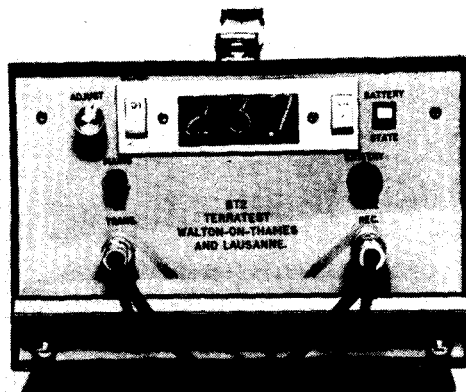


Abb. 8 Digital anzeigender Impulslaufzeitmesser für die Baustoffprüfung

Aufgrund einer höheren Sendeleistung können jedoch bei einer Prüffrequenz von 50 kHz Stahlbetonbauteile bis zu einer Dicke von 5 m durchschallt werden. Das Gerät ist für Labor- und Baustelleneinsatz recht gut geeignet.

Einen ganz anderen Gerätetyp verkörpern die Prüfgerät BT-2 der Fa. Terratest (vgl. Abb. 8) oder der Ultraschalltester PUNDIT. Diese Geräte sind reine Laufzeitmesser und arbeiten mit longitudinalen Ultraschall-Impulsen. Sie bestechen durch ihre einfache Bedienung und die sofort ablesbare, digitale Anzeige der Laufzeit in μs . Sie sind überall dort gut einsetzbar, wo nur die Laufzeit longitudinaler Impulse bzw. V_L bestimmt werden soll. Für Forschungsvorhaben lassen sie sich dagegen nur sehr begrenzt anwenden, da die Impulsintensität gar nicht und die Ausbreitungsgeschwindigkeit anderer Wellenarten nur in Ausnahmefällen gemessen werden können.

Neben den vorstehend beschriebenen Geräten, die speziell für eine baupraktische Anwendung entwickelt wurden, gibt es noch eine begrenzte Zahl von Ultraschallprüfern für metallische Werkstoffe, die durch Umbauten an Impulserzeuger und Verstärker lediglich den in der Betonprüfung üblichen Frequenzen angepaßt sind. Die Prüfgeräte der Firmen Krautkrämer (USIP 10 NF oder USM 2 NF) und KLN-Ultraschallgesellschaft (Echoskop MPT 10) lassen sich daher für spezielle Laboruntersuchungen mit Frequenzen ab 50 kHz gut verwenden, die Anforderungen an ein universell einsetzbares Ultraschall-Prüfgerät für das Bauwesen können sie jedoch noch nicht erfüllen.

Die für einen baupraktischen Einsatz notwendigen Schallprüfköpfe (Sender und Empfänger) mit Frequenzen von etwa 50 - 100 kHz für Longitudinalimpulse werden bisher in der Bundesrepublik nur von einem Hersteller angeboten und sind im Vergleich zu entsprechenden Prüfköpfen für metallische Werkstoffe sehr teuer. Schallsender und Empfänger speziell für reproduzierbare Ankopplungsverfahren zur Intensitätsmessung oder aber für das Senden und Empfangen transversaler Impulse in den das Bauwesen interessierenden Frequenzbereichen sind bisher nicht erhältlich. Abschließend muß daher festgestellt werden, daß eine allen Erfordernissen gerecht werdende, zerstörungsfrei messende Ultraschallapparatur mit dem nötigen Zubehör für baupraktische Anwendungen im Labor und auf Baustellen bisher nicht von den Meßgeräteherstellern angeboten wird. Über die Mindestanforderungen an ein derartiges Meßgerät wird im Ausblick (Kap. 7) berichtet.

4. Schaffung gerätetechnischer und prüftechnischer Voraussetzungen für ein komplexes Ultraschall-Prüfverfahren

4.1 Entwicklung und Bau von Transversalwellenwandlern für die Baustoffprüfung

4.1.1 Der piezoelektrische Effekt

Zu der in Kap. 3 beschriebenen Umwandlung elektrischer Impulse in mechanische und umgekehrt durch Schallsender und -empfänger lassen sich verschiedene Verfahren benutzen (vgl. z. B. 22, 23, 24). Für den Bau von Schallprüfköpfen, die in der Baupraxis den harten Anforderungen von Labor- und Baustelleneinsätzen standhalten sollen, werden nur noch piezoelektrische Wandlermaterialien eingesetzt. Zu diesen Materialien zählen die in der Natur vorkommenden Einkristalle aus Quarz oder Lithiumsulfat. Sie haben jedoch völlig an Bedeutung verloren und werden heute durch künstliche Wandler aus piezoelektrischen Keramiken wie Bariumtitanat BaTiO_3 oder Bleizirkonat-Titanat $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ersetzt. Derartige Stoffe haben die Eigenschaft, daß durch mechanische Spannungen auf ihren Oberflächen elektrische Ladungen erzeugt werden. Dieser Vorgang ist umkehrbar, d. h. durch das Aufbringen elektrischer Ladungen können auch mechanische Spannungen ausgelöst werden.

Der piezoelektrische Effekt wird durch eine Unsymmetrie der Ionenanordnung in den einzelnen Kristalliten piezoelektrischer Werkstoffe hervorgerufen. Abb. 9 a zeigt die schematische Darstellung einer Elementarzelle des in der Baupraxis hauptsächlich verwendeten Bariumtitanats. Die Unsymmetrie ergibt sich hier durch eine Versetzung der Ba^{2+} -Ionen um $0,06 \text{ \AA}$, der Ti^{4+} -Ionen um $0,12 \text{ \AA}$ und der O^{2-} -Ionen um $0,03 \text{ \AA}$ gegenüber ihrer Ursprungslage im symmetrischen Perowskitgitter ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ m}$). Diese Unsymmetrie ermöglicht es, daß sich die elektrisch geladenen negativen und positiven Kristallbausteine infolge einer mechanischen Spannung relativ zueinander verschieben können. Dadurch wird das Ladungsgleichgewicht im Kristallit gestört, und seine Endflächen erscheinen positiv bzw. negativ aufgeladen. Umgekehrt werden durch eine äußere elektrische Aufladung der Kristallitendflächen infolge der nun wirkenden elektrischen Feldkräfte die positiven und negativen Ionen in Richtung der jeweils entgegengesetzt geladenen Endfläche verschoben, was zwangsläufig zu mechanischen Spannungen im Kristallit führt. Oberhalb einer Umwandlungstemperatur T_c (Curie-Temperatur) wird die Unsymmetrie durch ein Zurückfallen der Ionen in ihre Ursprungslage des symmetrischen Grundgitters aufgehoben (Abb. 9 b). Mechanische und elektrische Spannungen wirken sich jetzt auf die Ionen jeweils in gleicher Weise oder gar nicht mehr aus, so daß die den piezoelektrischen Effekt hervorrufende Ladungstrennung längs der Achse P im Kristallit unterbleibt. Die Temperatur T_c liegt jedoch bei den meisten Piezoelektrika über $200 \text{ }^\circ\text{C}$, so daß eine Zerstörung des Schallwandlers bei baupraktischen Anwendungsfällen normalerweise nicht zu erwarten ist.

Die hier am mikroskopisch kleinen Kristalliten mit regelmäßiger Anordnung ihrer Elementarbausteine beschriebenen Effekte können nur dann nach außen wirksam werden, wenn die Achsen P (vgl. Abb. 9) aller Kristallite im makroskopischen Gesamtkristall parallel stehen. Bei einer regellosen Verteilung heben sich die erzeugten Ladungen bzw. elastischen Spannungen im statistischen Mittel auf. Die geforderte parallele Ausrichtung der Achsen P ist bei den gleichmäßig gewachsenen Einkristallen aus Quarz oder Lithiumsulfat naturgemäß von selbst gegeben. An den durch Sinterung der gemahlten Ausgangsrohstoffe gewonnenen, keramischen Wandlermaterialien muß sie dagegen erst künstlich hergestellt werden. Man erreicht dies durch das Anlegen hoher, äußerer elektrischer Felder während der Sinterung bei Temperaturen oberhalb

T_c . Die vorerst regellos orientierten und noch frei beweglichen Kristallachsen P richten sich unter Einwirkung der elektrischen Feldkraft parallel zu dieser aus. Die Parallelstellung wird dann durch ein Absenken der Temperatur (bei eingeschaltetem elektrischen Feld) unter T_c "eingefroren". Das Ausrichten der Achsen P nennt man Polarisieren, die Achse P gibt dann im Piezoelektrikum die für die Wandlerkonstruktion wichtige Richtung der Polarisation an.

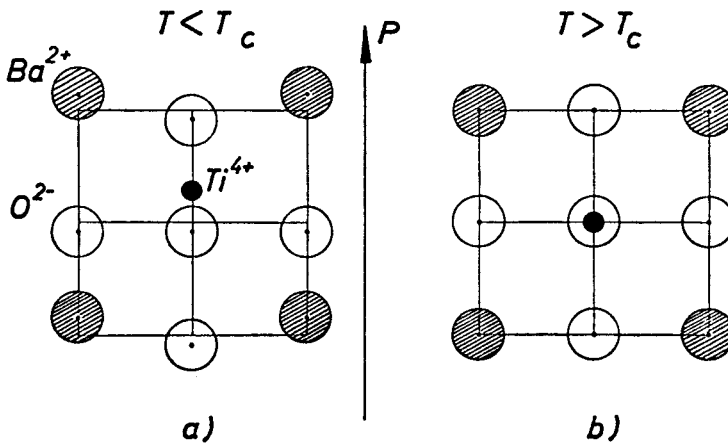


Abb. 9 Elementarzelle von BaTiO₃

4.1.2 Elektroakustische Wandler aus piezoelektrischer Keramik

Abb. 10 zeigt einen Block aus piezoelektrischer Keramik mit einer Polarisation P in x -Richtung. Schneidet man aus diesem Block wie angedeutet eine rechteckige oder scheibenförmige Platte derart aus, daß die Polarisation P auf den Plattenoberflächen senkrecht steht (vgl. Platte L in Abb. 10), so erhält man einen elektroakustischen Wandler, der wegen der Umkehrbarkeit des piezoelektrischen Effektes als Sender und Empfänger von Schallwellen geeignet ist. Zum Aufbringen (Sender) oder Ableiten (Empfänger) der elektrischen Ladungen werden die Endflächen der Piezoplatten leitend metallisiert und mit Zuleitungen versehen. Eine derartige Platte ändert nach einer elektrischen Impulsanregung (Spannungsstoß) periodisch mit der durch ihre Geometrie eingepprägten

Frequenz f ihre Dicke d . Sie erzeugt also in Richtung der Plattennormale x - die hier mit P übereinstimmt - periodisch Druck- und Zugspannungen, die sich bei einer Ankopplung der Platte an ein Bauteil dort als Longitudinalwellen ausbreiten (vgl. Kap. 3, Abschnitt 3.3). Unter gleichen Bedingungen kann diese Schwingerscheibe aber auch eine longitudinale Welle aus dem Bauteil durch Umwandlung der mechanischen in elektrische Spannungen empfangen.

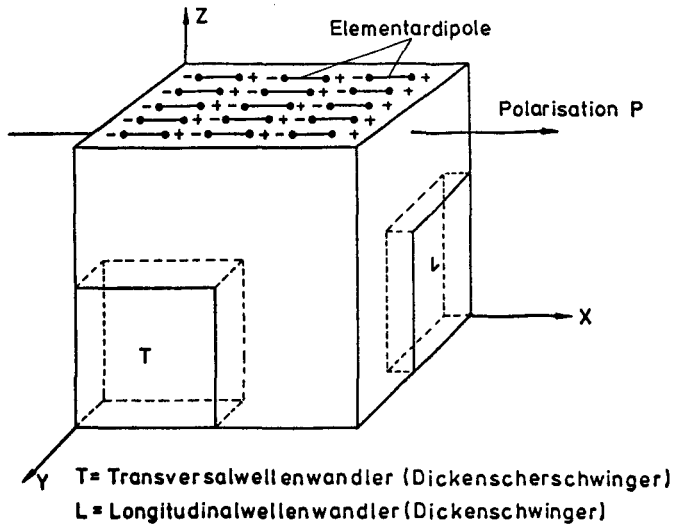


Abb. 10 Piezoelektrische Keramik der Polarisation P mit eingezeichneten Wandlerplatten für longitudinale (L) und transversale (T) Anregung von Ultraschallimpulsen

Wegen der periodischen Dickeänderung werden derartige Schallwandler "Dickenschwinger" genannt. Ihre Frequenz f ergibt sich aus Gleichung (11) zu

$$(11) \quad n = f \cdot d$$

Dabei ist n die Wellenzahl des Wandlermaterials (Stoffkonstante) und d die Platten- oder Scheibendicke. Für baupraktische Messungen werden Schwingerscheiben bis zu 50 mm \varnothing eingesetzt. Ihre Dicke liegt bei Frequenzen um

50 kHz in Abhängigkeit von n zwischen 40 und 50 mm. Scheiben dieser Dicke sind aus fertigungstechnischen Gründen nur schwer erhältlich. Für Frequenzen um 50 kHz werden daher sogenannte Sandwich-Wandler benutzt, die aus mehreren dünnen Schwingerscheiben unter Anwendung einer hohen mechanischen Vorspannung zusammengesetzt werden.

Daß der hier beschriebene Dickenschwinger bei einer Abstrahlung oder beim Empfang longitudinaler Schallwellen nicht nur seine Dicke periodisch ändert, folgt schon allein aus der Elastizitätstheorie fester Stoffe, der zufolge mit der Längsausdehnung eines Festkörpers auch eine entsprechende Veränderung der Querdimensionen verbunden ist. Die Verhältnisse sind bei den Piezoelektrika noch weitaus komplizierter, denn neben die Kopplung der elastischen Spannungen verschiedener Raumrichtungen tritt hier noch die Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Spannungen. Einen piezoelektrischen Schallwandler, der nur in einer Raumrichtung mechanische Spannungen erzeugt, wird es daher nicht geben. Durch eine geschickte Wahl der Wandlergeometrie läßt es sich jedoch erreichen, daß die mechanischen Spannungen einer Raumrichtung bevorzugt werden.

Ein Dickenschwinger erzeugt also wegen der mit seiner Dickenänderung verbundenen Änderung seiner Querabmessungen in seiner Abstrahlfläche nicht nur periodische Druck- und Zugspannungen sondern auch tangentielle Schubspannungen, die bei einer Übertragung auf Bauteiloberflächen zur Anregung von Transversalwellen führen (vgl. Abschnitt 3.3). Dieser Effekt wird bei der Überprüfung der hier entwickelten Transversalwandler (vgl. Abschnitt 4.1.4) benutzt. Bei einer Messung mit longitudinalen Impulsen in der Baupraxis stört diese Transversalwellenanregung aus drei Gründen nicht:

- a) Der Longitudinalimpuls hat immer eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit, er kommt also vor dem Transversalimpuls am Empfänger an.
- b) Bei der üblichen Ankopplung der Schallprüfköpfe an das Bauteil mittels Öl oder Vaseline werden die zur Anregung der Transversalwelle nötigen Schubspannungen nicht übertragen, da Flüssigkeiten keine Schubspannungen (Querkräfte) aufnehmen können.
- c) Dickenschwinger werden hinsichtlich ihrer Geometrie so optimiert, daß der größte Energieanteil als Longitudinalwelle abgestrahlt wird.

Die unter a) bis c) beschriebenen Effekte lassen also deutlich erkennen, warum ein Dickenschwinger nicht zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit V_T transversaler Impulse geeignet sein kann. Selbst wenn die Effekte b) und c) durch eine feste Ankopplung bzw. durch eine veränderte Wandlergeometrie verringert werden könnten, ließe die höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit V_L (Effekt a), verbunden mit der relativ langen Impulsdauer (vgl. Abb. 5), keine für baupraktische Zwecke ausreichend exakte Messung von V_T zu, was durch folgende Abschätzung gezeigt werden kann:

Wegen $V_L > V_T$ kommt am Empfänger zuerst der Longitudinalimpuls an und blockiert für die Zeit seiner Dauer (ca. $500 \mu\text{s}$) den Empfänger für eine definierte Aufnahme des später ankommenden Transversalimpulses. Erst nach der Zeit $t = \text{"longitudinale Impulslaufzeit} + \text{Impulsdauer"}$ kann also der Transversalimpuls registriert werden. Setzt man für t daher die Laufzeit des Transversalimpulses durch das Bauteil ein, so ergeben sich für Beton mit $V_T \approx 0,6 V_L$ (Erfahrungswert) und $V_L \approx 4000 \text{ m/s}$ Mindestbauteildicken von $2,5 - 3 \text{ m}$, um Longitudinal- und Transversalimpulse am Empfänger getrennt wahrnehmen zu können. Bei geringeren Bauteildicken ist der Anfangspunkt des Transversalimpulses immer in den Longitudinalimpuls "eingebettet" und folglich einer Messung nicht zugänglich (vgl. auch Abb. 16 -19). RENTSCH und KROMPHOLZ (57) geben zwar einen günstigen Sonderfall an, bei dem die gleichzeitige Messung von V_L und V_T gelingt, die Autoren gelangen aber unabhängig davon aufgrund ihrer Untersuchungen zu der Ansicht, daß Dickenschwinger für einen allgemeinen baupraktischen Einsatz nur zur exakten Messung von V_L geeignet sind.

Zur genauen Bestimmung von V_T muß daher für baupraktische Anwendungen nach einem piezoelektrischen Wandler gesucht werden, die die Transversalwelle mit einem wesentlich höheren Energieanteil abstrahlt als die Longitudinalwelle. Diese Energiedifferenz muß so groß sein, daß der entsprechende Empfänger aus dem "Geräuschpegel" des bereits angekommenen Longitudinalimpulses das Eintreffen des Transversalimpulses noch deutlich "heraus hören" kann.

Derartige Anforderungen können bisher nur von sogenannten Scherwandlern (Dickenscherschwingern) erfüllt werden, wie sie gelegentlich für Frequenzen über 2000 kHz in der metallischen Werkstoffprüfung oder mit noch höheren Frequenzen in der Fernsehtechnik verwendet werden. Dieser Wandlertyp läßt

sich aus dem gleichen Material herstellen wie die Dickenschwinger, nur muß hier die Schwingerplatte so polarisiert sein, daß Plattennormale und Polarisation P senkrecht aufeinander stehen. Ein solcher Wandler wird durch die Platte T in Abb. 10 veranschaulicht. Nach einer Metallisierung von Vorder- und Hinterfläche ist diese Schwingerplatte bevorzugt für eine Abstrahlung und - wegen der Umkehrbarkeit des piezoelektrischen Effekts - natürlich auch für den Empfang transversaler Schallwellen geeignet.

Wie schon bei der Besprechung des Dickenschwingers erläutert wurde, kann aus elastizitätstheoretischen Gründen auch bei einem Scherschwinger nicht erreicht werden, daß in den metallisierten Endflächen nur reine Schubspannungen aber keine Druck- und Zugspannungen erzeugt werden. Daher strahlt der Wandler ebenfalls longitudinale und transversale Wellen ab. Durch eine Optimierung der Plattengeometrie kann hier jedoch erreicht werden, daß der Energieanteil der Longitudinalimpulse relativ zu dem der Transversalimpulse gering ist.

4.1.3 Bau und Optimierung eines Transversalwandlers für baupraktische Anwendungen

Eine für die überwiegend transversale Impulsenergieabstrahlung wesentliche Bedingung ist die Forderung, daß die Schwingerdicke d klein gegenüber den Seitenlängen des Wandlers ist. Für Frequenzen über 1000 kHz ist diese Forderung relativ einfach zu erfüllen, für die in der Baupraxis anwendbaren Frequenzen um 50 kHz ergeben sich aber erhebliche Schwierigkeiten.

Die Schwingerdicke bei Frequenzen um 50 kHz läßt sich wieder aus Gleichung (11) berechnen. Da sich die hier verwendeten Piezoelektrika zur Zeit noch in einem nicht abgeschlossenen Entwicklungsprozess befinden, liegen für die meisten Materialien noch keine genauen Werte der Wellenzahl n ($= n_5$) für die Dickenscherschwingung (Transversalschwingung) vor. Zur Abschätzung der Plattendicke eines 50 kHz-Transversalwandlers wurde daher ein Erfahrungswert von $n = 1000 \text{ kHz}\cdot\text{mm}$ eingesetzt. Aus $d = n/f$ (vgl. Gl. 11) ergibt sich dann eine Dicke von $d = 20 \text{ mm}$. Wollte man mit dieser Dicke ein für die Optimierung der Transversalwellenabstrahlung wenigstens erforderliches Verhältnis von Seitenlänge/Dicke = 10 erreichen, müßte die Schwingerplatte die Mindestabmessungen $200 \times 200 \times 20 \text{ mm}$ haben. Abgesehen davon, daß ein Prüfkopf mit 400 cm^2 schallabstrahlender Fläche im baupraktischen Einsatz zu kaum überwindbaren Schwierigkeiten bei

der Ankopplung an ein Bauteil führt, ist auch seine Herstellung technologisch nicht möglich. Die für die Polarisation eines Transversalwandlers nötige hohe elektrische Feldstärke müßte dann während der Sinterung der Keramik wegen der hier zu den Plattenflächen parallelen Polarisation P (vgl. Abb. 10) über die gesamte Seitenlänge von 20 cm aufrecht erhalten werden. Bisher lassen sich jedoch derartige Wandler nur bis zu einer Seitenlänge von 30 mm herstellen.

Für die hier beschriebenen Untersuchungen konnten daher keine Scheiben oder Platten sondern nur kleine Quader aus entsprechend polarisierter, piezoelektrischer Keramik beschafft werden, deren Dicke mit 20 mm bzw. 10 mm festgelegt wurde. Die Seitenlängen variierten zwischen 25 und 50 mm. Es muß hinzugefügt werden, daß bei einer Polarisation parallel zu einer 50 mm langen Seite aus den vorstehend genannten Gründen der Polarisationsgrad nur noch ca. 70 % beträgt. Die Dicke $d = 10$ mm wurde noch zusätzlich ausgewählt, um eine etwas günstigere Quadergeometrie in Richtung einer Platte zu erzielen. Außerdem war es dadurch möglich, das Verhalten der Wandler nicht nur bei 50 kHz sondern auch bei etwa der doppelten Frequenz zu untersuchen.

Alle Keramiken, die von den Herstellern ohne metallisierte Endflächen geliefert worden waren, wurden im Labor mit einer Metallisierung aus Leitsilber versehen. Es hat sich aber gezeigt, daß eine Leitsilbermetallisierung baupraktischen Beanspruchungen ohne zusätzliche Schutzbeschichtung nicht standhält. Die weiteren Untersuchungen wurden daher nur mit Piezoelektrika durchgeführt, die werkseitig bereits mit einer Einbrennmetallisierung versehen waren.

Die Optimierung der Wandlerabmessungen erfolgte gezielt nur an 20 cm dicken Betonbauteilen. Dadurch war gewährleistet, daß der meisttechnisch ungünstigste Fall berücksichtigt wurde, der vorliegt, wenn der Anfangspunkt des Transversalimpulses in den intensitätsstärksten Bereich des vorauslaufenden Longitudinalimpulses fällt. Für die Optimierung bei der Auswahl der günstigsten Wandlerabmessungen war die Erkennbarkeit des Transversalimpulsanfangs auf dem Bildschirm des Meßgeräts die maßgebliche Beurteilungsgröße.

Die besten Empfangsergebnisse wurden mit Wandlern der Abmessungen 25 mm x 50 mm bei einer Dicke von 10 mm bzw. 20 mm erzielt. Eine an diesen Wandlern durchgeführte Frequenzbestimmung ergab, daß bei 20 mm Schwingerdicke Impulse von 58 kHz und bei 10 mm Dicke Impulse von 118 kHz abgestrahlt werden. Die Wandler besitzen einen für ihre Leistungsfähigkeit wichtigen Polarisationsgrad von 100 %, da sie längs der 25 mm langen Seite polarisiert wurden.

Abb. 11 zeigt die in dieser Arbeit hinsichtlich ihrer Abmessungen als optimal ermittelte Schwingkeramik sowie den damit gebauten Schallprüfkopf. Die Schwingkeramik ist durch die Vergußmasse (Uhu-Plus, bei 100 °C ausgehärtet) an der Gehäusewand befestigt und ragt zur Ankopplungserleichterung ca. 1 mm über den Gehäuserand hinaus. Der Abgleich A (Parallelinduktivität (kleiner Resonanztrafo) zur Schwingerkapazität) soll eine optimale Anpassung des Schwingers an das Prüfgerät ermöglichen. Auch ohne einen Abgleich lassen sich aber normalerweise gute Ergebnisse erzielen. Mit besonderer Vorsicht müssen die Anschlußdrähte an die Metallisierung der Schwingkeramik angelötet werden. Am besten eignet sich dazu ein dünner Silberdraht ($\varnothing 0,2 \text{ mm}$) mit einem niedrigschmelzenden Lot, um der Gefahr einer Depolarisierung ($T > T_c$) an den Lötstellen vorzubeugen.

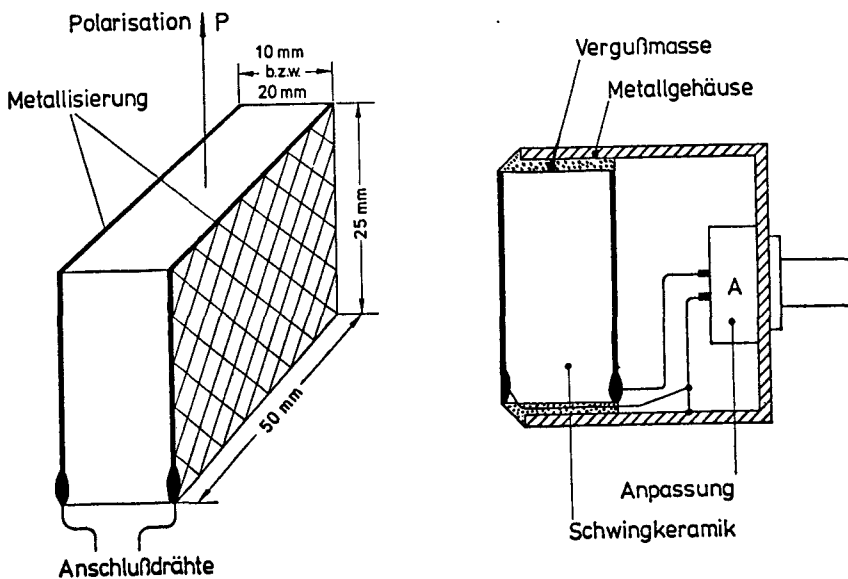


Abb. 11 Schwingkeramikplatte und damit gebauter Schallprüfkopf zur Anregung und zum Empfang transversaler Ultraschallimpulse an Betonbauteilen

Das Prüfkopfgehäuse aus Messing ist - ebenso wie die außenliegende Metallisierung der schallabstrahlenden Wandlerfläche - über die Zuleitung geerdet. Durch die wasserdichte Ausführung ist der gesamte Prüfkopf also elektrisch sicher.

Die Abstrahlfläche war für die hier beschriebenen Untersuchungen nicht durch eine zusätzliche Beschichtung vor mechanischen Beschädigungen geschützt worden. So ergaben sich für die Schallübertragung naturgemäß optimale Verhältnisse. Es hat sich auch gezeigt, daß eine eingebrannte Metallisierung einen zweijährigen Laboreinsatz ohne nennenswerte Schäden übersteht. Ein Schutz der Metallisierung kann durch ein sorgfältig mit Uhu-Plus aufgeklebtes Messingblech erreicht werden. Dabei muß allerdings mit Leistungseinbußen der Prüfanordnung gerechnet werden.

Die hier beschriebenen Sender und Empfänger sind - wenn sie ohne Anpassung A aufgebaut werden - identisch und können beliebig vertauscht werden. Aufgrund ihres robusten Aufbaus sind sie wartungsfrei und bedürfen bei einem baupraktischen Einsatz keiner besonderen Vorsichtsmaßnahmen.

4.1.4 Prüfung des entwickelten Transversalwandlers auf seine baupraktische Anwendbarkeit

Um den Anforderungen eines baupraktischen Einsatzes zu genügen, muß der entwickelte Wandler für das Senden und Empfangen transversaler Impulse - trotz seiner relativ ungünstigen Geometrie - folgende grundsätzliche Bedingungen erfüllen:

- a) Die Intensität der transversalen Impulse muß sowohl am festen als auch am sich verfestigenden Baustoff stets wesentlich größer sein als die der unverweigerlich parallel dazu abgestrahlten Longitudinalimpulse.
- b) Die Laufzeit der Transversalimpulse durch das Bauteil von Sender zu Empfänger muß ebenso genau meßbar sein wie die der Longitudinalimpulse.

Zur Prüfung dieser Bedingungen wurden die Prüfköpfe - über entsprechende Aussparungen in den Gefäßwänden - an einen erstarrenden Gips angekoppelt.

Auf diese Weise konnten das Intensitätsverhältnis J_T/J_L sowie die Ablesegenauigkeit einschließlich deren Veränderungen an den erzeugten Impulsen - beginnend von ihrem ersten Erscheinen in dem äußerlich noch flüssigen Gipsbrei bis zu dessen völliger Erhärtung - auf dem Bildschirm des Prüfgerätes beobachtet werden.

Zur sicheren Beantwortung der Frage, ob der von dem entwickelten Wandler erzeugte Impuls auch tatsächlich der Transversalwelle zugeordnet werden kann, wurde die bereits erläuterte Tatsache benutzt, daß die herkömmlichen Dickenschwinger zur Longitudinalimpulsanregung auch Transversalimpulse abstrahlen, die unter bestimmten Voraussetzungen auch beide getrennt nachgewiesen werden können. Daß diese Voraussetzungen in hydraulischen Baustoffen aufgrund ihrer geringen Schallgeschwindigkeit zu Erstarrungsbeginn ($V_L < 100$ m/s) gegeben sind, zeigt folgende Abschätzung:

$$V_L \sim 100 \text{ m/s}, \quad V_T \sim 60 \text{ m/s} \text{ (wegen } V_T \sim 0,6 V_L \text{)}.$$

Für einen Schallweg $L = 10$ cm ergeben sich folgende Impulslaufzeiten:

$$t \text{ (longitudinal)} = \frac{10 \text{ cm}}{10000 \text{ cm/s}} = 10^{-3} \text{ s} = 1000 \mu\text{s}$$

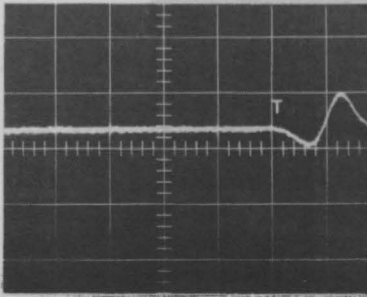
$$t \text{ (transversal)} = \frac{10 \text{ cm}}{6000 \text{ cm/s}} \approx 1700 \mu\text{s}$$

Bei einer Longitudinalimpulslänge von $500 \mu\text{s}$ (vgl. Abb. 5) ist der Empfänger aber schon nach $t \text{ (longitudinal)} + 500 = 1500 \mu\text{s}$ wieder für die Aufnahme des Transversalimpulses frei. Wegen des im Hinblick auf die Longitudinalimpulslänge größeren Abstandes der beiden Impulse können sie beide auf dem Bildschirm des Prüfgerätes zur Anzeige gebracht werden. Mit diesem Transversalimpuls kann dann zu Beginn der Gipserstarrung der von den hier entwickelten Transversalwandlern erzeugte und empfangene Impuls verglichen werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden daher an den Gipsbrei zusätzlich zwei Dickenschwinger angekoppelt, die durch einen Umschalter ebenfalls an das Prüfgerät angeschlossen werden konnten.

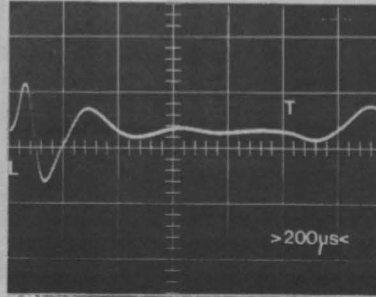
Zum Vergleich der Impulsbilder wurde das Schirmbild des Oszillographen während der Gipserstarrung fotografiert. Die Abb. 12 - 19 zeigen Schirmbildaufnahmen, die sich wahlweise durch den Anschluß der Dickenschwinger (b) bzw. der entwickelten Transversalwandler (a) an das Prüfgerät ergaben. Zwischen zwei Aufnahmen a und b liegt jeweils eine durch Filmtransport und Prüfkopfschaltung bedingte Zeitspanne von 15 - 20 s. Die einzelnen Aufnahmezeitpunkte, gerechnet vom Anmachen des Gipsbreis, sind neben den Abbildungen angegeben. Da die verwendete Oszillographenkamera nicht den gesamten Bildschirm abbildet, wurde durch elektronische Dehnung der Zeitachse (x-Achse) bzw. durch unterschiedliche Impulsverstärkung (y-Achse) der Bildschirmausschnitt stets so gewählt, daß Impulsanfänge und Impulsformen bei longitudinaler und transversaler Anregung im interessierenden Bereich erfaßt werden konnten. Die Einsatzpunkte des Longitudinalimpulses sind jeweils durch das obere Ende von "L", die des Transversalimpulses durch den Fußpunkt von "T" gekennzeichnet worden. Bei den Abb. 13 - 19 entspricht dem linken Bildrand jeweils die Laufzeit $t = 0 \mu\text{s}$. Lediglich bei Abb. 12 mußte aus aufnahmetechnischen Gründen der linke Bildrand auf die Laufzeit $t = 450 \mu\text{s}$ eingestellt werden.

Aus dieser während der Gipserstarrung aufgenommenen Bildserie lassen sich folgende Ergebnisse ablesen:

- a) Der von den hier entwickelten Transversalwandlern gesendete und empfangene Impuls ist der Transversalimpuls. Sein Anfangspunkt stimmt - soweit sich das in der Anfangsphase der Erstarrung verfolgen läßt - stets mit dem des von den Dickenschwingern angezeigten Transversalimpulses überein.
- b) Trotz relativ ungünstiger Wandlergeometrie ist die von dem Transversalwandler abgestrahlte Impulsenergie (\approx Amplitudenhöhe) so hoch, daß sich der Transversalimpuls am verfestigenden und am festen Baustoff deutlich von dem ebenfalls erzeugten Longitudinalimpuls abhebt (Abb. 12 a - 19 a).
- c) die Änderung der Transversalwellengeschwindigkeit läßt sich mit Dickenschwingern nur zu Verfestigungsbeginn erkennen. Der Transversalimpuls läuft mit fortschreitender Erhärtung - wegen der damit verbundenen steigenden Schallgeschwindigkeiten - in den Longitudinalimpuls hinein und kann dort schließlich nicht mehr geortet werden (Abb. 12 b - 19 b).



(a)

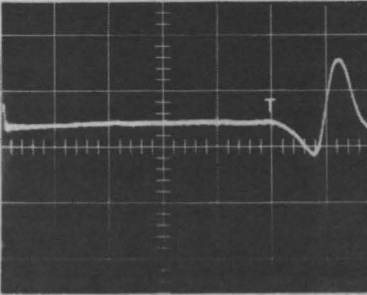


(b)

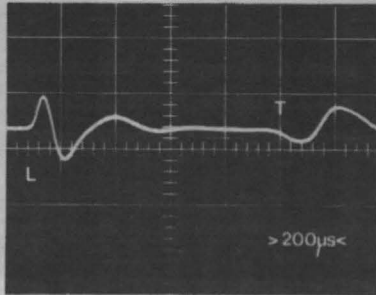
Abb. 12

t = 7,0 min

>200µs<



(a)

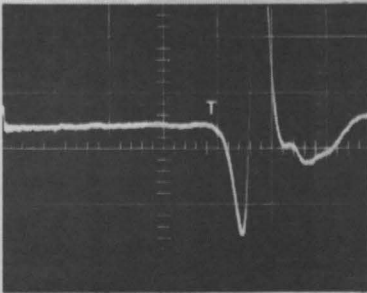


(b)

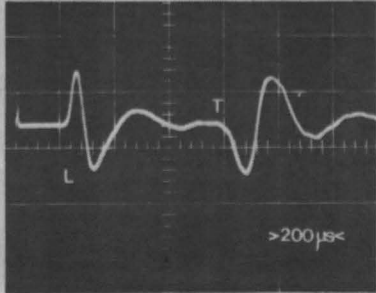
Abb. 13

t = 7,5 min

>200µs<



(a)

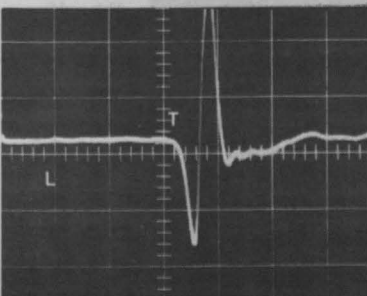


(b)

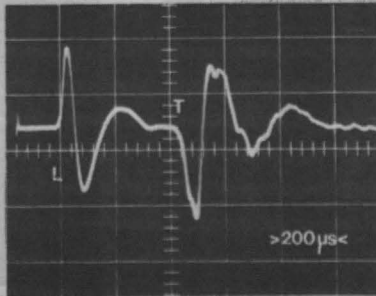
Abb. 14

t = 8,7 min

>200µs<



(a)



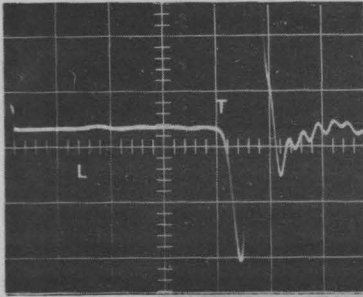
(b)

Abb. 15

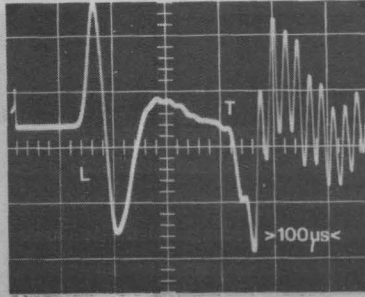
t = 10,0 min

>200µs<

Abb. 12-15 Zeitliche Entwicklung der Impulsformen während der Erhärtung von Gips, aufgenommen unter der Verwendung von Dickenschwingern (a) und Dickenschwingern (b). Der Einsatzpunkt des Longitudinalimpulses ist mit "L", der des Transversalimpulses mit "T" gekennzeichnet. (Fortsetzung bei Abb. 16-19)



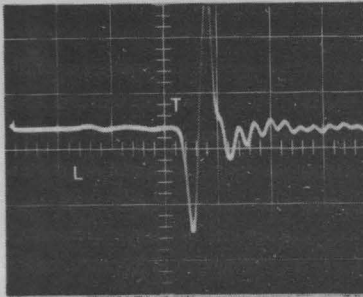
(a)



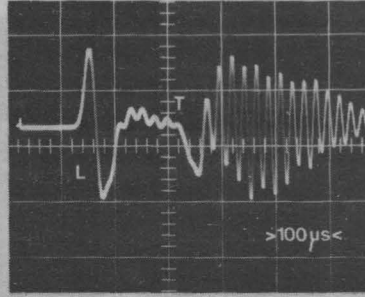
(b)

Abb. 16

t = 12,3 min



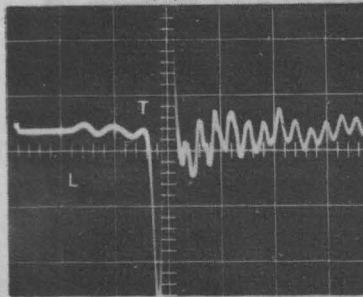
(a)



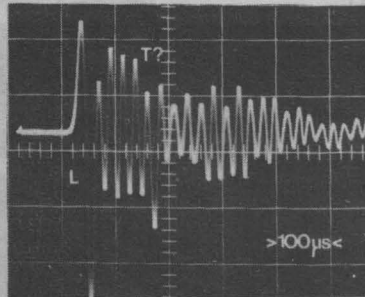
(b)

Abb. 17

t = 13,5 min



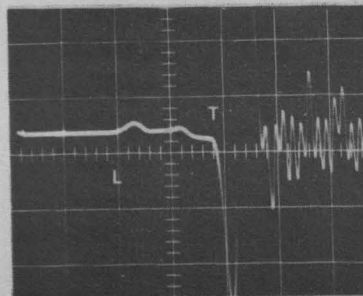
(a)



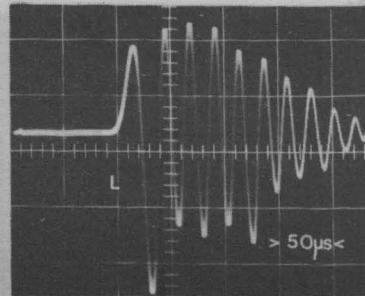
(b)

Abb. 18

t = 15,5 min



(a)



(b)

Abb. 19

t = 19,0 min

bb. 16-19 Zeitliche Entwicklung der Impulsformen während der Erhärtung von Gips, aufgenommen unter der Verwendung von Dickenschwängern (a) und Dickenschwängern (b). Der Einsatzpunkt des Longitudinalimpulses ist mit "L", der des Transversalimpulses mit "T" gekennzeichnet. (Fortsetzung von Abb. 12-15)

d) Zu Beginn der Erstarrung lassen sich V_L und V_T nur mit Dickenschwingern, am erhärteten Baustoff nur mit Transversalwandlern gleichzeitig bestimmen (vgl. Abb. 12 und 19). Erläuternd muß zu den Aufnahmen noch vermerkt werden, daß der Geräteverstärker bei Abb. 12 auf 500-fache, in Abb. 19 aber nur auf 10-fache Verstärkung eingestellt war. Die Impulsverstärkung konnte von Aufnahme zu Aufnahme herabgeregelt werden, da die Schalleitfähigkeit während der Baustoffhärtung zunimmt. Die Verstärkungsreserve von Abb. 19 gegenüber Abb. 12 kann also (am Prüfgerät) dazu benutzt werden, den relativ niedrigen Longitudinalimpuls in Abb. 19 a so zu verstärken, daß sein Anfangspunkt L für die Laufzeitmessung deutlich sichtbar wird.

Die Ergebnisse a) - d) zeigen, daß nur der entwickelte Transversalwandler eine Messung mit Transversalimpulsen an erhärtenden und festen Baustoffen gut ermöglicht. Das wird hinsichtlich erhärteter Baustoffe auch durch die Schirmbildaufnahmen der Abb. 20 bestätigt, die sich bei einer Ankopplung der Wandler an 20 cm bzw. 50 cm dicke Betonbauteile ergaben.

4.1.4.1 Meßgenauigkeit beim Einsatz von Transversalwandlern

Für eine baupraktische Verwendbarkeit der Transversalwandler - beispielsweise bei der Ermittlung elastischer Konstanten - ist es natürlich ebenso von Bedeutung, wie genau sich bei einer Schallgeschwindigkeitsmessung der Anfangspunkt des Transversalimpulses in dem mit relativ geringer Intensität vorauslaufenden Longitudinalimpuls bestimmen läßt. Beim Longitudinalimpuls, dessen Anfangspunkt sich durch die Ablenkung des Oszillographenstrahls aus der Horizontalen ergibt, muß bei der Messung der Zeitmaßstab auf dem Bildschirm stark gedehnt und der Verstärker auf den günstigsten Maximalwert eingestellt werden. Abb. 21 zeigt den Anfangspunkt des Longitudinalimpulses von Abb. 19 b bei einem Zeitmaßstab von $1 \mu\text{s}/\text{cm}$ und einer 5-fachen (a) bzw. 500-fachen (b) Impulsverstärkung. Es ist deutlich zu erkennen, wie der geringe Anstieg der Impulsflanke (a) den tatsächlichen Anfangspunkt nur schwer erkennen läßt. Erst die hohe Verstärkung (b) läßt die dadurch hervorgerufene Steilheit des Impulsanstiegs jetzt dessen Anfangspunkt gut erkennen. Die durch die unterschiedliche Verstärkung bedingte Meßwertdifferenz beträgt ca. $1 \mu\text{s}$. Eine steile Anstiegsflanke ergibt sich naturgemäß auch bei kleiner Zeitdehnung (vgl. Abb. 19 b, $1 \text{ cm} = 50 \mu\text{s}$), jedoch muß bei einer Ablesung dann in Kauf genommen werden, daß der Schreibstrahl des Oszillographen mit ca. 0,5 mm

Breite selbst schon einer Zeit von $2,5 \mu\text{s}$ entspricht. Die Genauigkeit der longitudinalen Laufzeitmessung wird daher von der Steilheit der Impulsanstiegsflanke bestimmt, die sich bei starker Z-Verdichtung und größtmöglicher Verstärkung auf dem Bildschirm des Prüfgeräts erreichen läßt, was letztlich von der empfangenen Impulsintensität abhängt. Die Meßgenauigkeit bei einer Verwendung longitudinaler Impulse wird daher zwischen $0,1 \mu\text{s}$ (hohe Empfangsintensität) und $1 - 2 \mu\text{s}$ (geringe Empfangsintensität) schwanken.

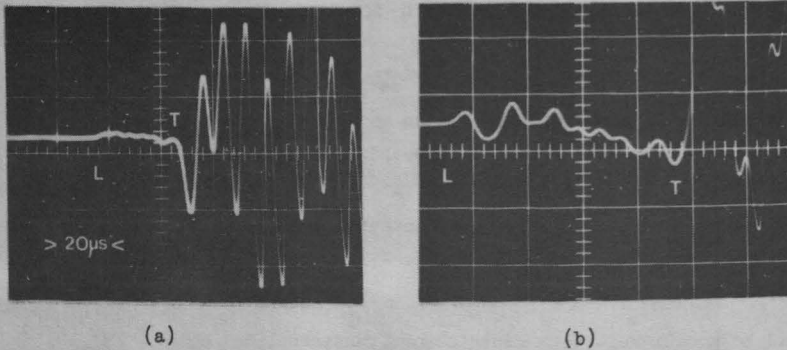


Abb. 20 Laufzeitmessungen mit transversalen Ultraschallimpulsen an 20 cm dicken (a) und 50 cm dicken (b) Betonbauteilen

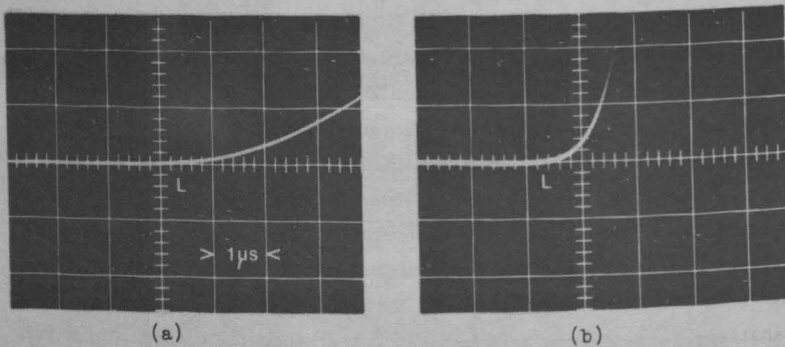


Abb. 21 Anfangspunkt eines Longitudinalimpulses in Abhängigkeit von der Impulsverstärkung
a) 5-fach, b) 500-fach

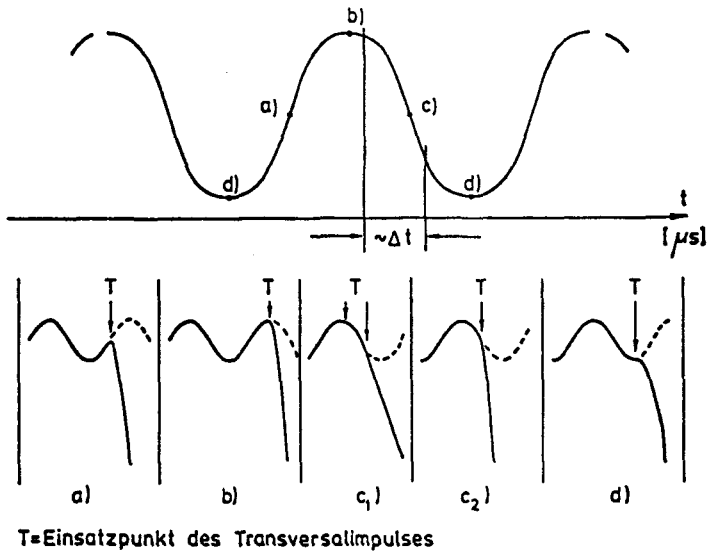


Abb. 22 Mögliche Einsatzpunkte des Transversalimpulses in der ihm vorangehenden Schwingung des Longitudinalimpulses (schematisch)

Der Einsatzpunkt des Transversalimpulses lässt sich normalerweise nicht durch eine Ablenkung des Oszillographenstrahles aus der Horizontalen erkennen, da er in die Schwingungen des Longitudinalimpulses eingebettet ist. Abb. 22 zeigt in einer Prinzipskizze die für eine Diskussion der Erkennbarkeit des Transversaleinsatzes wesentlichen Punkte a, b, c, d innerhalb einer vorauslaufenden longitudinalen Schwingung. Keine Schwierigkeiten bei der Ablesung ergeben sich, wenn der Anfang des Transversalimpulses in den Abschnitt d - a - b der longitudinalen Schwingung fällt, da hier die Steigungen der beiden Impulsamplituden entgegengesetzte Vorzeichen haben. Es zeigen sich im Vergleich zur vorauslaufenden Schwingung relativ scharfe "Abknicke" im Kurvenverlauf (a). Der Einsatzpunkt an der Stelle (d) ruft meistens eine kleine Stufe hervor, während er bei (b) durch eine schärfere Amplitudenspitze angezeigt wird. Ungünstig liegen die Verhältnisse auf dem Abschnitt b - c - d, da hier die Impulssteigungen gleiche Vorzeichen aufweisen. Ein

Abknicken ist hier nur dann zu beobachten, wenn sich die Intensitäten - und damit die Beträge der beiden Impulssteigungen - in ausreichendem Maße voneinander unterscheiden (vgl. Abb. 22, C 1). Kommt es wegen zu geringer Intensitätsunterschiede - beispielsweise durch schlechte Ankopplung der Schallwandler an ein Bauteil - nicht zur Ausbildung einer Knickstelle am Einsatzpunkt des Transversalimpulses (vgl. Abb. 22, C 2), hat die Meßunsicherheit etwa den Betrag Δt , dessen Größe von der Prüffrequenz f abhängt.

4.1.4.2 Einfluß der Prüffrequenz auf die Erkennbarkeit des Transversalimpulseinsatzes und Auswahl der Frequenz

Der absolute Meßfehler Δt bei der Laufzeitmessung wird außer von dem Intensitätsverhältnis zusätzlich von der Prüffrequenz des benutzten Transversalwandlerpaares erheblich beeinflusst. Bei den im Bauwesen üblichen Frequenzen um $f = 50$ kHz dauert eine Schwingung des Wändlers $20 \mu s$ (vgl. Abschnitt d - d auf der Zeitachse in Abb. 22). Δt ist dann im Fall C 2 von Abb. 22 ungünstigstenfalls von der Größe $5 - 6 \mu s$. Alle Untersuchungen dieser Arbeit wurden daher mit dem 120 kHz-Schwinger durchgeführt (Schwingungsdauer $8,3 \mu s$), so daß sich Δt bei sehr schlechter Erkennbarkeit des Transversalimpulseinsatzes auf ca. $2 - 2,5 \mu s$ verringerte. Dieser ungünstige Fall wird bei sorgfältiger Ankopplung der Prüfköpfe jedoch kaum auftreten, so daß sich im baupraktischen Einsatz - ebenso wie bei longitudinalen Impulsen - ein Meßfehler unter $1 \mu s$ ergibt.

Da Δt in seinem Absolutbetrag von der Größe der Impulslaufzeit t - und damit von der Bauteildicke - unabhängig ist, wird man zur Bestimmung von V_T bei Bauteildicken unter 1 m zweckmäßigerweise auf Transversalwandler mit Frequenzen zwischen 100 und 150 kHz zurückgreifen. Bei größerer Bauteildicke empfehlen sich wegen der höheren Reichweite Transversalwandler um 50 kHz. So läßt sich bei guter Ankopplung auf jeden Fall erreichen, daß der relative Meßfehler $\Delta t/t$ klein bleibt.

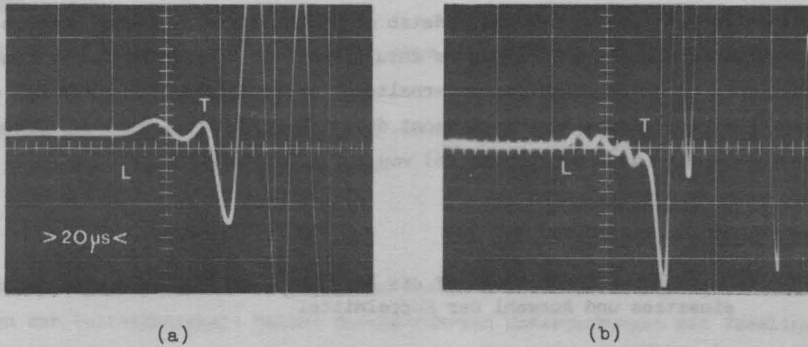


Abb. 23 Erkennbarkeit des Transversalimpulseinsatzes in Abhängigkeit von der Prüffrequenz - (a) 58 kHz, (b) 118 kHz

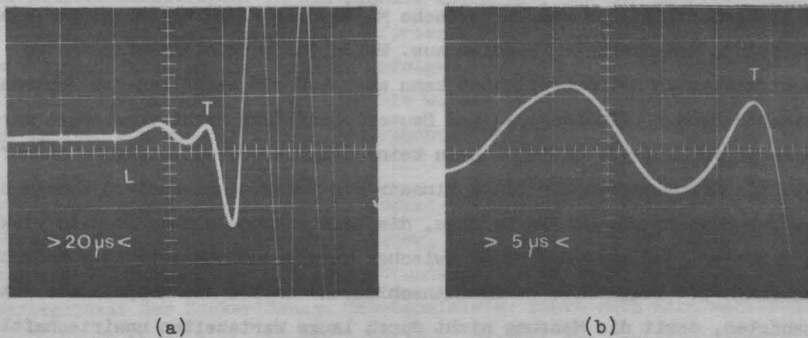


Abb. 24 Erkennbarkeit des Transversalimpulseinsatzes in Abhängigkeit von elektronischer Zeitdehnung und Impulsverstärkung
Verstärkung: (a) 2-fach, (b) 25-fach

Wie sich die Meßfrequenz bei einer Ankopplung an das gleiche Bauteil auf die Lesbarkeit des Schirmbildes auswirkt, ergibt sich aus Abb. 23 a ($f = 58 \text{ kHz}$) und Abb. 23 b ($f = 118 \text{ kHz}$). Auch bei der Laufzeitmessung mit transversalen Impulsen ist es ratsam, den Zeitmaßstab möglichst stark zu dehnen und die Impulsverstärkung diesem Vorgang so anzupassen, daß das Schirmbild optimal lesbar wird. Abb. 24 zeigt die so erhaltene "elektronische Vergrößerung" des Transversaleinsatzpunktes. Man erkennt deutlich, daß der Einsatz der Transversalwelle hier nach dem Schema (b) von Abb. 22 erfolgt.

4.1.4.3 Einfluß der Ankopplung auf die Erkennbarkeit des Transversalimpulsesinsatzes und Auswahl der Koppelmittel

Wie im Abschnitt 3.3 ausführlich dargelegt wurde, bedarf es zur Erregung eines Transversalimpulses an der Bauteiloberfläche einer Tangentialkraft (Schubspannung). Da Flüssigkeiten keine Schubspannungen (Querkräfte) übertragen können, scheiden als Koppelmedien die bei der Laufzeitmessung longitudinaler Impulse so bewährten Stoffe wie Vaseline, dickflüssige Öle, wasserlöslicher Kleister oder plastische Massen wie z. B. Nakiplast für eine Ankopplung transversaler Wandler aus. Wegen der vergleichsweise großen Rauigkeiten an Betonoberflächen kann aber auf ein Ausfüllen der Hohlräume zwischen Sender- (Empfänger-) und Bauteiloberfläche nicht verzichtet werden, da andernfalls (vgl. Gl. 9) nahezu keine Schallenergieübertragung stattfindet. Als Koppelmedien für einen Einsatz von Transversalwandlern kommen daher nur aushärtende Stoffe infrage, die beim Ankoppeln aber noch so viskos sein müssen, daß alle Hohlräume zwischen Wandler und Bauteil beim Andrücken der Prüfköpfe ausgefüllt werden. Anschließend sollte die Koppelmasse schnell aushärten, damit die Messung nicht durch lange Wartezeiten unwirtschaftlich wird. Bleibt die Koppelmasse plastisch oder härtet sie nur unvollständig aus, wird davon die Energie des Transversalimpulses am stärksten betroffen, denn der Longitudinalimpuls wird auch von der flüssigen bzw. plastischen Koppelmasse nahezu vollständig übertragen. Es ergeben sich daher longitudinale und transversale Impulsintensitäten von etwa gleicher Größenordnung und damit auch etwa gleiche Steigungen an den Impulsflanken. Eine unvollständige Ankopplung führt daher zu Schirmbildern, in denen der Einsatz des Transversalimpulses nur ungenau (vgl. Abb. 22, C 2) oder gar nicht erkennbar ist.

Für einen baupraktischen Einsatz muß ein Koppelmittel für Transversalwandler - neben der Eigenschaft, schnell auszuhärten - zwei weitere Anforderungen erfüllen:

- a) Sender und Empfänger müssen sich ohne Beschädigungen wieder vom Bauteil ablösen lassen.
- b) Das Koppelmittel muß einfach und restlos von den Prüfköpfen und der Bauteiloberfläche zu entfernen sein.

Schnellhärtende Kleber wie X 60 oder Stabilit sind daher ungeeignet. Neben den der Vollständigkeit halber durchgeführten Untersuchungen mit Vaseline, Öl und Nakiplast wurden auch Gips, Methylan (Tapetenkleister) sowie heiße Zuckerlösung und eine industrielle Koppelmasse⁺ in die Versuche einbezogen. Die besten Ergebnisse ergaben sich mit heißer Zuckerlösung. Die Masse (Zucker plus 15 Gew.-% Wasser) wird installationsunabhängig auf einem kleinen, flüssiggasbetriebenen Laborbunsenbrenner erhitzt und mit einem Pinsel noch heiß auf das Bauteil aufgetragen. Da sie schnell aushärtet, muß der Schallwandler sofort anschließend durch leichtes Aufpressen angekoppelt werden. Die Messung kann bereits nach wenigen Minuten erfolgen. Rückstände der Zuckerlösung auf Bauteil und Prüfköpfen lassen sich mit Wasser leicht entfernen, zum Ablösen der Wandler vom Bauteil genügt ein feuchter Pinsel.

Abb. 25 zeigt von oben nach unten Koppelversuche an der gleichen Stelle eines Betonbauteils mit Gips, Tapetenkleister, Koppelpaste ZGY und Zuckerlösung jeweils nach 3 Minuten (a) und einer Stunde (b). Hier zeigt sich deutlich die Überlegenheit der Zuckerlösung. Tapetenkleister führt auch nach mehrstündiger Wartezeit nicht zu lesbaren Schirmbildern. Die bei der Schweißnahtprüfung mit Erfolg einsetzbare Paste ZGY kann für baupraktische Zwecke an Betonoberflächen nicht verwendet werden. Bei Gips dauert es ca. 10 min ehe der Transversalimpulseinsatz deutlich erkannt werden kann. Nachteilig wirkt sich hier aus, daß er sich nur schwer wieder von der Bauteiloberfläche entfernen läßt.

+) ZGY der Fa. Krautkrämer

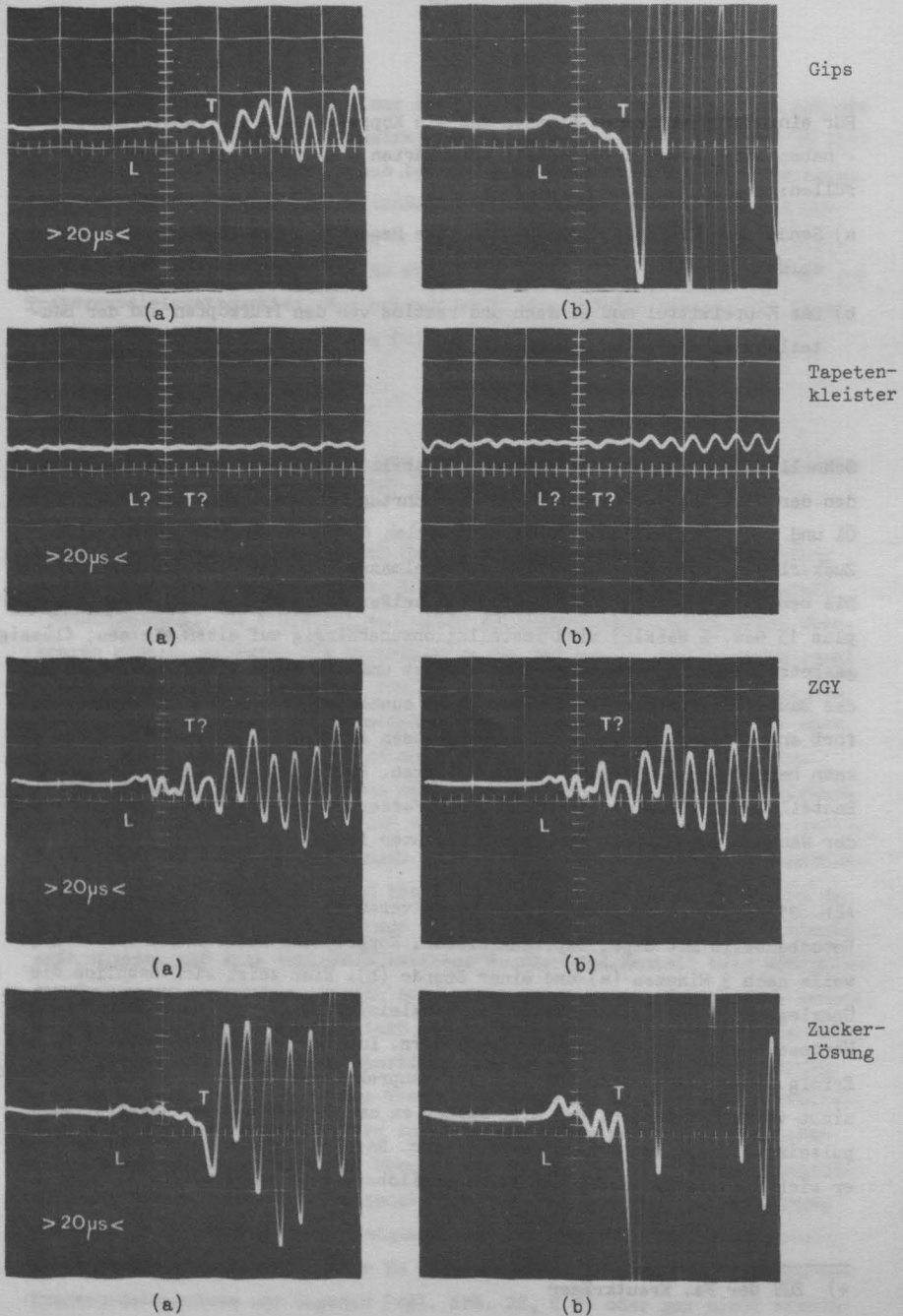


Abb. 25 Koppelversuche mit Gips, Tapetenkleister, industrieller Koppelpaste ZGY und Zuckerlösung bei der Durchschallung eines Betonbauteils mit Transversalimpulsen. (a) 3 min und (b) 60 min nach der Ankopplung.

4.2 Ankopplungsverfahren für eine reproduzierbare Intensitätsmessung

4.2.1 Intensitätsverlust in Bauteilen aus Beton und seine Ursachen

Bei der Durchschallung eines Bauteils zur Schallgeschwindigkeitsbestimmung kann auf dem Bildschirm eines Ultraschall-Oszillographen oft beobachtet werden, daß sich die Intensität ("Lautstärke") des empfangenen Ultraschall-Impulses trotz konstanter Bauteildicke von Meßstelle zu Meßstelle ändert. Eine Intensitätsänderung äußert sich bei gleicher Verstärkereinstellung des Empfängers im Oszillographenbild in unterschiedlichen Höhen h (vgl. Abb. 26) der ersten Impulsamplitude⁺). Geht man davon aus, daß das Prüfgerät (Impulsgenerator, Empfangsverstärker) und die Schallprüfköpfe (Sender, Empfänger) während einer Messung keinen Leistungsschwankungen unterworfen sind, kann die unterschiedliche Impulsempfangsintensität sowohl in der Güte der Ankopplung vom Sender und Empfänger an das Bauteil als auch in der Schallschwächung des jeweiligen Baustoffes begründet sein. Um im Rahmen einer zerstörungsfreien Baustoffprüfung Aussagen über Materialeigenschaften erhalten zu können, ist es unbedingt erforderlich, die Intensitätsanzeige von den Einflüssen der Prüfkopfankopplung zu befreien. Sind derartige meßtechnischen Voraussetzungen geschaffen, erhebt sich naturgemäß sofort die Frage, welche stofflichen Eigenschaften oder Strukturänderungen eines Bauteils mit der Impulsintensität nachgewiesen werden können. Zur Beurteilung der Aussagemöglichkeiten einer Intensitätsmessung mit Ultraschall-Impulsen müssen daher die Ursachen einer Schallschwächung in Beton kurz erläutert werden:

Die Impulsenergie wird beim Durchschallen eines Bauteils durch Absorption, Streuung sowie durch Reflexion und Brechung abgemindert. Als vierter Effekt tritt noch die geometrische Schallschwächung hinzu. Aus letzterer können keine Rückschlüsse auf die Baustoffeigenschaften gezogen werden. Sie

+) Physikalisch gesehen ist die Amplitudenhöhe ein Maß für den Schalldruck p . Da die Intensität $J \sim p^2$ ist, hat es sich allgemein eingebürgert, bei Messungen dieser Art von Intensitätsmessungen zu sprechen.

ist eine Folge der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Schallausbreitung im Beton, die auf Kugelflächen um den Sender herum erfolgt und daher zu einer dem Quadrat des Abstandes x zwischen Sender und Empfänger umgekehrt proportionalen Intensitätsschwächung führt ($J \sim 1/x^2$).

Die echte Absorption beruht auf den Teilchenbewegungen (longitudinale oder transversale Schwingungen), die die Elementarbausteine eines Baustoffes beim Durchgang eines Schallimpulses erfahren. Dabei kommt es durch innere Reibungsprozesse zu einer Umwandlung von Bewegungs- in Wärmeenergie, was zwangsläufig zu einer Dämpfung der Schallschwingungen führt. Dieser Effekt spielt sich bei Schwingungswerten der Stoffteilchen von nur 10^{-9} m in den mikroskopischen Bereichen der durchschallten Materie ab, so daß Intensitätsänderungen durch echte Absorption bei Beton nur durch Veränderungen des Zementsteins (Zementart, Zementanteil, W/Z-Wert, Hydratationsgrad) und des Zuschlags (Art und Menge, nicht Sieblinie!) hervorgerufen werden können. Besonders der Hydratationsgrad wird bei jungem Beton von großem Einfluß auf die echte Absorption sein.

Streuung tritt beim Durchschallen eines Bauteils immer dann auf, wenn der Impuls auf Inhomogenitäten trifft, deren Durchmesser kleiner als die Wellenlänge λ sind. Liegt der Durchmesser noch unter 1 % der Wellenlänge, werden die Inhomogenitäten vom Schallimpuls praktisch nicht wahrgenommen. Die Streuung steigt jedoch etwa mit der 3. Potenz des Durchmessers an, so daß Inhomogenitäten mit Durchmessern von 10 % der Wellenlänge den Impulsdurchgang bei großen Weglängen schon vollständig verhindern können. Eine Inhomogenität liegt immer dann vor, wenn sich an einer Grenzfläche die Schallwiderstände $W = \rho \cdot V$, also ρ und/oder V , sprunghaft ändern (vgl. Gl. 9). Bei Beton mit Wellenlängen zwischen 5 - 10 cm (vgl. Abschnitt 3.3) werden daher Poren und Zuschlagkörner mit Durchmessern von 1 mm und darüber sowie Mikrorisflächen die Streuung verursachen. Die Intensitätsabnahme ist dabei naturgemäß eine Funktion der Streuzentrendichte (vgl. Lichtstreuung bei Nebel). Vereinzelte Inhomogenitäten der beschriebenen Größenordnung werden daher nicht wahrgenommen. Für den Baustoff Beton besteht daher die Möglichkeit - beispielsweise an Serienbauteilen - unterschiedliche Verdichtung (erhöhte Porenzahl) oder Veränderungen der Sieblinie durch deren Einflüsse auf die Schallstreuung nachzuweisen.

Reflexion und Brechung werden erst wirksam, wenn die Abmessungen der Inhomogenitäten die Größenordnung der Wellenlänge erreicht haben und überschreiten. Im Baustoff Beton können daher je nach Wellenlänge bzw. Prüffrequenz (vgl. Gl. 2) schon Zuschlagkörner, Hohlräume, Kiesnester und Rißflächen mit Durchmessern über 5 cm senkrecht zur Impulsausbreitungsrichtung zu einer Intensitätsabminderung führen. Bei Bauteildicken unter 30 cm werden sich durch eine Impulsreflexion und die dadurch bedingte Abschattung des Empfängers - im Gegensatz zur Streuung - auch schon einzelne Inhomogenitäten nachweisen lassen. Ausführliche Vorstellungen der physikalischen, hier aus der Sicht einer Betonprüfung geschilderten Sachverhalte finden sich bei BERGMANN, KRAUTKRÄMER und MATAUSCHEK (22, 23, 24).

Durchläuft der Schallimpuls ein Betonbauteil, nimmt seine Intensität aufgrund der vorgenannten Effekte bei einer Schallausbreitung auf Kugelflächen nach der in Gleichung 12 angegebenen Exponentialfunktion ab.

$$(12) \quad J = k \left(\frac{\pi}{x}\right)^2 J_0 e^{-\alpha x}$$

α = Schwächungskoeffizient der Intensität

x = Abstand Sender - Empfänger

J_0 = Impulsintensität beim Aussenden

k = Intensitätsverlust durch Ankopplung.

Der Schwächungskoeffizient α ist (bei fester Frequenz) eine Materialkonstante und kann aus zwei Intensitätswerten (J_1, J_2) bei unterschiedlichem Abstand Sender - Empfänger (x_1, x_2) ermittelt werden (87, 88). Nach Einsetzen dieser Werte in Gleichung 12 und anschließender Division der Gleichungen durcheinander, kürzen sich der meßtechnisch nicht erfaßbare Intensitätswert J_0 sowie - reproduzierbare Ankopplung vorausgesetzt - auch die Kopplungsverluste k aus der Rechnung heraus. Man erhält für den Schwächungskoeffizienten der Intensität aus

$$J_1 = k \cdot \left(\frac{\pi}{x_1}\right)^2 \cdot J \cdot e^{-\alpha x_1} \quad \text{und} \quad J_2 = k \cdot \left(\frac{\pi}{x_2}\right)^2 \cdot J_0 \cdot e^{-\alpha x_2} :$$

$$(13) \quad \alpha = \frac{\ln(J_1 x_2) - \ln(J_2 x_1)}{x_2 - x_1}$$

In α sind naturgemäß die Einflüsse von echter Absorption, Streuung, Brechung und Reflexion zusammengefaßt:

$$(14) \quad \alpha = \alpha_a \cdot \alpha_s \cdot \alpha_r$$

(a = echte Absorption, s = Streuung, r = Reflexion)

Da der Ultraschallempfänger nicht zwischen α_a , α_s oder α_r differenzieren kann sondern pauschal α angibt, ist auch nicht feststellbar, welcher der genannten Effekte den Schwächungskoeffizienten jeweils am stärksten beeinflusst hat.

So ist es auch zu erklären, daß sich bei Versuchen verschiedener Autoren, (vgl. z. B. 25, 28) die Aussagekraft der zerstörungsfreien Druckfestigkeitsprüfung über eine Messung von V_L durch Hinzunahme einer Intensitätsmessung zu verbessern, keine Korrelation zwischen α und der Druckfestigkeit β ergab: die Änderung der für die Druckfestigkeit entscheidenden Zementsteingüte schlägt sich in erster Linie in α_a nieder, die Absorption α_a wird aber am erhärteten Beton normalerweise durch die Überwiegenden Einflüsse von Streuung α_s und Reflexion α_r verdeckt.

Aus den genannten Gründen erscheint daher eine Bestimmung des Schwächungskoeffizienten α am Baustoff Beton für die Zwecke einer zerstörungsfreien Materialprüfung bisher von geringem Nutzen. In Anlehnung an die in der zerstörungsfreien Metallprüfung so erfolgreichen Verfahrensweise, Materialfehler, aber keine Materialkonstanten zu bestimmen, wird in dieser Arbeit die Intensitätsmessung in Richtung eines relativen Meßverfahrens zum Nachweis von Strukturfehlern oder -veränderungen weiter entwickelt. Primär geht es dabei um die Schaffung einer reproduzierbaren Ankopplungsmöglichkeit.

4.2.2 Ankopplungsverfahren und Auswahl von Ankopplungsmedien für eine reproduzierbare Schallübertragung

Zur Bestimmung von Absolutwerten der Schallschwächungskonstante α , beim Einsatz relativer Intensitätsmessungen im Rahmen einer Druckfestigkeitskontrolle oder bei der Beobachtung von Rißentwicklungen an Bauteilen unter Last wurde bereits eine Vielzahl von Ankopplungsverfahren benutzt. Die möglichen Verfahren lassen sich hinsichtlich der verwendeten Koppelmittel prinzipiell in drei Gruppen unterteilen:

a) Aushärtende Koppelmittel

Bei diesem Verfahren werden Schallsender und -empfänger an das Bauteil angeklebt. Verwendet läßt sich dafür jedes aushärtende Bindemittel, sofern es nach Versuchsende ein leichtes Ablösen der Prüfköpfe von der Prüfkörperoberfläche und ein einfaches Entfernen seiner Rückstände von Bauteil und Schallwandlern ermöglicht. Außerdem muß als wichtigste Eigenschaft verlangt werden, daß nach dem Aushärten der Koppelmasse jeweils die gleichen Schallübertragungsverhältnisse zwischen Prüfköpfen und Bauteil vorliegen. Bisher ist kein aushärtendes Bindemittel bekannt, das diese für die Betonprüfung unerläßlichen Bedingungen in jeder Hinsicht befriedigend erfüllt. Auch die bei der Transversalwellenankopplung so erfolgreiche heiße, eingedickte Zuckerlösung versagt hier, da nicht erreicht werden kann, daß die für eine reproduzierbare Schallübertragung erforderliche Kristallisation (Aushärtung) in gleicher Weise abläuft. Daher entstehen Koppelschichten mit unterschiedlichen Übertragungseigenschaften. In diese Untersuchung wurde auch die in der Baupraxis häufig eingesetzte Ankopplung mit Gips einbezogen. Es hat sich gezeigt, daß unterschiedliche Anmach- und Erstarrungsbedingungen bei einer mehrfachen Ankopplung an der gleichen Stelle eines Bauteils zu Standardabweichungen in einer Meßreihe von 25 % führen können. Ungünstig wirkt sich bei Gips außerdem das oft ankündigungslose Versagen der Koppelschicht aus (Prüfkopf fällt ab). Für eine relative Intensitätsmessung an gleichen Bauteilen einer Serie oder an mehreren Meßpunkten desselben Bauteils sind daher aushärtende Koppelmittel zum Zweck einer reproduzierbaren Schallübertragung ungeeignet.

Wenn es jedoch darum geht, beispielsweise die Kinetik einer Rißentwicklung an Bauteilen unter Lasteinwirkung durch eine Intensitätsmessung zu beobachten, reicht ein einmaliges Ankoppeln zu Versuchsbeginn aus, wenn gewährleistet

ist, daß während der Lastaufbringung die Ankopplungsstellen auf der Bauteiloberfläche spannungsfrei bleiben und sich nicht verformen.

b) Plastische Koppelmittel

Hier werden üblicherweise die bei der Schallübertragung longitudinaler Impulse zur Laufzeitmessung bewährten Koppelmittel wie Vaseline, Fette oder Kitte (Plastellin) benutzt. Bei der Ankopplung von Sender und Empfänger an das Bauteil wird der Anpreßdruck so lange erhöht, bis sich die Intensitätsanzeige nicht mehr ändert. RÖTHIG (88) gibt dafür ein Wandlergehäuse an, in das verschiedene Prüfköpfe eingesetzt werden können. Beim Anpressen wird durch das Überwinden einer fest einstellbaren Federkraft zwischen 5 und 8 kp ein konstanter Kopplungsdruck von ca. 0,2 - 0,3 kp/cm² sichergestellt. Als Koppelmittel wurde ein Wälzlagerfett benutzt. Für glatte Betonoberflächen gibt der Autor einen Wiederholungsbereich der Intensitätswerte von 2 - 3 % an.

Bei einer vergleichbaren Ankopplung mit Vaseline oder Plastellin konnten im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit mit so geringen Anpreßdrücken ähnlich gute Ergebnisse an baupraktischen Betonoberflächen nicht erzielt werden. Eine Konstanz der Meßwertanzeige ergab sich erst bei Anpreßkräften von 100 - 150 kp, was bei einer Abstrahlfläche der Prüfköpfe von 20 - 30 cm² zu Anpreßdrücken von etwa 5 kp/cm² führte. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte auch FACAOARU (89). Für den Laborbetrieb mag ein solches Verfahren durch den Einsatz einer stationären Anpreßvorrichtung noch als praktikabel angesehen werden, auf der Baustelle ergeben sich jedoch nicht unerhebliche Schwierigkeiten.

Unabhängig davon zeigen sich bei dem Einsatz von Fetten oder Vaseline nach der Schallprüfung oft sehr häßliche Flecke auf der Betonoberfläche, die sich wegen des unvermeidlichen Einpressens der Koppelmittel in die Betonporen nur sehr schwer wieder entfernen lassen. An Betonsichtflächen ist daher aus ästhetischen Erwägungen eine Ankopplung über Fette abzulehnen. Über die Einsatzmöglichkeiten eines plastischen Koppelmittels unter Anwendung entsprechender Anpreßdrücke bei Sender und Empfänger für eine reproduzierbare Intensitätsmessung muß also von Fall zu Fall entschieden werden. Prinzipiell ergeben sich immer dann gut reproduzierbare Meßwerte, wenn der unter Umständen recht erhebliche Anpreßdruck für die Prüfköpfe aufgebracht werden kann.

Bibl. d. TU.
Braunschweig

c) Flüssige Koppelmittel

Die flüssige Ankopplung ist aus der in der Metallprüfung verwendeten Tauchtechnik bekannt. Dabei wird das Werkstück derart in ein Flüssigkeitsbad eingetaucht, daß es zwischen den ebenfalls untergetauchten Schallsendern und -empfängern liegt. Die Flüssigkeitsankopplung hat den Vorteil frei von irgendwelchen Anpreßkräften zu sein. Außerdem paßt sich die Koppelflüssigkeit bei guter Benetzung allen Unebenheiten der Prüfkörperoberfläche gut an. Für die Intensitätsmessung an Betonbauteilen besonders an Betonbauwerken ist ein Tauchverfahren naturgemäß nicht praktikabel. Seine Vorteile lassen sich jedoch ebenso gut ausnutzen, wenn es gelingt, während der Messung zwischen Prüfkopf und Bauteil eine etwa 10 - 20 mm dicke Flüssigkeitsschicht einzubringen. Das ist mit dem in Abschnitt 4.2.4 entwickelten und beschriebenen Prüfkopf möglich, der auch für die Auswahl von anwendbaren flüssigen Koppelmedien eingesetzt wurde.

Auswahlkriterien für die Koppelflüssigkeit waren eine gute Benetzung von Betonoberflächen sowie der Verschmutzungsgrad der Koppelstelle nach einer Messung. Wegen der im Vergleich zu festen Stoffen geringen Dichten von Flüssigkeiten unterscheiden sich ihre Schallübertragungseigenschaften bei einer Ankoppelung nur geringfügig (vgl. Gl. 9, Reflexionsgrad, Durchlässigkeitsgrad), so daß hinsichtlich der Übertragung keine besondere Auswahl getroffen werden mußte.

Bei diesen Untersuchungen hat Terpentinöl die insgesamt günstigsten Ergebnisse gezeigt. Es benetzt Beton gut und hinterläßt auf dem Bauteil keine Spuren, da es nach Abnahme der Prüfköpfe allmählich verdunstet. Koppelversuche an jeweils gleichen Meßstellen ergaben eine Standardabweichung unter 3 %. Die Oberflächenrauigkeit ist dabei ohne Einfluß auf die Intensitätsanzeige, zum Zweck einer raschen Ablesung ist es jedoch vorteilhaft, die Meßstelle von Staub und - wenn möglich - auch von abgesetzter Zementschlempe zu befreien (Drahtbürste).

Versuche mit Hydraulik- oder Maschinenöl wurden wegen der Fleckenbildung auf Beton nicht weiter verfolgt. Glycerinöl, das wegen seiner höheren Dichte eine etwas bessere Schallübertragung gewährleisten sollte (vgl. Gl. 9) und zudem

mit Wasser abwaschbar ist, war wegen seiner schlechten Oberflächenbenetzung von Beton als Koppelmittel unbrauchbar. Es ergaben sich Standardabweichungen von 20 %. Auch bei einer Verwendung von Wasser als Koppelmittel wurden trotz guter Oberflächenbenetzung Standardabweichungen bis zu 15 % gefunden. Hervorgerufen wurde dieses schlechte Ergebnis durch kleine Gasbläschen, die sich auf Prüfkopf- und Bauteiloberfläche absetzten. Der Einsatz von entgastem Wasser und der Zusatz von Netzmitteln erbrachte keine wesentliche Verbesserung der Situation. Bei hohen Sendeleistungen werden außerdem vor dem Sender durch Kavitation (vgl. z. B. 24) immer neue Gasbläschen erzeugt, die den Schalldurchgang durch die Koppelflüssigkeit verschlechtern.

Bei einer Intensitätsmessung an Betonbauteilen hat die flüssige Ankopplung mit Terpentinöl hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Anwendbarkeit insgesamt die besten Ergebnisse gezeigt. ⁺⁾

4.2.3 Auswahl von Prüffrequenz und Meßverfahren

Die Auswahl der Prüffrequenz ergibt sich sofort aus der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Streuung und Reflexion und daher aus der Zuschlagkorngrößenverteilung im untersuchten Beton. Die Wellenlänge des Prüfpulses sollte nach Möglichkeit so gewählt werden, daß auch der Durchmesser des Größtkorns noch nicht die Abmessungen der Wellenlänge erreicht und damit zu Reflexionen führt. Aufgabe einer Intensitätsmessung soll es ja nicht sein, unter Umständen in relativ dünnen Bauteilen schon ein einzelnes Zuschlagkorn nachzuweisen. Günstiger ist es daher, die Wellenlänge so zu wählen, daß die Masse der Zuschläge als Streuzentren wirken. Ist daher die Sieblinie des untersuchten Betons bekannt, kann man - bei Vorhandensein entsprechender Prüfköpfe - die Wellenlänge durch die Wahl der Prüffrequenz der Korngrößenverteilung anpassen. Dazu lassen sich etwa folgende Relationen angeben:

⁺⁾ Mit der Abhängigkeit der Impulslaufzeit von Ankopplungsmedium und Oberflächenstruktur des Bauteils beschäftigt sich eine umfangreiche Untersuchung, die z.Zt. am Institut für Bauforschung der TH-Aachen durchgeführt wird.

Korngröße, max. bis mm \varnothing	Wellenlänge mm	Frequenz ⁺⁾ kHz
50	200	20
30	120	35
20	80	50
10	40	100

Mit Prüffrequenzen von 20-100 kHz wird man im allgemeinen gut auskommen. Ob höhere Frequenzen im Interesse einer größeren Nachweisempfindlichkeit von Hohlräumen (vgl. Gl. 8) einsetzbar sind, muß im Einzelfall geklärt werden, da im Beton die Schallschwächung durch Streuung mit einer Frequenzerhöhung stark ansteigt (vgl. Abschnitt 4.2.1). Frequenzen über 500 kHz lassen sich wegen der damit nur noch durchschalbbaren Bauteildicken unter 20 cm für eine Intensitätsmessung an Betonbauteilen nicht mehr sinnvoll einsetzen.

Für die Intensitätsanzeige bieten sich zwei Meßmöglichkeiten an. Es sind dies die Amplitudenmessung und die Messung der Empfängergesamtspannung.

a) Messung der Impulsintensität über die Höhe der ersten Impulsamplitude

Bei diesem Verfahren wird die Höhe der ersten Impulsamplitude auf dem Bildschirm des Oszillographen (vgl. Abb. 7 und 26) zur Intensitätsmessung ausgewertet. Die Amplitudenhöhe h wird dann entweder in "mm" auf dem Bildschirm abgelesen und unter Berücksichtigung der jeweiligen Verstärkereinstellung in mV umgerechnet, oder die Amplitude wird mit einem geeichten Verstärkungsregler immer auf einen festen Wert eingestellt. Für die Messung sollte grundsätzlich nur eine der ersten drei Impulsamplituden gewählt werden. Später ankommende Amplituden können bereits durch eine Überlagerung mit an den Grenzflächen des Bauteils reflektierten Impulsanteilen verfälscht sein.

+) Berechnet nach Gl. 2 für eine mittlere Schallgeschw. $V(\text{Beton}) = 4000 \text{ m/s}$

b) Messung der Impulsintensität über die Empfängergesamtspannung

Bei diesem Verfahren wird die vom Schallempfänger abgegebene elektrische Spannung mit einem Röhrenmillivoltmeter gemessen. Die Gesamtspannung bezieht sich nicht nur auf die erste Amplitude des Impulses, sondern sie wird durch die Fläche zwischen der Zeitachse (x-Achse-Oszillographenschirm) und allen Schwingungen des Impulses repräsentiert. Zur Messung müssen daher Geräte mit der sogenannten "Mittelwertanzeige" benutzt werden (z. B. Typ UVM-BN 12011 der Firma Rhode u. Schwarz). Die Anzeige erfolgt auf einem Zeigerinstrument. Das Verfahren bezieht aufgrund seiner "Mittelwertanzeige" auch die von den Begrenzungsflächen des Bauteils reflektierten Impulsanteile in die Intensität mit ein, so daß der Meßwert von der Bauteilgeometrie beeinflusst werden kann. Dieser Effekt kann andererseits bei einem Nachweis von Rißflächen parallel zur Durchschallungsrichtung sehr von Vorteil sein. Die Meßwertanzeige wird aber außerdem noch durch geringfügige Änderungen der Koppelschichtdicke beeinflusst (Interferenzen in der Flüssigkeit). Für eine Intensitätsmessung an Betonbauteilen wird man daher das von den geschilderten Einflüssen freie Amplitudenverfahren benutzen.

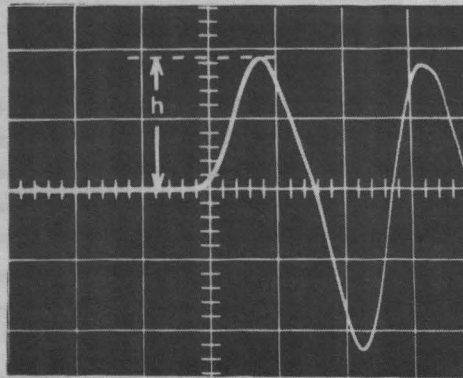


Abb. 26 Intensitätsmessung über die Höhe h der ersten Impulsamplitude.

4.2.4 Entwicklung eines Ultraschall-Prüfkopfes für flüssige Koppelmittel zur Intensitätsmessung an Betonbauteilen

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2, Teil c einleitend kurz bemerkt wurde, ist eine flüssige Ankopplung mittels Eintauchverfahren für baupraktische Belange nicht brauchbar. Eine derartige Methode bliebe allenfalls dem wissenschaftlichen Laborbetrieb vorbehalten und müßte sich auf kleine Probekörper beschränken. Messungen an fertigen Bauwerken, auf Baustellen sowie in Fertigteilfabriken können daher nur mit einem Prüfkopf durchgeführt werden, der die Koppelflüssigkeit schon enthält oder der Meßstelle unmittelbar zuführt. Die für Echomessungen in der Metallprüfung gelegentlich eingesetzte "Fließwasserankopplung", bei der in den Raum zwischen Wandler und Werkstück unter Druck kontinuierlich Wasser einströmt und seitlich entweicht, kann für den hier angestrebten Verwendungszweck keine befriedigende Lösung erbringen, da die strömende Flüssigkeit schwankende Intensitätsanzeigen zur Folge hat. Außerdem werden erhebliche Mengen an Koppelflüssigkeit verbraucht. Wesentlich vorteilhafter ist es daher, die Schwingkeramik etwa 10 mm in das Prüfkopfgehäuse zurückzusetzen und den nach der Ankopplung nun verbleibenden Hohlraum zwischen metallisierter Wandlerfläche und Bauteil mit der Koppelflüssigkeit auszufüllen. Die Schallübertragung erfolgt dann über eine ruhende Flüssigkeitsscheibe von ca. 10 mm Dicke.

Abb. 27 zeigt den hier vorgeschlagenen und eingesetzten Schallprüfkopf für eine reproduzierbare Intensitätsmessung an Betonbauteilen. Das Gehäuse besteht aus Messing, ist absolut wasserdicht verarbeitet und wird ebenso wie die außenliegende Wandlermetallisierung über das Prüfkabel geerdet. Die Schwingkeramik ist durch die Vergußmasse (Unu-Plus, ausgehärtet bei 100 °C) mit dem Gehäuse verbunden und schließt das Prüfkopfinnere gegen das Koppelmittel ab. Ein mechanischer Schutz der außenliegenden Wandlermetallisierung kann hier entfallen, da beim Ankoppeln kein direkter Kontakt mit der Betonoberfläche besteht.

Bei der Bemessung des Prüfkopfgehäuses muß darauf geachtet werden, daß der Durchmesser der Koppelflüssigkeitsscheibe größer als der Wandlerdurchmesser $2r$ ist. Dadurch wird erreicht, daß sich eventuell vorhandene Luftbläschen in je-

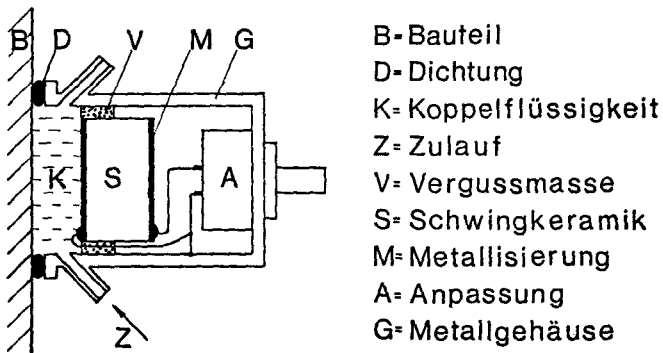


Abb. 27 Ultraschallprüfkopf für eine Intensitätsmessung mit flüssigen Koppelmitteln

dem Fall oberhalb der Schallstrecke sammeln. Die Abdichtung zwischen Gehäuse-
rand und Bauteil erfolgt bei glatten Betonflächen durch einen am Gehäuserand
angeklebten Dichtungsring aus Weichgummi. Liegen an der Meßstelle größere
Oberflächenrauhigkeiten vor, hat sich zur Abdichtung zusätzlich ein farbloser
Kitt (z. B. Nakiplast) gut bewährt.

Die Versorgung der Prüfköpfe mit Koppelflüssigkeit (hier Terpentinöl, vgl.
Abschnitt 4.2.2, Teil c) erfolgt wahlweise nach den in Abb. 28 dargestellten
Verfahren. Wenig Aufwand erfordert die unter (a) gezeigte Methode, bei der
das Füllen und Entleeren des Prüfkopfes durch Heben oder Absenken eines -
über einen dünnen Schlauch angeschlossenen - Vorratsgefäßes erreicht wird.
Der Füllstand läßt sich an dem über den Ausfluß- und Entlüftungsstutzen A ge-
schobenen durchsichtigen Silikonschlauch erkennen. In der Handhabung einfacher
und schneller ist die Koppelmittelversorgung über eine kleine elektrische
Schlauchpumpe (System Multifix), deren Förderrichtung und -leistung den jewei-
ligen Erfordernissen angepaßt werden kann (b). Der Füllstand läßt sich auch
hier wieder am durchsichtigen Überlaufschlauch erkennen, der bei einem Pum-
penbetrieb sicherheitshalber an das Vorratsgefäß angeschlossen werden sollte.
Während der Messung wird die Pumpe ausgeschaltet. Die Prüfkopfentleerung er-
folgt durch ein Umschalten der Pumpenförderrichtung. Normalerweise können
Sender und Empfänger über eine zentrale Versorgungsleitung beschickt werden.

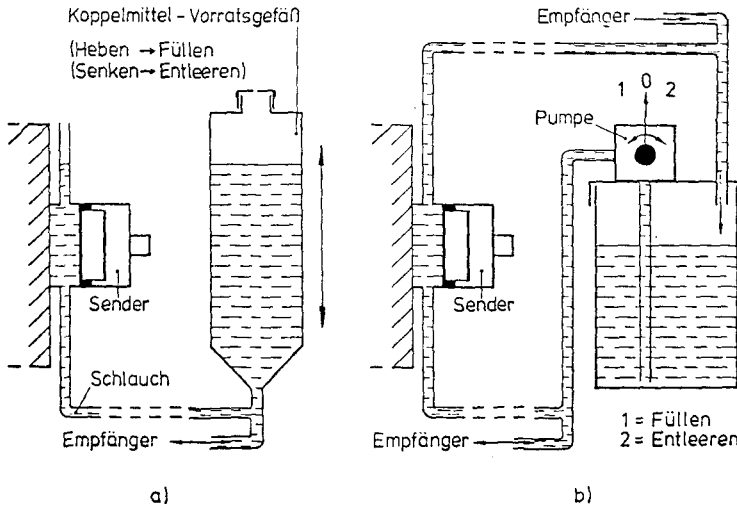


Abb. 28 Versorgung der Prüfköpfe für Intensitätsmessungen mit Koppel-
flüssigkeit

Es empfiehlt sich, vor der Messung die Koppelstelle auf der Betonoberfläche mit einer Bürste von Staub und lose sitzender Zementschläme zu befreien. Im Interesse einer schnellen MeßwertEinstellung hat es sich außerdem als günstig erwiesen, das Koppelmittel mehrmals unmittelbar aufeinander folgend in den Prüfkopf einfließen zu lassen ("Spülen" der Meßstelle). Die Ablesung am Oszillographen sollte erst dann vorgenommen werden, wenn sich während der Spülungen wenigstens zweimal hintereinander der gleiche Intensitätswert ergeben hat. Je nach Betongüte und Oberflächenbeschaffenheit eines geprüften Bauteils muß zwischen zwei bis fünf Mal gespült werden. Eine Spülung dauert - abhängig vom Versorgungsverfahren - ca. 10 - 30 Sekunden. Kleine Undichtigkeiten zwischen Prüfkopf und Bauteil stören die Messung nicht, sofern Koppel-
flüssigkeit aus dem Vorratsgefäß nachgeliefert wird (Füllstand beachten). Die Meßstelle ist bei Verwendung von Terpentinöl als Koppelmittel nach ca. 1 - 2 Stunden wieder abgetrocknet.

4.3 Auswahl und Beurteilung der Ultraschall-Meßparameter für zerstörungsfreie, komplexe Prüfverfahren

Mit den in Kap. 4.1 und 4.2 beschriebenen Ultraschall-Prüfköpfen und Ankopplungsverfahren lassen sich unter Verwendung eines Ultraschalloszillographen die Laufzeit t_L und die Empfangsintensität J_L longitudinaler Ultraschallimpulse sowie die Laufzeit t_T transversaler Ultraschallimpulse nach dem Durchlaufen eines Bauteils bestimmen. Die günstigsten Bedingungen für die Ermittlung von t_L (Dickenschwinger mit plastischen und flüssigen Koppelmitteln), t_T (Dickenscherschwinger mit aushärtenden Koppelmitteln) und J_L (Dickenschwinger mit flüssigen Koppelmitteln) ergeben sich an Betonbauteilen bei Ultraschallfrequenzen zwischen 50 - 150 kHz. Sofern es Bauteildicke bzw. Schallschwächung zulassen, sollte die Prüffrequenz im Interesse einer höheren Meßgenauigkeit aus dem oberen Bereich des genannten Frequenzintervalles gewählt werden.

Ist die Länge des jeweiligen Schallweges im Bauteil bekannt, können aus den Impulslaufzeiten die Schallgeschwindigkeiten V_L und V_T des Baustoffs berechnet werden. V_L und V_T sind Materialkonstanten. Die Intensität J_L hängt zwar von der gewählten Meßeinrichtung ab, aufgrund des hier vorgeschlagenen und erprobten reproduzierbaren Ankopplungsverfahrens lassen sich aber den Intensitätsänderungen eindeutig Veränderungen im oder am durchschallten Baustoff zuordnen. In die geplanten relativen Prüfverfahren können daher die Ultraschallparameter V_L (t_L), V_T (t_T) und auch J_L vorbehaltlos einbezogen werden. Die Intensität J_L läßt sich wegen der hier erforderlichen aushärtenden Koppelmittel nicht reproduzierbar bestimmen und daher für ein allgemeines Schallprüfverfahren bisher nicht verwenden.

Aus den jetzt mit guter Genauigkeit meßbaren Ultraschallparametern V_L , V_T und J_L lassen sich das dreiparametrische, komplexe Prüfverfahren P_3 (V_L , V_T , J_L) sowie die reduzierten zweiparametrischen Verfahren P_2 (V_L , J_L), P_2 (V_T , J_L) und P_2 (V_L , V_T) ableiten. Eine Reduktion auf nur zwei Meßparameter ist aus wirtschaftlichen Erwägungen immer dann sinnvoll, wenn durch den jeweils weggelassenen dritten Meßparameter keine zusätzlichen Informationen erhalten werden. Unter diesen Voraussetzungen muß konsequenterweise ebenso geprüft werden, ob sich das angestrebte Untersuchungsziel auch einparametrisch erreichen läßt.

Eine Beantwortung der Frage nach der baupraktischen Verwendbarkeit des Verfahrens P_3 dienen die im Kapitel 5 berichteten Untersuchungen.

5. Überprüfung der baupraktischen Anwendbarkeit des vorgeschlagenen, dreiparametrischen Ultraschall-Prüfverfahrens

Nachdem durch die in Kapitel 4 beschriebenen Untersuchungen die Möglichkeit geschaffen worden war, neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit V_L longitudinaler Impulse sowohl deren Intensität als auch die transversale Schallgeschwindigkeit V_T als weitere Ultraschall-Meßparameter für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von Beton bereitzustellen, soll in diesem Kapitel die Aussagekraft des komplexen dreiparametrischen Ultraschall-Prüfverfahrens P_3 (V_L , V_T , J_L) an einer möglichst großen Zahl baupraktischer Anwendungsfälle geprüft werden. Dieses Vorgehen erschien aus folgenden Gründen angebracht:

1. Bisher lagen keine Erfahrungen vor, unter welchen Voraussetzungen und bei welchen Anwendungsfällen ein derartiges Prüfverfahren erfolversprechende Ergebnisse liefern kann.
2. Es war zu hoffen, Anregungen und auch Hinweise zu erhalten, auf welchen Gebieten der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung im Bauwesen künftig Entwicklungsschwerpunkte gesetzt werden sollten.
3. Für einen baupraktischen Einsatz müssen aus wirtschaftlichen Erwägungen auch Kenntnisse darüber gewonnen werden, ob und wann das dreiparametrische Verfahren P_3 durch eine dem jeweiligen Untersuchungszweck angepaßte Reduktion P_2 oder P_1 ersetzt werden kann.

Eine erste Beantwortung dieser grundsätzlichen Fragen konnte an nur einem, dann naturgemäß entsprechend eingehend bearbeiteten, Anwendungsfall nicht erwartet werden. Die Untersuchungen wurden daher am jungen Beton (Hydrata-

tionsverlauf), am erhärteten Beton (elastische Konstanten, Fertigungsfehler) und an Betonbauteilen unter Last (Rißbildung bis zum Bauteilversagen) durchgeführt.

5.1 Beobachtung des Hydratationsverlaufs hydraulischer Bindemittel

Seit mit dem Einsatz der Zemente Beton- und Stahlbetonbau an Einfluß gewannen, war es das Ziel vieler Untersuchungen, auf möglichst einfache Weise Aussagen über Hydratationsverlauf und Hydratationsgrad des sich verfestigenden hydraulischen Bindemittels zu erlangen, um daraus wiederum Rückschlüsse auf die bereits erreichte Baustofffestigkeit ziehen zu können. Kenntnisse über den Hydratationsgrad sind von großem Wert, wenn beispielsweise die frühestmöglichen Termine für das Entschalen von Betonbauwerken oder das Aufbringen von Vorspannungen auf Spannbetonkonstruktionen ermittelt werden sollen. Formale Zusammenhänge zwischen dem Reifegrad R und dem Produkt aus Erhärtungsalter und Temperatur

$$(11) \quad R = a (T + 10)$$

oder zwischen der Druckfestigkeit β und dem Produkt aus Normendruckfestigkeit β_N und Zementsteindichte ρ_Z

$$(12) \quad \beta = 2,7 \beta_N (\rho_Z - 0,23)$$

wie sie durch die SAUL'sche Regel (Gl. 11) oder von A. HUMMEL (Gl. 12) angegeben werden, lassen zwar bei einer Kenntnis der entsprechenden Betonparameter eine Abschätzung von Hydratationsgrad bzw. Festigkeit zu, eine einfache und genaue Methode zur Bestimmung des Hydratationsgrads von Zementstein in Mörtel oder Beton ist bisher jedoch nicht bekannt (90).

Zur Kennzeichnung des Hydratationsverlaufs von Zement werden bei Normprüfungen nach DIN 1164 Zeitpunkte für "Erstarrungsbeginn" und "Erstarrungsende" ermittelt, die es ermöglichen, ungefähr festzustellen, bis zu welchem Zeitpunkt das Bindemittel thixotrop, also der Baustoff verarbeitbar ist. Für die Beobachtung der Hydratationskinetik kann zusätzlich der zeitabhängige Verlauf

der Erhärtungstemperatur herangezogen werden. Eine exakte Bestimmung des augenblicklichen Hydratationsgrades ist dagegen nur an unter Wasser gelagerten Laborproben durch volumenometrische Messung der Schrumpfung möglich.

Erste Versuche, die Verfestigungsvorgänge an hydraulischen Baustoffen durch den Einsatz von Schallmeßverfahren einer objektiven Beobachtung zugänglich zu machen, stammen bereits von MEYER und BUCHMANN (3). In neuerer Zeit wurden derartige Untersuchungen mit Ultraschall-Impulsverfahren von WHITEHURST (9) und DOHNALIK, LESKIE und FLAGA (61) durchgeführt. WAUBEKE (20) unternahm den Versuch, unter Berücksichtigung von Schrumpf- und Schwinderscheinungen und des Wasserzementfaktors erstmals einen formalen Zusammenhang zwischen Impulslaufzeit und dem Hydratationsgrad anzugeben. Derartige Untersuchungen wurden normalerweise mit dem einparametrischen Verfahren $P_1 (V_L)$ durchgeführt, da eine genaue Messung der Intensität wegen der zeitlich veränderlichen Ankopplung (Schrumpfen, Schwinden) große Schwierigkeiten bereitet. Das hier entwickelte Ultraschallverfahren $P_3 (V_L, V_T, J_L)$ wird daher in einem ersten Untersuchungsabschnitt an verschiedenen Zementpasten zunächst daraufhin untersucht, ob es - besonders durch die zusätzliche Messung von V_T - weitergehendere Aussagen über den Verfestigungsvorgang ermöglicht.

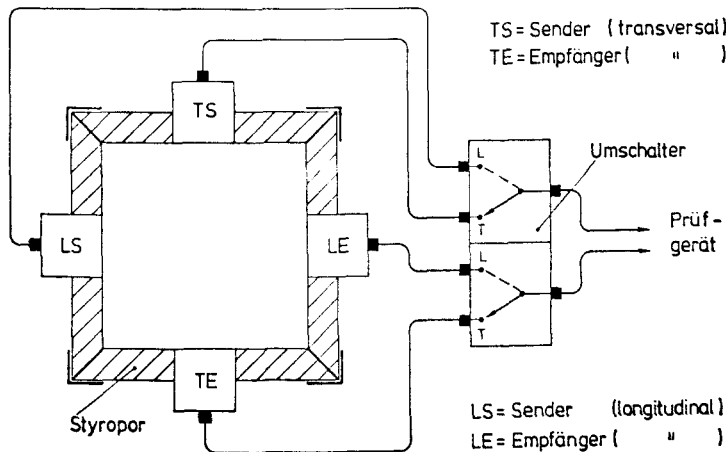


Abb. 29 Ultraschall-Meßzelle zur Bestimmung von V_L , V_T und J während der Baustoffverfestigung.

Zur Messung wurden der in Abschnitt 3.4 beschriebene Ultraschalloszillograf und die in Abb. 29 dargestellte Meßzelle benutzt. Die Meßzelle hat eine quadratische Grundfläche ($8 \times 8 \text{ cm}^2$), so daß der Schallweg zwischen den jeweils gegenüberliegenden Schwingerpaaren für longitudinale und transversale Impulse gleich ist. Das Zellengehäuse ist zur Vermeidung einer Schallübertragung durch seine Wandungen aus Styropor hergestellt. Dadurch konnte wegen der schlechten Wärmeleitung dieses Materials gleichzeitig erreicht werden, daß die Hydratation angenähert adiabatisch verläuft. Vor dem Einfüllen des frisch angemachten Bindemittels wird das Zelleninnere dünn mit Vaseline bestrichen, um den Probekörper nach der Erhärtung leicht wieder aus der Meßapparatur entfernen zu können. Von dieser Maßnahme müssen die Endflächen der Transversalwandler naturgemäß ausgenommen werden. Die Wandlermetallisierungen bedürfen bei diesen Untersuchungen keiner besonderen Schutzmaßnahmen, der direkte Kontakt zwischen Wandler und eingefülltem Bindemittel erweist sich (vgl. Gl. 9) für die Schallübertragung als besonders günstig. Es muß jedoch auch hier sichergestellt sein, daß die dem Bindemittel zugekehrten Wandlermetallisierungen geerdet sind. Zur Messung von V_L und V_T lassen sich die beiden Prüfkopfpaaire LS, LE bzw. TS, TE durch den Umschalter U abwechselnd an den Ultraschalloszillographen anschließen. Während des Abbindens sollte die Meßzelle nicht bewegt oder angestoßen werden, damit der für die Intensitätsmessung erforderliche gleichbleibende Kontakt zwischen Prüfkopf und Bindemittel nicht verändert wird. Durch ein stärkeres Anstoßen kann - besonders in der Anfangsphase der Erstarrung - außerdem das bereits gebildete, aber noch sehr schwache Feststoffskelett zerstört werden, was jedoch wegen der im Zuge des weiteren Tobermoritwachstums sofort einsetzenden "Ausheilung" nur zu einem kurzzeitigen Absinken der Schallgeschwindigkeit führt.

Abb. 30 a zeigt das Ergebnis einer Schallgeschwindigkeits-Hydratationszeitmessung an einer Zementpaste aus PZ 350 F. Durch die gleichzeitige Messung von V_L und V_T ist es erstmals möglich, während der Hydratation die zeitabhängige Änderung einer elastischen Konstante meßtechnisch zu erfassen. Der aus den beiden Schallgeschwindigkeiten V_L , V_T bzw. bei gleichem Schallweg aus den beiden Impulslaufzeiten t_L , t_T nach Gleichung 16 (vgl. Abschnitt 5.2.1) errechnete zeitabhängige Verlauf der dynamischen Poissonkonstante ist daher eben-

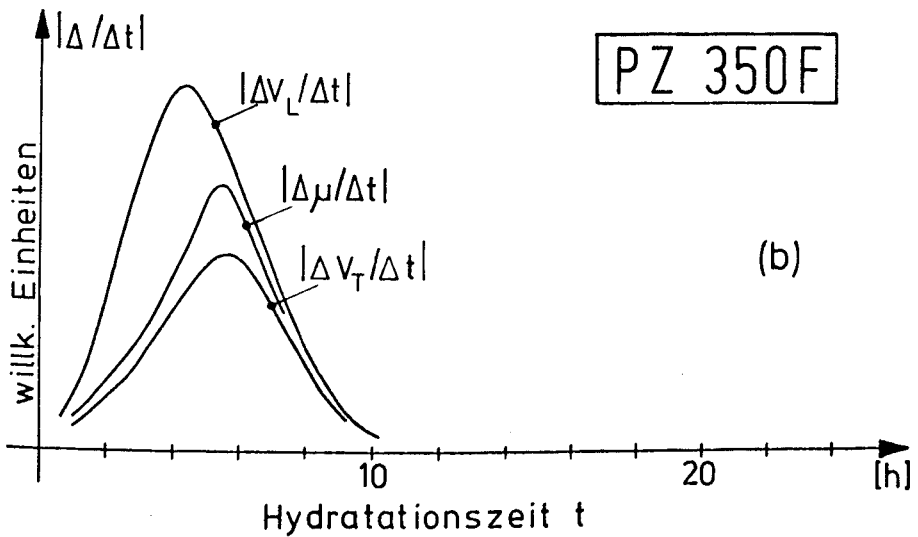
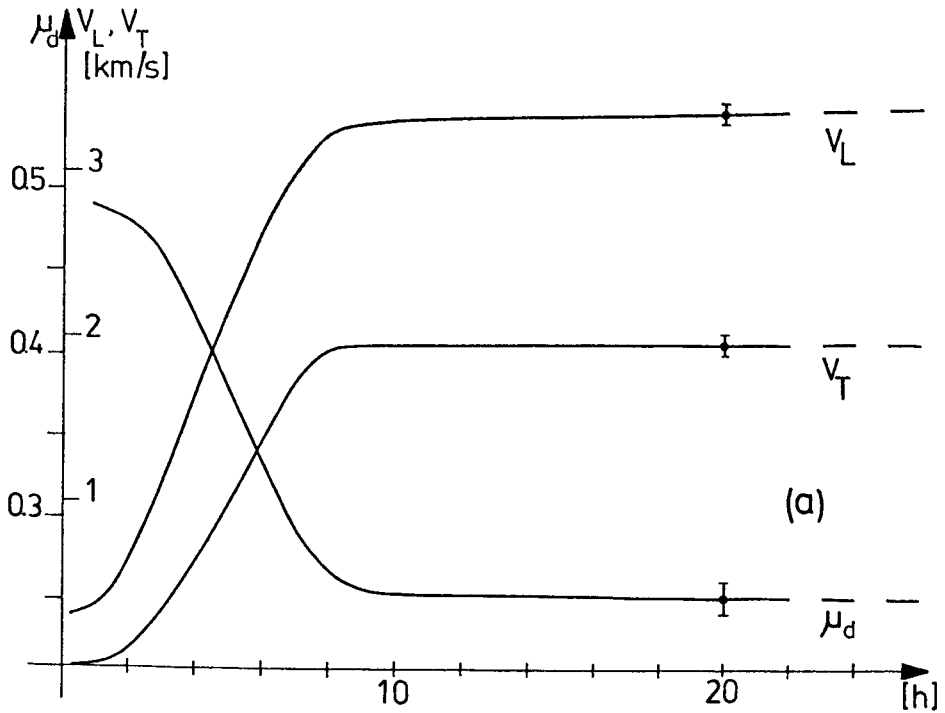


Abb. 30 V_L , V_T , μ_d und deren numerische Differentiation ($\Delta/\Delta t$) in Abhängigkeit von der Hydratationszeit an einer Zementpaste aus Portlandzement

falls in das Diagramm eingetragen. Folgt man den in der Abb. 30 a dargestellten Kurvenverläufen, läßt sich die Hydratation der Zementpaste im Hinblick auf die Änderung der Schallmeßparameter in drei verschiedene Bereiche unterteilen:

Bereich I

In einem vergleichsweise kurzen Zeitraum von 1 - 2 h nach dem Anmachen zeigen sich in der Zementpaste nur geringfügige Änderungen ihrer mechanischen Eigenschaften. V_L steigt hier nur langsam - etwa um 1,5 m/s pro Minute - an, transversale Impulse können nicht empfangen werden, da offenbar das zu ihrer Ausbreitung erforderliche zusammenhängende Feststoffskelett noch nicht aufgebaut ist. In diesem Bereich laufen die der Hydratation unmittelbar vorangehenden Lösungsvorgänge ab (Kalkhydrat, Trisilikat, Alkalisulfat, Aluminat usw.), ein direkter Verbund über Feststoffbrücken zwischen den schon gebildeten Hydratationsprodukten besteht noch nicht.

Bereich II

Ca. 1,5 - 2 h nach dem Anmachen läßt sich auch V_T durch den Empfang transversaler Impulse messen. Gleichzeitig setzt eine mit der Zeit zunehmende, rasche Veränderung der elastischen Materialeigenschaften ein. Dieser Prozeß dauert hier etwa sieben Stunden und äußert sich in einem schnellen Anstieg der Schallgeschwindigkeiten, verbunden mit einem entsprechenden Abfall der Poissonkonstanten μ_d . In diesem Zusammenhang soll darauf hingewiesen werden, daß aus einer Änderung von V_L und V_T nicht notwendigerweise auch eine Veränderung in μ_d folgen muß, da μ_d ausschließlich von dem Verhältnis V_T/V_L bzw. t_L/t_T beeinflusst wird.

Bereich III

Nach 8 - 9 h sind die zeitlichen Änderungen von V_L , V_T und μ_d so klein geworden, daß sie sich nur noch durch Messungen im 24 h-Abstand nachweisen lassen.

In Abb. 30 b sind die Änderungen der Schallgeschwindigkeiten ΔV_L und ΔV_T sowie der Poissonkonstanten $\Delta \mu_d$ pro Zeiteinheit Δt in Abhängigkeit von der Hydratationszeit dargestellt. Diese Kurven ergeben sich durch eine numerische Differentiation der in Abb. 30 a aufgetragenen Meßergebnisse nach der Zeit (Δ Meßparameter / Δt) und lassen deutlich erkennen, zu welcher Zeit die elastischen Eigenschaften der Zementpaste ihre stärksten Änderungen erfahren.

Aus Ort und Höhe der Maxima sowie aus der Kurvenform der 1. numerischen Ableitungen (Halbwertsbreite) lassen sich also Rückschlüsse auf die Hydratationskinetik während der Erstarrung ziehen. Bei einem Vergleich verschiedener Zementpasten anhand der numerischen 1. Ableitungen muß Δt naturgemäß konstant gewählt werden. Für Untersuchungen an Zementen hat sich ein Δt zwischen 1 - 2 h als vorteilhaft erwiesen.

Ähnlich im Verlauf sind die Ultraschall-Hydratationszeitkurven und die zugehörigen numerischen 1. Ableitungen für eine Paste aus HOZ 450 L in Abb. 31. Hier sind in Abb. c zusätzlich noch die Schallintensität J und die Erstarrungstemperatur T aufgetragen. Der scheinbare plötzliche Abfall der Intensität nach vorhergehendem starken Anstieg ist durch eine Kontaktunterbrechung zwischen Schallschwinger und erstarrtem Bindemittel zurückzuführen. Ob diese Unterbrechung durch Schrumpfen oder die einsetzende Temperaturabnahme hervorgerufen wird, konnte mit dem hier beschriebenen Versuchsaufbau nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Die bei CZERNIN (90) angegebenen Schrumpfkurven sprechen jedoch für die erste Annahme. Der Einsatz einer Flüssigkeitsankopplung, beginnend mit dem Zeitpunkt maximaler Meßparameteränderungen, ergab den gestrichelt eingezeichneten Intensitätsverlauf.

Um besonders die Anfangsphase der Hydratation, also auch den Übergang zwischen den Bereichen I und II, meßtechnisch besser erfassen zu können, wurde eine weitere Messung mit einer Zementpaste aus HOZ 450 L durchgeführt, der jedoch mit dem Anmachwasser 0,3 % Verzögerer (Murasit) zugesetzt worden war. Die Ergebnisse dieser Messung sind in den Abbildungen 32 a, b und c zusammengestellt.

Die " μ_d -Hydratationszeitkurven", aber auch die " v_L - v_T -Hydratationszeitkurven", der Abb. 30 - 32 legen die Vermutung nahe, daß die eigentlichen Anfangs- und Endpunkte der Zementsteinerstarrung durch den Bereich II, also die Begrenzungen eines Zeitabschnitts wiedergegeben werden, in dem sich ein anfangs noch schwaches, aber zusammenhängendes Feststoffskelett ausbildet, dessen elastische Eigenschaften sich während der Erstarrung noch fortlaufend ändern, bis sie am Erstarrungsende nahezu schon denen des vollständig erhärteten Zementsteins entsprechen. Die Zunahme der Raumerfüllung dieses während der Erstarrungsphase aufgebauten Feststoffskeletts läßt sich über die Intensitätsmessung verfolgen.

Besonders aus der μ_d -Hydratationszeitkurve der Abb. 32 a ist deutlich zu erkennen, daß die hier definierten Anfangs- und Endpunkte der Zementsteinerstarrung sicher nicht durch die Normenprüfung mit der Vicat-Nadel nach DIN 1164

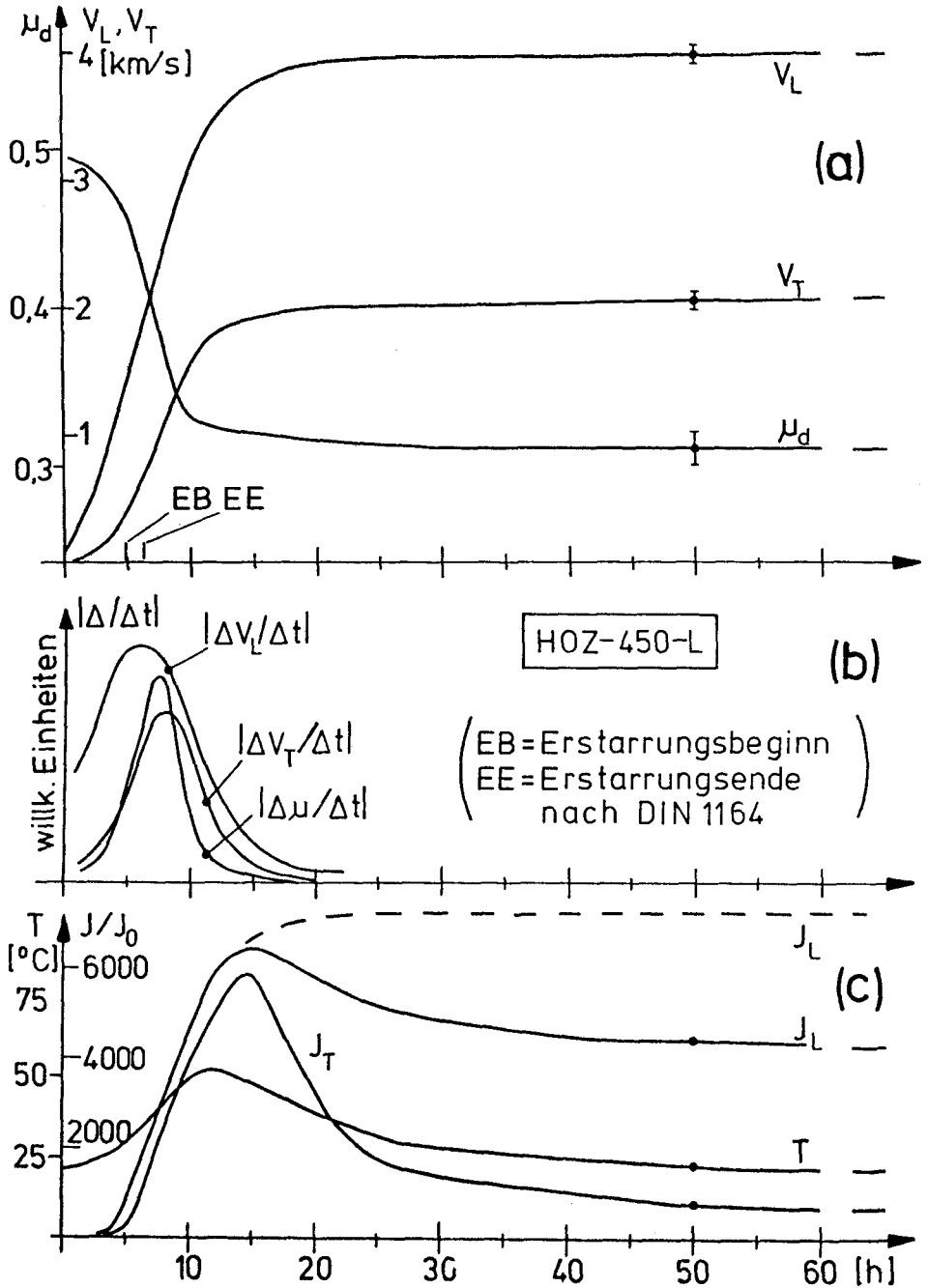


Abb. 31 V_L, V_T, μ_d , deren numerische Differentiation ($\Delta/\Delta t$) sowie Intensität J und Abbinde-temperatur T in Abhängigkeit von der Hydratationszeit an einer Zementpaste aus Hochofenzement

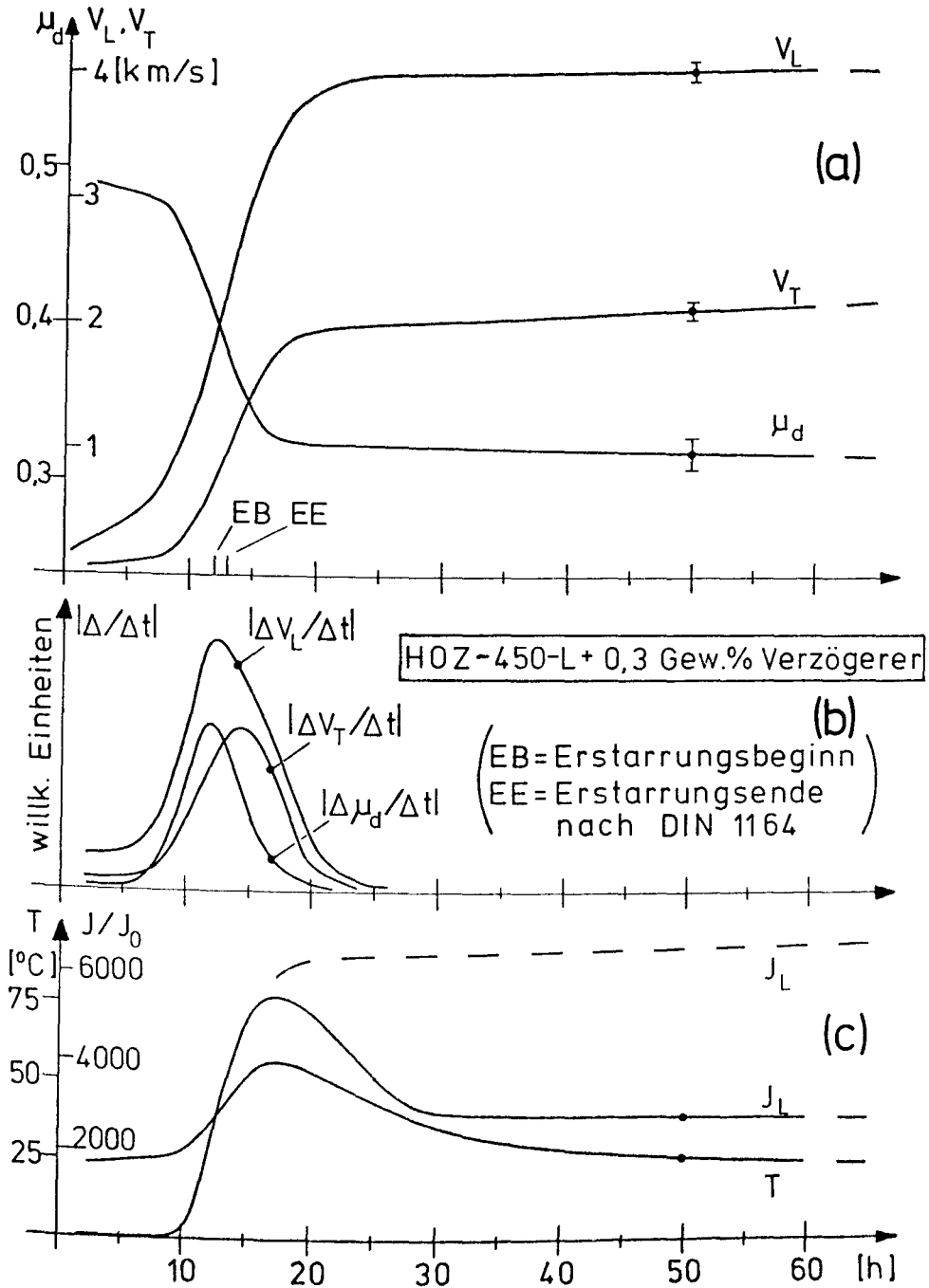


Abb. 32 V_L , V_T , μ_d , deren numerische Differentiation ($\Delta/\Delta t$) sowie Intensität J und Abbinde-temperatur T in Abhängigkeit von der Hydratationszeit an einer mit Verzögerer versetzten Zementpaste aus Hochofenzement

wiedergegeben werden, eine Tatsache, die auch mit geeigneten Tauchkörpern nachgewiesen werden kann. Auslösendes Moment für die Anzeige des "Erstarrungsbeginns nach DIN 1164" durch die Vicat-Nadel ist bekanntlich das Ende der für den Betonbau entscheidenden Zeitspanne, in der sich das Bindemittel hinsichtlich der Verarbeitbarkeit (Mischen, Transport, Einbringen, Verdichten) noch ausreichend thixotrop verhält. Dieser Zeitpunkt fällt aber - wie aus den weiteren Überlegungen folgt - immer in den hier festgelegten Bereich II.

Aus den sich dann im Bereich III vergleichsweise nur noch geringfügig mit der Zeit ändernden Schallmeßparametern kann weiter gefolgert werden, daß mit dem Ende der Erstarrung für die Schallübertragung bereits ein Feststoffskelett zur Verfügung steht, dessen Mikrostruktur (Poren) nahezu keinen Einfluß mehr auf die Schallfortleitung hat. Die jetzt noch mit hochalkalischer, wässriger Aufschlammung unhydratisierter Klinkerbestandteile ausgefüllten Zwischenräume sind bereits so klein, daß sie im Hinblick auf die Schallübertragung (vgl. Abschnitt 4.2.1) weder wesentliche Anteile der für die Schallschwächung maßgeblichen Effekte (Reflexion, Streuung) noch einen die Schallgeschwindigkeit auffallend beeinflussenden "Umweg" hervorrufen können. Der mit dem Erhärtungsbeginn jetzt einsetzende bedeutende Zuwachs an Druckfestigkeit hat daher seine Ursachen in dem Ausfüllen der im Feststoffskelett noch vorhandenen großen Zahl mikroskopischer Zwischenräume mit weiteren Hydratationsprodukten. Insgesamt wird dabei zwar der Absorptionskoeffizient der Schallschwächung kleiner, sein Anteil an der Gesamtschallschwächung ist aber wie bereits erläutert wurde gering.

Aus den Meßkurven und den beschriebenen Überlegungen muß zunächst noch der Schluß gezogen werden, daß mit dem Schallmeßverfahren P_3 (V_L , V_T , J) - wegen der vergleichsweise kleinen Meßwertänderungen im Bereich III - bisher keine sicheren Aussagen über die jeweils erreichte Festigkeit getroffen werden können, wie sie beispielsweise für das Aufbringen von Vorspannungen erforderlich sind. Hier muß abgewartet werden, ob sich bereits schon aus der Hydratationskinetik des Bereichs II Rückschlüsse auf die weitere Verfestigung ziehen lassen. Andererseits hat sich aber gezeigt, daß durch die Schallmessungen insgesamt eine recht geschlossene Darstellung von Aufbau und elastischem Verhalten des während der Hydratation entstehenden Feststoffskeletts ermöglicht wurde, die zudem nicht zu Widersprüchen zu den aus Schrumpfungs-, Festigkeits- oder auch elektronenoptischen Messungen gewonnenen Erkenntnissen führt. Das Ver-

fahren P_2 mit den sich entsprechenden Meßparametervariationen (V_L, V_T) , (t_L, t_T) , $(V_L, \mu_d (V_L/V_T))$ oder $(t_L, \mu_d (t_T/t_L))$ ist daher für das Forschungslabor eine sehr empfindliche Nachweismethode, die gegenüber der Vicat-Nadel noch den bedeutsamen Vorteil hat, in ihrer Anwendung nicht nur auf Bindemittelpasten beschränkt zu sein. Mit dem Schallverfahren lassen sich Mischungen aus Bindemittel und Zuschlag ebensogut untersuchen.

Mit den Kurvenverläufen der Abb. 31 a, b und 32 a, b kann beispielsweise nachgewiesen werden, daß die Wirkung des hier eingesetzten Abbindeverzögerers, wie behauptet, tatsächlich auf einer zeitlichen Verschiebung des hier definierten Erstarrungsbeginns beruht, wogegen die Erstarrungskinetik kaum beeinflußt wird. Außerdem läßt sich bereits nach dem Erstarrungsende durch einen Vergleich der Schallmeßparameter auf eine höhere Endfestigkeit der mit Verzögerer versetzten Zementpaste schließen (gleiches μ_d , aber höhere Schallgeschwindigkeit, vgl. hierzu auch Abschnitt 5.2.2.4). An dieser Stelle soll außerdem auf das zeitliche Zusammenfallen des Erstarrungsbeginns bzw. -endes nach DIN 1164 und der Maxima der numerischen 1. Ableitungen hingewiesen werden.

Nicht unerwähnt soll in diesem Zusammenhang die deutliche Zeitverschiebung der Maximalwerte von zeitlicher V_L - und V_T -Änderung bleiben (vgl. Differenzkurven). Eine Antwort auf die Frage, warum das Maximum von $\Delta V_T / \Delta t$ stets hinter dem von $\Delta V_L / \Delta t$ liegt, kann hier noch nicht gegeben werden.

5.2 Ultraschallmessungen am erhärteten Beton

Die hier beschriebenen Untersuchungen sollen in erster Linie dazu dienen, die Brauchbarkeit des Verfahrens P_3 (V_L , V_T , J_L) für den Nachweis von Verarbeitungsmängeln in Betonbauteilen oder -bauwerken zu überprüfen. Diese vielfach unter Oberbegriff "Homogenitätskontrolle" zusammengefaßten Verfahrensweisen bezwecken das Auffinden von Verdichtungsfehlern, Rezepturabweichungen sowie von großen Hohlräumen einschließlich Kiesnestern und Rissen. Sie werden daher ausschließlich als Relativmessungen durchgeführt. Die am erhärteten Beton außerdem mögliche Bestimmung der dynamischen Elastizitätskonstanten wird den Relativmessungen als einziges Ultraschallverfahren zur Ermittlung absoluter Materialkennwerte vorangestellt.

5.2.1 Messung der dynamischen Elastizitätskonstanten von Beton

Für Untersuchungen in der Praxis betrachtet man Beton näherungsweise als quasihomogen und isotrop, so daß sich insgesamt vier elastische Konstanten angeben lassen, die durch die Gleichungen (13) miteinander verknüpft sind.

$$(13) \quad Q = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad ; \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

Q = Kompressionsmodul, E = Elastizitätsmodul,
 μ = Poissonkonstante, G = Schubmodul

Es ist daher möglich, das gesamte elastische Verhalten von Beton bereits durch die Angabe von nur zwei dieser Konstanten zu beschreiben (26).

In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß die elastischen Moduli streng genommen Materialkonstanten sind, die einen linearen Zusammenhang zwischen den wirkenden Spannungen σ und den dadurch hervorgerufenen Volumen- oder Gestaltsänderungen ϵ angeben (HOOKE'sches Gesetz). Daraus folgt sofort, daß bei Beton ein derartiger Zusammenhang nur für sehr kleine Lastbereiche existieren kann. Diese Lastbereiche werden bei der im Bauwesen üblichen Bestimmung der statischen Elastizitätskonstanten normalerweise überschritten. Es ergeben sich daher elastische Kennzahlen, die wegen irreversibler

Formänderungen von Belastungsgeschwindigkeit, Belastungshöhe und Prüfverfahren abhängen. Für den E-Modul von Beton sind beispielsweise vierzehn unterschiedliche Definitionen bekannt (91).

Bei der hier beschriebenen dynamischen Ermittlung von elastischen Moduli mittels Ultraschall darf nicht übersehen werden, daß die dynamisch gemessenen Werte verstärkt durch die elastischen Eigenschaften der Zuschläge (s. Gl. 14) beeinflußt werden, während die statisch bestimmten Werte in erster Linie von den elastischen Eigenschaften des Zementsteins abhängen (92).

$$(14) \quad E(\text{Beton}) = \frac{k^2 \cdot E(\text{Kies}) \cdot E(\text{Zementstein})}{k \cdot E(\text{Zementstein}) + (1 - k) \cdot E(\text{Kies})} + (1 - k^2) \cdot E(\text{Zementstein})$$

(mit $k^3 = \text{Zuschlagvolumen/Gesamtvolumen}$)

Die im Rahmen einer Ultraschallprüfung ermittelten dynamischen Moduli kommen aber wegen der durch den Schallimpuls hervorgerufenen, vergleichsweise geringen Spannungen den Anforderungen an Materialkonstanten noch am nächsten, zumal MARTINCEK (93) nachweisen konnte, daß die dynamischen Moduli oberhalb einer Frequenz von 30 - 40 kHz von der Belastungsgeschwindigkeit (also der Frequenz) unabhängig sind. Eine ausführliche Darstellung des hier nur kurz erläuterten Sachverhalts findet sich beispielsweise bei LEERS (36). In dieser Arbeit soll anhand von Meßergebnissen gezeigt werden, wie durch den Einsatz des Prüfverfahrens P_3 die bisher bestehenden Schwierigkeiten bei der dynamischen Bestimmung der elastischen Moduli von Beton beseitigt werden können.

Normalerweise wird der dynamische Elastizitätsmodul E_d aus der durch Umformung von Gleichung (3) erhaltenen Gleichung (15) errechnet:

$$(15) \quad E_d^+ = \varrho \cdot v_L^2 \cdot k(\mu)$$
$$k(\mu) = \frac{(1 - 2\mu)(1 + \mu)}{(1 - \mu)}$$

+) Soll E_d in (kp/cm^2) angegeben werden, muß die Gleichung noch mit $0,102 \cdot 10^{-4}$ multipliziert werden.

V_L ergibt sich aus einer Laufzeitmessung mit longitudinalen Ultraschallimpulsen. Für die Poissonkonstante μ mußten bisher Schätzwerte eingesetzt werden.

Literaturangaben für einen mehr als 28 Tage alten Beton schwanken zwischen $\mu = 0.2$ und $\mu = 0.3$, so daß sich wegen dieser Unsicherheiten bei der E_d -Berechnung Fehler über 10 % ergeben. POHL (26) gibt z. B. für derartige Berechnungen einen vom Betonalter abhängigen Schätzwert für μ an:

Betonalter in Tagen	μ
3 - 14	0,30
28	0,20
> 70	0,15

Andererseits war aber schon aus Arbeiten von LESLIE und CHEESMAN (8) bekannt, daß μ bei Beton offenbar auch von der Dichte abhängt. Ein ähnlicher Effekt wurde von HENNICKE und LEERS (94) bei Untersuchungen an Feuerleichtsteinen gefunden. Um eine Beeinträchtigung von E_d durch diese Schätzwertunsicherheiten weitestgehend auszuschließen, wird in der zur Zeit neuesten Ausgabe der RILEM-Recommendation NDT 1 für zerstörungsfreie Ultraschallprüfungen an Beton (95) vorgeschlagen, μ durch eine Resonanzmessung mit Hörschall an Betonprismen aus einem entsprechenden Vergleichsbeton zu ermitteln. Nachteilig ist dabei jedoch, daß bei einem Einsatz des Verfahrens an bereits fertiggestellten Bauwerken kaum geeignete Betonprismen vorhanden sein werden, die hinsichtlich Mischungsbestandteilen, Alter und Erhärtungsbedingungen dem Bauwerksbeton entsprechen. Außerdem muß für die Resonanzmessung eine zusätzliche Meßapparatur bereitgestellt werden (z. B. E-G-Meter (96)).

Diese Nachteile einschließlich der erläuterten Schätzwertunsicherheiten werden erstmals durch den Einsatz der hier entwickelten Transversalwellenwandler beseitigt, die eine gleichzeitige Bestimmung der longitudinalen (V_L) und transversalen (V_T) Schallgeschwindigkeiten an Bauwerken oder Bauteilen aus Beton ermöglichen. Die Berechnung von μ_d aus dem Verhältnis (V_T/V_L) erfolgt mit Gleichung (16), die sich durch das Eliminieren von E/ρ aus den Gleichungen (3) und (4) ergibt:

$$(16) \quad \mu_d = \frac{1 - 2 (v_T/v_L)^2}{2 - 2 (v_T/v_L)^2}$$

In Tabelle I sind die Ergebnisse einer Schallgeschwindigkeitsmessung mit Transversalwandlern und die daraus errechneten dynamischen Moduli einer 200 Tage alten Prüfkörperserie zusammengestellt, die aus einer Betoncharge (Bn 350) durch unterschiedliches Verdichten hergestellt worden waren. Die Tabelle wurde zusätzlich um E_d -Werte erweitert, die sich Literaturangaben folgend - ohne Berücksichtigung des jetzt bekannten Verhältnisses (v_T/v_L) - durch das Einsetzen von Schätzwerten für μ von 0,15 und 0,2 ergaben.

Wie die Messungen ergeben, zeigt sich auch hier eine von der Betondichte abhängige Poissonkonstante: μ nimmt mit steigender Dichte ab. Die Größenordnung der Fehler, die entstehen, wenn in Gleichung (15) bei der Berechnung von E_d Schätzwerte für μ eingesetzt werden, ergeben sich aus einem Vergleich der letzten drei Tabellenspalten. Aus den zusätzlich an einer großen Zahl von Probekörpern mit Transversalwandlern ermittelten μ_d -Werten kann gefolgert werden, daß bei sorgfältig verdichteten Konstruktionsbetonen im Alter über 28 Tagen mit guter Näherung ein μ_d -Wert von 0,22 angenommen werden kann. Sofern bei einer E_d -Bestimmung mittels Ultraschall noch keine Transversalwandler zur Verfügung stehen und daher nur v_L gemessen werden kann, wird man durch das Einsetzen von $k(\mu) = k(0,22) = 0,87$ in Gleichung (15) dem wahren E_d -Wert recht nahe kommen. Im Rahmen dieser Untersuchungen hat sich außerdem gezeigt, daß eine absolute Bestimmung der Betondichte ρ durch eine μ_d -Messung nicht möglich ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die dynamische Messung der Poissonkonstanten (Querdehnungszahl) μ_d an Bauwerken oder Bauteilen aus Beton mit guter Genauigkeit durch den Einsatz eines Ultraschall-Impulsverfahrens gelingt. Für die Messung müssen ein Ultraschalloszillograph und Transversalwandler (Sender, Empfänger) zur Verfügung stehen. Die Bauteildicke bzw. der Schallweg L zwischen Sender und Empfänger muß dabei nicht bekannt sein, da

ρ	V_L	V_T	μ	$G_d(\mu)$	$Q_d(\mu)$	$E_d(\mu)$	$E_d(0.15)$	$E_d(0.2)$	$E_d(0.25)$	$E_d(0.3)$
kg/dm ³	km/s	km/s	-	kp/cm ²	kp/cm ²	kp/cm ²	kp/cm ²	kp/cm ²	kp/cm ²	kp/cm ²
2.30	4.30	2.68	0.18	169000	208000	399000	411000	390000	361000	322000
2.21	4.24	2.48	0.24	138000	220000	343000	384000	365000	337000	301000
2.21	4.32	2.50	0.24	144000	228000	356000	398000	379000	350000	312000
2.21	4.15	2.42	0.24	132000	211000	329000	368000	349000	323000	288000
2.12	3.98	2.23	0.27	108000	198000	274000	324000	308000	286000	254000
1.94	3.48	1.83	0.30	68000	148000	178000	227000	216000	200000	178000

Tab. I Mit transversalen und longitudinalen Ultraschallimpulsen dynamisch ermittelte, elastische Konstanten μ_d (Querdehnungszahl), G_d (Schubmodul), Q_d (Kompressionsmodul) und E_d (Elastizitätsmodul) einer unterschiedlich verdichteten Prüfkörperserie aus Bn 350. Zum Vergleich wurde E_d für die Schätzwerte $\mu = 0,15 - 0,2 - 0,25 - 0,3$ berechnet.

er sich in Gleichung (16) in dem Verhältnis $(V_T/V_L) = (L/t_T)/(L/t_L) = (t_L/t_T)$ herauskürzt. Auf ungenaue Schätzwerte kann daher in Zukunft verzichtet werden. Sollen auch E_d (Gl. 15), Q_d und G_d (Gl. 13) bestimmt werden, müssen zusätzlich $V_L = L/t_L$ und φ bekannt sein. Für die dynamische Messung der elastischen Konstanten von Beton mittels Ultraschall kann das dreiparametrische Verfahren P_3 auf die zweiparametrische Methode $P_2 (V_L, V_T)$ reduziert werden.

5.2.2 Nachweis von Verdichtungsfehlern und Rezepturänderungen

Die hier beschriebenen Untersuchungen dienen in erster Linie einer Beantwortung der Frage, ob sich das vorgeschlagene Prüfverfahren im Rahmen einer zerstörungsfreien Qualitätskontrolle von Betonbauteilen einsetzen läßt. In diesem Zusammenhang wird besonders an eine Produktionskontrolle in Betonfertigteilfabriken oder bei jeweils gleichen Konstruktionselementen aus Ort beton (Stützen, Träger, Wand- und Deckenabschnitte usw.) eines Bauwerks gedacht, da in beiden Fällen eine hinsichtlich Herstellung und Verarbeitung einheitliche Betonqualität angestrebt wird. In Anlehnung an diese Überlegungen wurde an eigens für diese Zwecke hergestellten kleinen Prüfkörperserien geprüft, wie sich Veränderungen der Verdichtung, der Zementsteingüte und der Sieblinie auf die einzelnen Meßparameter des Verfahrens $P_3 (V_L, V_T, J_L)$ auswirken. Da im folgenden die Prüfmethode $P_3 (V_L, V_T, J_L)$ verschiedentlich durch $P_3 (V_L, J_L, \mu)$ ersetzt wird, soll schon in dieser Vorbemerkung auf ihre völlige Identität hingewiesen werden. Wegen der Berechnung von μ aus V_L und V_T (vgl. Gl. 16) basieren beide Verfahren ja letztlich auf dem gleichen Parametertripel (V_L, V_T, J_L) .

5.2.2.1 Fehlerhafte Frischbetonverdichtung

An drei Prüfkörperserien, die jeweils aus Betonchargen der angestrebten Güteklassen Bn 150, Bn 350 und Bn 550 hergestellt worden waren, wurde die Betondichte durch unterschiedliche Verdichtungsverfahren geändert (Rüttelflasche $\varnothing 38$ mm, 30 s. Rütteltisch, 120 s. Rütteltisch, 30 s. Stampfen nach DIN 1084, Stochern, einfaches Einfüllen in die Schalung). Dadurch ergaben sich in den einzelnen Serien Dichteänderungen zwischen 0,01 und 0,3 kg/dm³. An den Probekörpern (Würfel mit 20 cm Kantenlänge) wurden im Alter von 30 Tagen V_L , V_T und J_L gemessen sowie aus dem Verhältnis (V_T/V_L) die Poissonkonstante μ_d berechnet.

Es zeigte sich, daß eine Dichteänderung von 0,01 - 0,1 kg/dm³ die Schallgeschwindigkeit bis zu 10 % und die Intensität zwischen 10 - 20 % herabsetzt. Wird die Dichte um 0,2 - 0,3 kg/dm³ gesenkt, verringern sich die Schallgeschwindigkeiten um 10 - 20 % und die Intensitäten um 60 - 70 %. Außerdem wurde bei allen Prüfkörperserien der bereits in Abschnitt 5.2.1. beschriebene Anstieg von μ_d bei abnehmender Dichte beobachtet. Zur Berechnung der prozentualen Abweichungen von Dichte, Schallgeschwindigkeiten und Intensität wurde in den einzelnen Prüfkörperserien als Bezugsprobe jeweils der Würfel mit dem höchsten Verdichtungsgrad (Rüttelflasche) ausgewählt.

Zunächst fällt auf, daß die Intensität wesentlich empfindlicher auf Dichteänderungen reagiert als die Schallgeschwindigkeit. Bei dünnen Bauteilen ($L < 50$ cm) aus hochwertigem Beton (z. B. Bn 550) lassen sich Dichteschwankungen wegen zu geringer Schallgeschwindigkeitsänderungen überhaupt nur durch eine Intensitätsmessung nachweisen. Als Ursache für die gute Nachweisempfindlichkeit der Intensität kann die in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Streuung an den hier durch mangelnde Verdichtung verstärkt auftretenden Lunkern angesehen werden. Am Schallempfänger stehen daher die gestreuten Impulstanteile für die Intensität nicht mehr zur Verfügung. Demgegenüber ändert sich V_L (vgl. Gl. 3) in erster Näherung nur um den relativ kleinen Wert $V/V_0 = \rho_0/\rho$, ($\rho_0 =$ Solldichte, $V_0 = V_L(\rho_0)$).

Schematisch lassen sich die hier gefundenen und von der Theorie her auch einleuchtenden ersten Untersuchungsergebnisse in der folgenden Übersicht darstellen:

Dichte herabgesetzt		
Meßparameter	Änderung	(Vorzeichen)
V_L	gering - mittel	(-)
J_L	mittel - hoch	(-)
$\mu(V_T/V_L)$	hoch	(+)

Nimmt die Dichte gegenüber dem Sollwert zu, kehren sich alle Vorzeichen der letzten Spalte um ((-) = Abnahme, (+) = Zunahme).

5.2.2.2 Herabgesetzte Zementmenge

Die bereits im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Prüfkörper der Güteklassen Bn 350 und Bn 150 unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Mischungsbestandteile nur im Zementgehalt. Die Würfel der Güteklasse Bn 150 ergaben sich durch einen Austausch von 40 kg/m^3 Zement gegen die gleiche Menge Normsand I aus dem Betonrezept (Zementgehalt 240 kg/m^3) der Probekörperserie Bn 350, in der sich bei einwandfreier Verdichtung des Frischbetons Druckfestigkeiten um 380 kp/cm^2 ergaben. An diesen beiden Würfelserien wurden die Auswirkungen einer herabgesetzten Zementsteingüte auf die einzelnen Ultraschallmeßparameter überprüft.

Es zeigte sich, daß die Schallgeschwindigkeit um etwa 4 % und die Intensität um etwa 20 % abgenommen hatte. Dieses durch eine Minderung des Zementsteinanteils in der Feinmörtel-Matrix hervorgerufene Wertepaar läßt sich an der fehlerfrei gemischten Betoncharge (Bn 350) auch durch eine Verdichtungsabminderung um ca. 0.1 kg/dm^3 erzeugen. Als Unterscheidungshilfe, ob ein Verdichtungsmangel oder eine herabgesetzte Matrixgüte (Verdichtung einwandfrei) die Ursache für die beobachteten gleichen Wertepaare war, kann hier die Poissonkonstante μ_d (bzw. das Verhältnis V_T/V_L) herangezogen werden. Im Vergleich zum fehlerfreien Sollbeton ergaben sich die folgenden Verhältnisse:

Meßparameter	V_L m/s	J_L mV	μ_d -
Sollbeton Bn 350	4300	77	0,19
Verdichtungsfehler (- $\Delta = 0,1 \text{ kg/dm}^3$)	4120	62	0,25
abgeminderte Matrixgüte	4120	62	0,21

Der Verdichtungsfehler zeichnet sich bei sonst gleichen Schallmeßparametern durch die größere Poissonkonstante ab.

Die hier bei unverändertem Zuschlags skelett gefundene hohe Intensitätsabnahme erklärt sich aus der Veränderung des Verhältnisses W_{Ze}/W_{Zu} der Schallwiderstände von Zementstein ($W_{Ze} = V_{L-Ze} \cdot \rho_{Ze}$) und Zuschlag ($W_{Zu} = V_{L-Zu} \cdot \rho_{Zu}$) in Richtung eines schlechteren Durchlässigkeitsgrades der Grenzfläche Zementstein - Zuschlag (vgl. Gl. 9), so daß die einzelnen Zuschlagkörner die Impulsenergie jetzt stärker streuen. Die Intensität wird zusätzlich durch die im Feinmörtel mit verringertem Zementgehalt angewachsene Absorption herabgesetzt. Die Ursache für die Schallgeschwindigkeitsabnahme muß in einem kleineren Elastizitätsmodul der Matrix (vgl. Gl. 3 und 14) gesucht werden. Eine plausible Erklärung für das Verhalten von μ_d konnte nicht gefunden werden.

Auch das hier gefundene Ergebnis läßt sich zu Vergleichszwecken angenähert in folgendem Schema darstellen:

Herabgesetzte Zementmenge		
Meßparameter	Änderung	(Vorzeichen)
V_L	mittel - hoch	(-)
J_L	mittel - hoch	(-)
$\mu (V_T/V_L)$	gering - mittel	(+)

Wird der Zementanteil gegenüber dem Sollrezept erhöht, kehren sich die Vorzeichen naturgemäß um.

5.2.2.3 Veränderungen am Zuschlag

Um erste Aussagen über die Einflüsse einer Änderung des Mischungsrezeptes auf der Zuschlagseite auf die Schallmeßparameter zu erhalten, wurden zwei Prüfkörperserien betoniert, die sich in der Sieblinie ihrer Zuschläge unterschieden. Dabei wurde zunächst nicht darauf geachtet, ob die Gesteinsarten beider Fraktionen identisch waren. Gegenüber dem vorgegebenen "Sollbeton" mit einem Anteil der Korngruppe 7 · 15 mm von 45 % wurden in der "Fehlcharge" der Anteil dieser Korngruppe auf 15 % verringert und der dadurch entstandene Fehlbedarf an Zuschlag durch 30 % der Korngruppe 0 - 1 mm ersetzt.

Bei den vergleichenden Messungen zeigte sich erstmals, daß die Änderungen von Schallgeschwindigkeit und Intensität nicht notwendigerweise gleichsinnig (Abnahme bzw. Zunahme) erfolgen müssen. Durch die beschriebene Sieblinienverschiebung ergab sich hier eine um ca. 10 % verringerte Schallgeschwindigkeit, aber eine um ca. 30 % angestiegene Intensität. μ_d wurde nur geringfügig beeinflusst. Die hohe Intensitätszunahme ist zwangsläufig auf die im Mittel stark verkleinerten Korndurchmesser zurückzuführen, da Inhomogenitäten unter 1 mm \varnothing - bei ähnlichen Schallwiderständen wie der umgebende Zementstein - vom Schallimpuls als Streuzentren kaum noch wahrgenommen werden (vgl. Abschnitt 4.2.1). Die Abnahme der Schallgeschwindigkeit läßt nun einen kleineren Elastizitätsmodul der Korngruppe 0 - 1 mm gegenüber dem der Korngruppe 7 - 15 mm vermuten (vgl. Gl. 3 und 14), was bedeuten würde, daß bei dieser Maßnahme auch eine Veränderung in der Gesteinszusammensetzung erfolgte.

Bezieht man die Ergebnisse der vorstehenden Überlegungen hinsichtlich der Einflüsse von Streuung und E-Modul der Zuschläge auf die Schallmeßparameter in das Untersuchungsergebnis ein, so sind folgende Kombinationen von Meßwertänderungen möglich und deutbar:

Wechsel der Sieblinie oder des Zuschlagmaterials					
Meßparameter	Änderung	(Vorzeichen)			
V_L	gering - stark	(+)	(-)	(+)	(-)
J_L	gering - stark	(+)	(-)	(-)	(+)
$\mu (V_T/V_L)$	gering	(- +)			

Durch einen Vergleich dieses Schemas mit den entsprechenden Tabellen der Kapitel 5.2.2.1 und 5.2.2.2 folgt, daß eine Veränderung von Zuschlagart und Kornaufbau immer dann sicher nachgewiesen werden kann, wenn eine Intensitätserhöhung (+) mit einer Schallgeschwindigkeitsverringerng (-) (und umgekehrt) gekoppelt ist: Ein derartiger Fall kann weder durch einen Verdichtungsmangel noch eine Änderung der Zementmenge hervorgerufen werden. Außerdem läßt sich auch aus den oben erläuterten Gründen mit großer Wahrscheinlichkeit voraussagen, daß eine hohe Intensitätsänderung, verbunden

mit nur geringen Auswirkungen auf die Schallgeschwindigkeiten, ihre Ursache nur in einer geänderten Sieblinie (Streuung) bei gleichem Zuschlagmaterial (elastische Eigenschaften) haben kann.

5.2.2.4 Hinweise für eine Kontrolle von Serienbauteilen

Die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Untersuchungen und aufgestellten Schemata können naturgemäß noch nicht dazu dienen, ein sicheres und allgemein anwendbares zerstörungsfreies Ultraschall-Prüfverfahren für Serienbauteile beispielsweise innerhalb einer Fertigteilmfabrikation anzugeben. Dafür ist wegen der bisher kleinen Prüfkörperanzahlen und der wenigen Betonparametervariationen die Meßwertbasis einfach zu klein. Gezeigt werden konnte jedoch, daß es durchaus möglich ist, Qualitätsänderungen in Betonbauteilen nachzuweisen und deren Ursachen anzugeben. Daß sich für diesen Zweck wegen der angewendeten vergleichenden Meßmethode (Relativverfahren) besonders Serienbauteile eignen, folgt unmittelbar aus der angestrebten Konstanz von Beton- und Herstellungsparametern während der Produktion. Die einzelnen Fallunterscheidungen für die Ursachen der Meßwertänderungen werden außerdem sicher dadurch erleichtert, daß normalerweise nicht mehrere der genannten Fehlermöglichkeiten gleichzeitig zusammentreffen. Abgesehen davon erhält ein Prüfer aus den Meßwertänderungen auch dann noch einen Hinweis auf Abweichungen von der angestrebten Sollgüte, wenn das Meßergebnis durch die Überlagerung mehrerer Fehler keine genaue Analyse seiner Ursachen zuläßt.

Für derartige Qualitätskontrollen kann nur das dreiparametrische Verfahren $P_3 (V_L, V_T, J_L) = P_3 (V_L, J_L, \mu)$ eingesetzt werden, da durch eine Reduktion auf P_2 oder P_1 wesentliche Informationen verloren gehen. Wegen des relativen Meßverfahrens muß außerdem dafür gesorgt werden, daß an jedem geprüften Bauteil die gleiche Schallmeßstrecke L gewählt wird. Die Meßparameter $V_L = L/t_L$ und $V_T = L/t_T$ können dann durch die Schalllaufzeiten t_L und t_T ersetzt werden, was zu einer Vereinfachung der Auswertung führt.

5.2.3 Nachweis von Hohlräumen und Rißflächen

Während in den Untersuchungen der Abschnitte 5.2.1 und 5.2.2 die Einflüsse von Veränderungen der elastischen Eigenschaften, der echten Absorption und der Streuung auf die Schallmeßparameter für eine Kontrolle der Ausführungsqualität von Betonbauteilen genutzt wurde, soll hier unter Einsatz des Verfahrens P_3 die Möglichkeit eines Nachweises von Hohlräumen und Rißflächen in Betonkonstruktionen durch die Auswirkungen der Reflexion auf die Schallausbreitung geprüft werden. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1. erläutert wurde, treten Reflexionen immer dann auf, wenn der Schallimpuls im Bauteil auf Inhomogenitäten trifft, deren Durchmesser senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung größer oder gleich der Wellenlänge λ sind. Für die Erkennbarkeit einer Inhomogenität ist aber außerdem noch der Betrag des Reflexionsgrades R (vgl. Gl. 9) an der Grenzfläche "Beton-Inhomogenität" von großer Bedeutung. Optimale Verhältnisse für die Nachweispfindlichkeit ergeben sich daher an den Grenzflächen Beton-Luft mit $R > 90 \%$, wie sie beispielsweise bei luftgefüllten Hohlräumen, Kiesnestern und Rißflächen vorliegen. Der für einen Nachweis erforderliche Mindestdurchmesser einer Fehlstelle läßt sich aus der Frequenz f des Schallimpulses und seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit V im Beton nach Gleichung (2) zu 5 - 10 cm abschätzen. Dabei ist allerdings noch nicht die im Beton vorliegende Impulsausbreitung auf Kugelflächen berücksichtigt, die es ermöglicht, daß der Impuls um die Fehlstelle herumläuft und in ihren geometrischen Schatten eindringt. Ein entscheidendes Kriterium für den Fehlstellen nachweis ist daher auch das Verhältnis aus Fehlstellenquerschnitt senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung und Bauteildicke (Schallwegstrecke).

Um zunächst die grundsätzliche Eignung des Verfahrens P_3 für das Auffinden derartiger Inhomogenitäten zu prüfen, wurde ein Testbalken von $20 \times 20 \text{ cm}^2$ Querschnitt mit folgenden künstlichen Fehlern betoniert:

- a) Zylindrischer Hohlraum ($\emptyset = 10 \text{ cm}$, Höhe = 20 cm) senkrecht zur Balkenlängsachse.
- b) Zylindrischer Hohlraum wie bei a), der noch während des Betonierens mit einem Gemisch aus Grobzuschlägen, Zement und Wasser ausgefüllt wurde ("Kiesnest").

c) Rechteckige Rißfläche (Breite = 10 cm, Höhe = 20 cm) mit einer Flächennormalen senkrecht zur Balkenlängsachse. Diese Rißfläche wurde durch ein dünnes, zu Anfang einbetoniertes Blech erzeugt, das nach sechs Stunden aus dem Balken herausgezogen wurde. Da der Beton zu diesem Zeitpunkt noch nicht völlig erstarrt war, fielen die den "Riß" begrenzenden Betonflächen etwas in sich zusammen, so daß es zu vielen kleinen Kontaktstellen innerhalb der Rißfläche kam. Dadurch sollten Verhältnisse geschaffen werden, die denen in einem echten Riß geringer Weite am ehesten entsprachen.

Alle Fehlstellen waren so bemessen worden, daß sich in Durchschallungsrichtung eine wirksame Querschnittsfläche von $10 \times 20 \text{ cm}^2$ ergab, eine gegenseitige Beeinflussung der Testfehler war durch eine entsprechende Wahl ihrer Abstände untereinander ausgeschlossen.

Auffälligstes Ergebnis dieser Untersuchung ist die für den Fehlstellennachweis wesentlich höhere Empfindlichkeit der Intensität gegenüber der Impulslaufzeit.

	V_L	J_L
Hohlraum \varnothing 10 cm	54,0 μs	6
Kiesnest \varnothing 10 cm	51,8 μs	6
Rißfläche, Breite 10 cm	48,0 μs	20
fehlerfrei	46,5 μs	46

Bei dem Hohlraum kann der Impuls naturgemäß nicht mehr auf dem direkten Weg vom Sender zum Empfänger gelangen, sondern sein nicht reflektierter Anteil muß um die Fehlstelle herumlaufen. Wie eine einfache geometrische Überlegung zeigt, ergibt sich dadurch gegenüber den fehlerfreien Balkenbereichen eine Weg- bzw. Impulslaufzeitzunahme von ca. 15 %, was bei den hier gewählten Fehlstellenbreiten im 20 cm dicken Testbalken zu einer Laufzeiterhöhung von etwa 7 μs führt. Dieser Wert wurde in dem Hohlraum auch tatsächlich erreicht.

Der direkte Weg durch die luftgefüllte Fehlstelle hindurch hätte dagegen eine Laufzeitzunahme von etwa 270 μ s erbracht (v (Luft) = 340 m/s).

Die Laufzeitzunahme an der Fehlstelle "Kiesnest" beträgt hier 5,3 μ s. Der Impuls konnte also offenbar durch Kontaktbrücken zwischen den Grobzuschlägen auf einer gegenüber dem Hohlraum kürzeren Wegstrecke vom Sender zum Empfänger gelangen. Bedingt durch die kleinen Kontaktflächen hat dieser "Schallübertragungskanal" jedoch einen sehr geringen Querschnitt und kann nur Bruchteile der Impulsenergie durchlassen. Die Empfangsintensität ist daher ebenfalls nur gering.

Völlig andere Verhältnisse ergeben sich dagegen an einer zur Durchschallungsrichtung senkrechten Rißfläche. Wegen der zweidimensionalen Ausdehnung dieser Fehlstelle befindet sich in jedem möglichen Schallweg vom Sender zum Empfänger jeweils nur eine Kontaktbrücke. Liegen Sender, Kontaktbrücke und Empfänger auf einer Geraden, wird sich die Schalllaufzeit gegenüber dem fehlerfreien Bereich überhaupt nicht ändern. Bei sehr kleinen Rißweiten - mit einer entsprechend hohen Anzahl von Kontaktstellen - kann außerdem ein nicht unerheblicher Schallenergie-transport stattfinden. Die hier betonierte künstliche Fehlstelle zeigt dementsprechend auch eine nur geringe Laufzeitzunahme und eine gegenüber dem luftgefüllten Hohlraum höhere durchgelassene Schallintensität.

Ergibt sich daher beim Abtasten eines Betonbauteils im Rahmen einer derartigen Messung ein breites Intensitätsminimum in Verbindung mit geringfügigen Laufzeitzunahmen, wird man als Ursache dafür eine ausgedehnte Rißfläche mit Kontaktstellen annehmen können, da ein - hinsichtlich seiner Abmessungen senkrecht zur Schallrichtung - vergleichbarer Hohlraum auch eine hohe Laufzeitzunahme zur Folge hat.

In Abb. 33 sind die longitudinale Impulslaufzeit und die Intensität über den Fehlstellen im Testbalken aufgetragen. Auf die zusätzliche Messung und Auftragung auch der transversalen Schallgeschwindigkeit wurde bewußt verzichtet, da makroskopische Fehlstellen dieser Abmessungen keinen Einfluß auf die elastischen Eigenschaften des Materials haben. Für den Nachweis von Fehl-

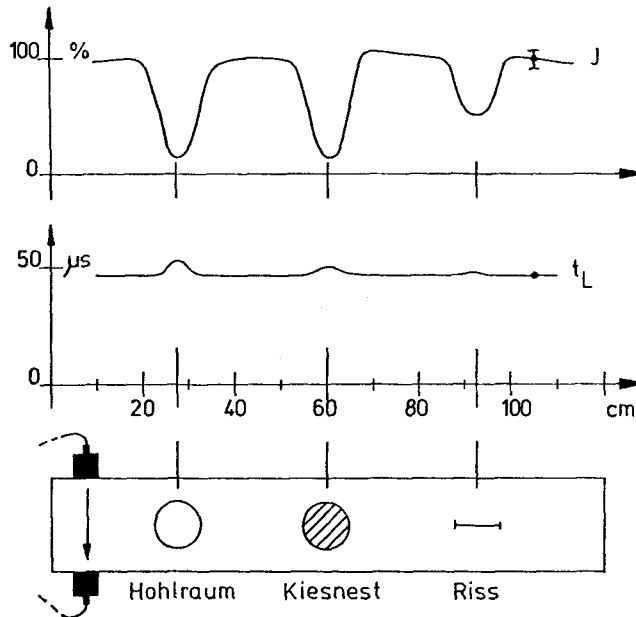


Abb. 33 Intensität und Schalllaufzeit in Abhängigkeit vom "Bauteilfehler" (Meßstellenabstand 2.5 cm)

stellen der hier beschriebenen Art kann daher das reduzierte Verfahren P_2 (V_L , J_L) eingesetzt werden.

Weitere Untersuchungen dienen einer Beantwortung der Fragen nach

- a) einer Erkennbarkeit eines wassergefüllten Hohlraumes,
- b) einer Kontrollmöglichkeit für nachträglich ausbetonierte Hohlräume und
- c) dem für den Nachweis erforderlichen Mindestdurchmesser der Fehlstelle im Verhältnis zur Bauteildicke.

Es zeigte sich, daß in den hier erzeugten Fehlstellen eine Wasserfüllung ohne Einfluß auf die Meßwerte bleibt. Die Ursache dafür ist in der gegenüber Beton etwa 60 - 70 % geringeren Schallgeschwindigkeit des Wassers zu suchen, so daß die vom Beton übertragenen Impulsanteile trotz der geschilderten Umwege eher am Empfänger eintreffen und daher auch für das Meßergebnis bestimmend sind. Aus verständlichen Gründen konnte zur Beantwortung der Frage b)

am Testbalken nur der luftgefüllte Hohlraum nachträglich ausbetoniert werden. Bereits nach 14 Tagen ergaben sich an dieser Meßstelle die gleichen Schallkennwerte wie in den fehlerfreien Balkenbereichen, so daß auf einen guten Verbund zwischen nachträglich eingefülltem und ursprünglichem Beton geschlossen werden konnte. An einem eigens zur Beantwortung der Frage c) betonierten Testbalken konnte festgestellt werden, daß ein Fehlstellennachweis bei einem senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung wirksamen Durchmesser unter 20 % der Bauteildicke nicht mehr mit der nötigen Sicherheit gelingt.

Ein Praxiseinsatz dieses Meßverfahrens sollte aus wirtschaftlichen Erwägungen wegen des relativ geringen Meßpunktabstandes von 2 - 3 cm nur an Bauteil- oder Bauwerksbereichen erfolgen, in denen bereits eine Fehlstelle vermutet wird. Ein derartiger Fall liegt beispielsweise vor, wenn der Verpreßzustand eines Spannkanales überprüft werden muß. Abb. 34 zeigt das Ergebnis einer Durchschallung an dem 30 cm dicken Steg eines Brückenträgers aus Spannbeton.

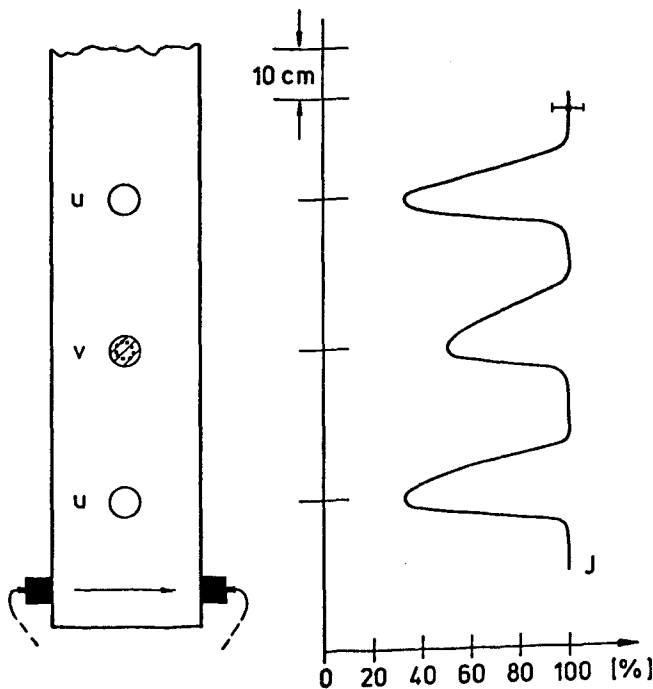


Abb. 34 Intensitätsabnahmen an einem unverpreßten (u) und einem verpreßten (v) Spannkanaal (\varnothing 6 cm) in einem 30 cm dicken Bauteil

Im Steg waren mehrere Spannglieder in einem Abstand von ca. 30 cm übereinander angeordnet, von denen eines bereits verpreßt war. Da die Hüllrohre mit 6 cm \varnothing hinsichtlich ihrer wirkenden Querschnittsfläche senkrecht zur Schallrichtung mit 20 % der Bauteildicke den Mindestanforderungen für einen Nachweis genügten, konnte erwartet werden, daß sich der Verpreßzustand durch die Intensität bestimmen läßt.

Wie aus Abb. 34 hervorgeht, ergaben sich sowohl am verpreßten als auch am unverpreßten Spannglied relativ hohe Impulsenergieverluste von über 50 % gegenüber den spanngliedfreien Stegbereichen des Trägers. Als Ursache dafür kann die Reflexion an der Grenzfläche Beton-Hüllrohrblech angesehen werden ($R \sim 40 \%$). Trotzdem läßt sich durch die unterschiedliche Tiefe der Intensitätsminima in den Meßkurven noch deutlich zwischen "verpreßt" und "unverpreßt" unterscheiden. Der durch das Hüllrohr bedingte Umweg des Schallimpulses ist dagegen - wie eine einfache geometrische Abschätzung sofort zeigt - mit 0,6 cm zu klein, um signifikante Laufzeitunterschiede zuzulassen. Da t_L aber bei einer Intensitätsmessung automatisch mitgemessen wurde, ergibt sich kein wirtschaftlicher Vorteil, wenn in einem solchen Fall das Verfahren P_3 auf $P_1 = P_1 (J_L)$ reduziert wird.

Unter den genannten Voraussetzungen ist es also prinzipiell möglich, Lage und Verpreßzustand eines Spannkabels mit dem Verfahren $P_2 (V_L, J_L)$ anzugeben. In diesem Zusammenhang bleibt aber noch zu klären, ob und in welchem Ausmaß Verbundfehler zwischen Hüllrohr und Verpreßmörtel bzw. zwischen Hüllrohr und umgebendem Beton oder die Zahl, Anordnung und Lage der Spannstähle das Untersuchungsergebnis beeinflussen.

5.3 Beobachtung des Entstehens und der Weiterentwicklung von Mikrorissen bei einachsiger Druckbelastung

Beton ist ein inhomogener Baustoff, der sich aufgrund seines mehrphasigen Aufbaus aus Zementstein und Zuschlägen wie ein viskoelastischer Körper verhält. Daher können eindeutige und umkehrbare Beziehungen zwischen Spannungen und Formänderungen sowie mathematisch faßbare Bruchkriterien bisher nicht angegeben werden. Es ist jedoch bekannt, daß die Zerstörung des Betongefüges unter Last eine Folge des Auftretens und der Weiterentwicklung von Mikrorissen ist, deren Ursachen in den Wechselwirkungen zwischen den bereits eingprägten, primären Spannungsfeldern (hervorgerufen durch das Zusammenwirken von Zementstein und Zuschlägen) und den sekundären, von außen aufgetragenen Spannungsfeldern (hervorgerufen durch die unterschiedlichen Verformungseigenschaften der Betonkomponenten) zu suchen sind. So ist beispielsweise aus spannungsoptischen Untersuchungen an belasteten Betonproben bekannt, daß hohe Spannungskonzentrationen bereits bei den ersten Belastungsstufen an den groben Zuschlagstoffen und außerdem überall dort auftreten, wo Zuschlagkörner dicht nebeneinander liegen. Es muß daher schon bei Belastungsstufen weit unterhalb der Bruchlast mit dem Auftreten von Mikrozerstörungen gerechnet werden, wobei naturgemäß diejenige von außen aufgetragene Druckspannung von besonderem Interesse ist, die bereits eine effektive Festigkeitsschwächung hervorruft. Alle Bemühungen, die Theorie des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton auf mathematischer Basis weiterzuentwickeln, waren daher stets mit experimentalphysikalischen Untersuchungen verknüpft, die der Ermittlung von Spannungs-Dehnungslinien und der Beobachtung der Mikrorissenentstehung und des Rißwachstums galten (vgl. 97, 98, 99).

Die in diesem Zusammenhang von RICHART und ERANDTZAEG (100) bereits 1930 mit Dehnungsmeßverfahren durchgeführten Untersuchungen haben bei der Beobachtung der Längs- und Querdehnung von belasteten Probekörpern als erstes Ergebnis gezeigt, daß das Volumen des Prüfkörpers nach einer anfänglichen Abnahme (infolge der Kompression) kurz vor dem Bruch wieder zunahm. Dieser Effekt wurde in der Folgezeit genauer untersucht, und es ergab sich, daß er durch eine bei hoher Belastung zunehmenden Gefügelockerung hervorgerufen wird. Erste Versuche, mit Ultraschallverfahren Bruchvorgänge in belasteten Betonbauteilen zu studieren, wurden bereits von JONES (72) mit Erfolg durchgeführt. Die Durch-

schallung von Betonprismen senkrecht und parallel zur Belastungsrichtung ergab, daß eine deutliche Laufzeitzunahme nur bei Impulsen beobachtet werden konnte, die den Prüfkörper senkrecht zur Belastungsrichtung durchlaufen hatten. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß ein Ultraschallimpuls auf seinem Weg vom Sender zum Empfänger nur durch Rißflächen mit einer Flächenkomponente senkrecht zur Impulsausbreitung zu "Umwegen" gezwungen wird, konnte aus diesen Ergebnissen direkt auf eine zur Belastungsrichtung parallele Ausbildung der Mikrorisse geschlossen werden. In der Folgezeit wurden daher zum Studium der Mikrozerstörungen von Beton und der damit verbundenen Eigenschaftsänderungen des Baustoffs neben den spannungsoptischen, mikrofotografischen und Dehnungsmeßverfahren auch die Ultraschallmethode verstärkt eingesetzt. So konnten beispielsweise KORDINA, ROY und WAUEKE (17) durch Laufzeitmessungen nachweisen, daß die Rißentwicklung in Beton bei kontinuierlicher Laststeigerung auch stufenweise erfolgen kann.

Aufgrund von Ergebnissen der vorab beschriebenen Untersuchungsverfahren lassen sich für das Dauerstandverhalten belasteter Betonkörper zwei charakteristische Spannungswerte S_1 und S_2 definieren. Oberhalb der Spannung S_1 setzen die eine effektive Festigkeitsschwächung hervorrufenden Mikrozerstörungen ein, was gleichzeitig mit einer Gefügelockerung bzw. einer entsprechend verlangsamt Volumenabnahme des Prüfkörpers verbunden ist. Die Spannung S_1 wird daher auch Mikrorißgrenze genannt. Nach BERG (98) treten unterhalb S_1 bei einer Wechselbeanspruchung keine Ermüdungserscheinungen auf. Die Verformungen des Betons erfolgen in diesem Lastbereich quasielastisch, die Kriechdehnung ist linear. Im Belastungsintervall $S_1 - S_2$ setzt dann das nichtlineare Kriechen ein. Obwohl die Mikrozerstörungen hier monoton mit der Belastung zunehmen, hat sich jedoch gezeigt, daß die Mikrorißbildung zum Stillstand kommt, wenn die aufgebrachte Dauerlast den Wert S_2 nicht überschreitet. Diese Wiederverfestigung ist die Folge einer aktivierten Zementsteinhydratation an den frischen Bruchflächen. Erst eine Dauerlast, die den Wert S_2 übersteigt, führt durch die oberhalb von S_2 verstärkt einsetzende Strukturzerstörung zum Bruch.

S_1 und S_2 lassen sich mit einigem Aufwand aus einer Messung von Längs- und Querdehnung des belasteten Prüfkörpers, also aus einer Volumenbestimmung erhalten. S_1 wird dabei - wenn auch nicht sehr sicher - durch eine verringerte

Volumenabnahme angezeigt. Bei S_2 hat das Prüfkörpervolumen aufgrund der Kompression sein Minimum erreicht und nimmt oberhalb S_2 - bedingt durch die verstärkt einsetzende Gefügelockerung - wieder zu. Nach RÜSCH (99) liegt dieses Minimum zwischen 70 - 80 % der im Kurzzeitversuch ermittelten Bruchlast und stimmt daher recht gut mit den Werten der Dauerstandfestigkeit überein, so daß sich aus einer Bestimmung von S_2 unter Umständen die Möglichkeit einer Abschätzung der Dauerstandfestigkeit aus dem Kurzzeitversuch ergibt.

Ultraschallmessungen zeigen die Mikrorißgrenze S_1 durch eine Erhöhung der Impulslaufzeit an. Verschiedentlich wurde auch versucht, die Schallintensitätsmessung zur Bestimmung von S_2 heranzuziehen, da die Laufzeitmessung die Spannung S_2 nicht anzeigt. Bei der Intensitätsmessung ergaben sich jedoch erhebliche Schwierigkeiten bei der Ankopplung von Sender und Empfänger an den Prüfkörper, da sich dessen Oberfläche während der Belastung verformt, so daß die Ankopplungsbedingungen verändert werden. Eine konstante und von der jeweiligen Belastung unabhängige Schallübertragung war daher nur schwer zu erreichen. Trotz dieser Schwierigkeiten gelang es RÜSCH (99), den verstärkten Einsatz der Mikrozerstörungen oberhalb von S_2 in einem Intensitäts-Belastungsdiagramm nachzuweisen. Wegen der unsicheren Ankopplungsbedingungen wurden diese Untersuchungen jedoch nicht weitergeführt.

Mit den hier entwickelten Schallprüfköpfen wurde daher untersucht, ob sich S_1 und S_2 allein aus Ultraschallmessungen sicher bestimmen lassen. Um den Einfluß der Prüfkörperoberflächenverformung bei Belastung auf die Güte der Ankopplung und damit auf die Höhe der Empfangsintensität auszuschließen, wurden die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Prüfköpfe für flüssige Koppelmedien eingesetzt. Parallel zur gewählten Schallmeßstrecke wurden auch Transversalwandler angekoppelt, so daß t_L , J_L und t_T in Abhängigkeit von der Belastung auf nahezu gleichem Schallweg gemessen werden konnten.

Ein typisches Ergebnis derartiger Untersuchungen an Gütewürfeln mit 20 cm Kantenlänge ist in Abb. 35 dargestellt. Sowohl J_L als auch t_L und t_T lassen deutlich das Einsetzen der Mikrorißbildung ab $S_1 \approx 275 \text{ kp/cm}^2$ erkennen. Ein weiterer markanter Knick findet sich in allen Meßkurven bei etwa $S = (S_3) = 475 \text{ kp/cm}^2$. Diesem Wert kann definitionsgemäß nicht die Spannung S_2 zugeordnet

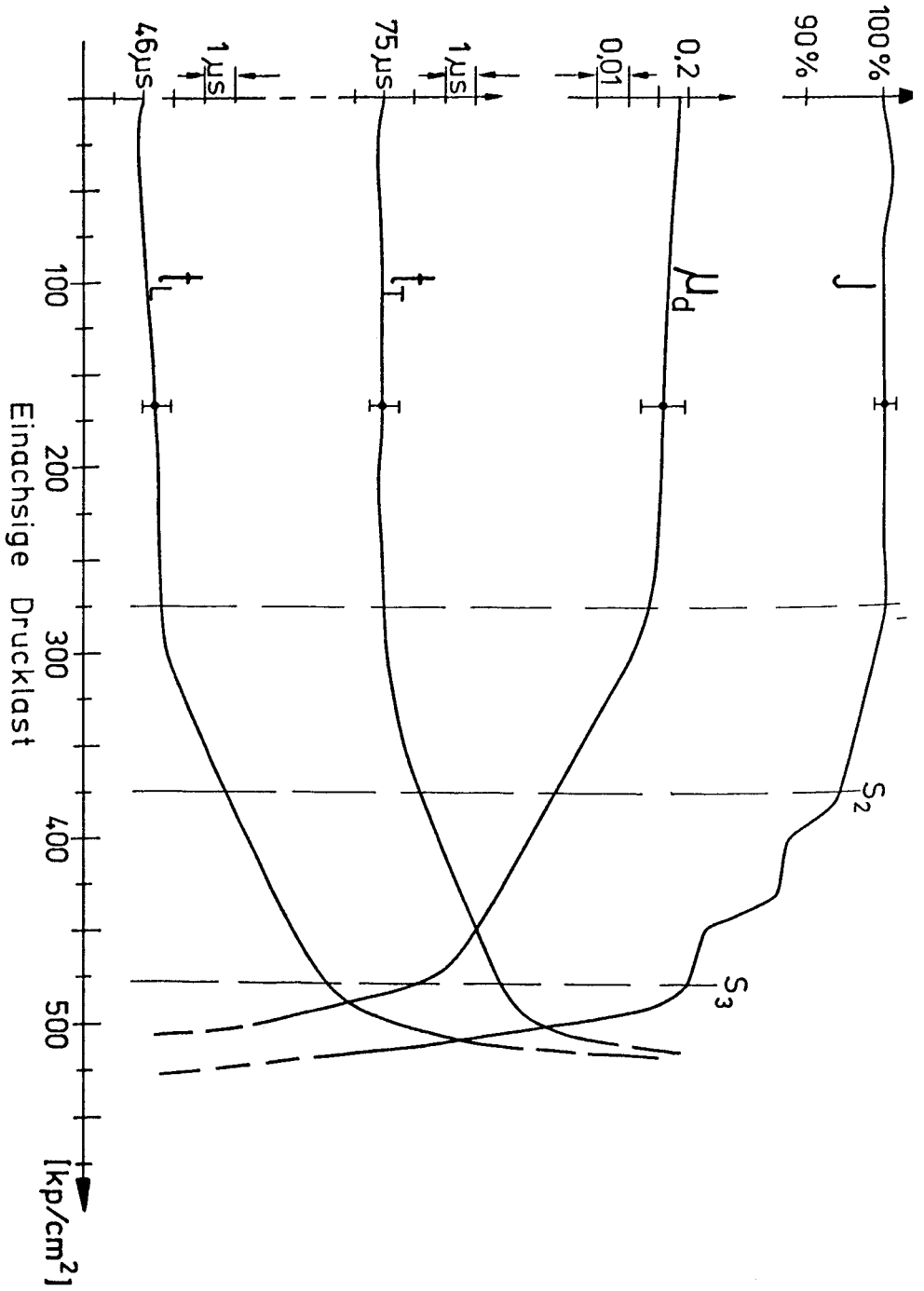


Abb. 35 Abhängigkeit der Ultraschall-Meßparameter von der Belastungshöhe bei einer Durschallung senkrecht zu Belastungsrichtung

werden, da er bereits unmittelbar mit dem Einsatz des Prüfkörperversagens zusammenfällt. Im Gegensatz zu den Laufzeitkurven, die im Intervall $S_1 - S_3$ keinen weiteren Knickpunkt aufweisen, bietet die Intensitätsmessung auch noch die Möglichkeit zur Festlegung von S_2 . Es ist deutlich zu erkennen, daß die Intensität J_L im Belastungsintervall $S_1 = 275 \text{ kp/cm}^2 \leq S \leq 375 \text{ kp/cm}^2 = S_2$ gleichmäßig mit der Belastung zunimmt. Oberhalb von S_2 treten jetzt jedoch sprunghafte Intensitätsabnahmen auf, die durch ein schlagartiges Auftreten vieler neuer Risse ebenso hervorgerufen werden können wie durch das plötzliche Zusammenwachsen vieler kleiner zu größeren Rißflächen. Die zur gleichen Zeit noch monotone Zunahme der Schalllaufzeiten spricht hier für die erste der beiden Annahmen. Der Effekt eines plötzlichen Zusammenwachsens vieler Mikrorisse zu makroskopischen Rißflächen kann jedoch aufgrund des scharfen Abknickens aller Meßkurven bei S_3 als Ursache für das Prüfkörperversagen angesehen werden. Zusammenfassend läßt sich also aus dem Ultraschall-Belastungsdiagramm der Abb. 35 - in Verbindung mit den eingangs kurz erläuterten Gegebenheiten aus der Theorie des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton (vgl. auch 98) - das Versagen des hier ausgewählten Prüfkörpers in folgende Abschnitte unterteilen:

Bereich I, 0 - S_1 :

Keine Veränderungen der Schallmeßparameter, so daß auch nicht mit einem Auftreten von Mikrozerstörungen gerechnet werden muß (quasielastisches Verhalten mit linearer Kriechdehnung, keine Ermüdung bei Wechselbeanspruchungen unter S_1).

Bereich II, $S_1 - S_2$:

Monotone Änderung aller Ultraschallmeßparameter durch einen gleichmäßigen Anstieg der Mikrorißdichte (nichtlineare Kriechdehnung durch plastische Verformung, Gefügelockerung mit Erholung, sofern S_2 nicht überschritten wird. S_1 ist die Mikrorißgrenze).

Bereich III, $S_2 - S_3$:

Unstetige Abnahme von J_L durch sprunghaftes Verdichten der Mikrorißphase (Zunahme der Streuzentren). Da t_L und t_T weiterhin mit der Last monoton

anwachsen, ist das Auftreten zusätzlicher makroskopischer Rißflächen unwahrscheinlich (ausgeprägte Zerstörungen der Betonstruktur, eine Dauerlast $> S_2$ führt zum Bruch, bleibende Dehnungen durch pseudoplastisches Verhalten).

Bereich IV, S_3 - Bruchlast:

Sprunghafte Änderung von J_L und Laufzeiten. J_L strebt rasch gegen Null, die Laufzeiten können demzufolge nicht mehr gemessen werden. Die Mikrorißphase hat jetzt eine so große Dichte, daß sich makroskopische Rißflächen bilden, die in kürzester Zeit zum Bruch führen.

Wesentlichstes Ergebnis dieser Untersuchung ist es, daß sich die für das Festigkeitsverhalten entscheidenden Spannungswerte S_1 (Mikrorißgrenze) und S_2 (~ Dauerstandfestigkeit) mit dem eingesetzten Ultraschallverfahren nachweisen ließen. Im Vergleich mit den Arbeiten von RÜSCH (99) zeigt sich ebenfalls ein S_2 in der Größenordnung zwischen 70 · 80 % der Bruchlast. Wie schon in den vorangegangenen Untersuchungsabschnitten hat sich auch hier das mehrparametrische Verfahren P_2 (t_L, J_L) den einparametrischen Methoden als überlegen erwiesen. Nur die gleichzeitige Erfassung von J_L und der Laufzeit ermöglichte eine Klärung der Rißentwicklung in den Bereichen I (keine Mikrorißbildung), II (monotone Zunahme der Mikrorißdichte), III (sprunghafte Zunahme der Mikrorißdichte, keine makroskopischen Rißflächen) und IV (makroskopische Rißflächen, Versagen des Bauteils).

Eine zusätzliche Messung von t_T bringt in diesem Zusammenhang keine weitere Information, solange nicht geklärt ist, wieso μ_d mit zunehmender Gefügelockereung (Abnahme der Dichte) abnimmt. Nach den Ergebnissen von Abschnitt 5.2.1 hätte nämlich erwartet werden müssen, daß μ_d mit abnehmender Dichte ansteigt. Die Abnahme von μ_d (vgl. Abb. 35) zeigte sich bei allen Belastungsversuchen auch dann, wenn t_L und t_T mit dem gleichen Schwingerpaar (Transversalwandler) bestimmt wurden, so daß ein unterschiedlicher Schallweg der longitudinalen und transversalen Impulse nicht als Ursache für die μ_d -Abnahme angesehen werden kann.

Die für die Rißentwicklung bis zum Bauteilversagen entscheidenden Spannungswerte S_1 und S_2 lassen sich durch eine entsprechende Wahl der Betonherstellungsparameter beeinflussen. Eine Möglichkeit für einen baupraktischen Einsatz des Verfahrens besteht daher auch in der Optimierung von Betonrezepturen hinsichtlich eines günstigen Festigkeits- und Verformungsverhaltens geplanter Bauteile.

6. Zusammenfassung

Die bisher im Bauwesen geübte Praxis, eine zerstörungsfreie Materialprüfung mittels Ultraschall nur einparametrig über die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit V_L longitudinaler Impulse durchzuführen, hat - abgesehen von einigen Relativverfahren - wenig Erfolge erzielen können. Ziel dieser Arbeit war es daher, in einem ersten Untersuchungsabschnitt zunächst die Zahl der zerstörungsfrei ermittelten Ultraschallmeßgrößen zu erhöhen, um damit die Aussagekraft der Schallprüfung durch die Schaffung eines mehrparametrischen, komplexen Prüfverfahrens zu verbessern. Da Schallprüfungen im Bauwesen bisher nicht zu den gängigen Prüfmethode zählen und dementsprechend ihre Problematik, Anwendungsmöglichkeiten und ihre apparativen Gegebenheiten nur wenig bekannt sind, wurde innerhalb der einleitenden Kapitel zusätzlich angestrebt, in straffer Form eine den Bedürfnissen der Baupraxis angepaßte Einführung in die Ultraschall-Prüfverfahren zu geben. Dieses Vorgehen wurde auch in den folgenden Kapiteln beibehalten, wenn es darum ging, die für das weitere Verständnis unbedingt nötigen physikalischen Zusammenhänge speziell aus der Sicht des Bauwesens zu erläutern. Dadurch soll erreicht werden, daß die Ergebnisse und Anregungen der hier vorgelegten Untersuchungen einem möglichst großen Kreis interessierter Fachleute - ohne einen zeitraubenden Rückgriff auf Sekundärliteratur - zur Verfügung stehen.

Aufgrund der im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig vorliegenden Erfahrungen schienen als weitere, zerstörungsfrei zu ermittelnde Meßparameter für das geplante komplexe Schallprüfverfahren die Ausbreitungsgeschwindigkeit V_T transversaler Impulse und die Messung der Impulsintensität J nach dem Durchlaufen des Prüfkörpers geeignet zu sein. Voraussetzung für die Bestimmung dieser Meßparameter war daher zunächst die Entwicklung geeigneter Schallsender und -empfänger (Prüfköpfe), die hinsichtlich Meßgenauigkeit, Handhabung und Robustheit den Anforderungen eines baupraktischen Einsatzes entsprachen.

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich gezeigt, daß eine Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit V_T transversaler Impulse am Baustoff Beton nur durch entsprechend optimierte Dickenschwinger (Transversalwandler) erfolgen kann. Derartige Schallwandler erlauben eine V_T -Bestimmung sowohl am sich verfestigenden als auch am bereits ausgehärteten Baustoff mit einer Meßgenauigkeit, die den systematischen Meßfehlern der V_L -Messung entspricht. Je nach Anwendungszweck und Bauteildicke haben sich bei der V_T -Bestimmung an Betonbauteilen Schallfrequenzen zwischen 50 - 150 kHz als am günstigsten erwiesen. Im Interesse der Meßgenauigkeit empfiehlt es sich jedoch, nach Möglichkeit Frequenzen aus dem oberen Bereich des angegebenen Intervalls auszuwählen.

Da bei derartigen Messungen Scherspannungen tangential zur Bauteiloberfläche eingeleitet werden müssen, können für die Ankopplung von Schallprüfköpfen zur Bestimmung von V_T nur aushärtende Koppelmedien verwendet werden. Die besten Ergebnisse wurden dabei mit einer eingedickten, heißen Zuckerlösung erzielt. Bei einer Ankopplung mit Gips ergaben sich dagegen besonders an rauen Bauteiloberflächen Schwierigkeiten bei der Entfernung der Koppelmittelrückstände vom Bauteil.

Zur Messung der Impulsintensität J mit der für eine Auswertung erforderlichen Reproduzierbarkeit der Ankopplungsbedingungen sind nur die schon von der V_L -Bestimmung her bekannten Dickenschwinger geeignet. Da diese Schwinger bei der Messung Druck- und Zugspannungen senkrecht auf die Bauteiloberfläche übertragen, kann die Ankopplung über plastische oder flüssige Koppelmittel erfolgen. Die für eine Betonprüfung erforderliche Reproduzierbarkeit der Ankopplung gelingt über plastische Koppelmedien wie beispielsweise Vaseline bei Anpreßdrücken von ca. 5 kp/cm^2 . Um die Einflüsse der Bauteiloberflächenstruktur auf das Meßergebnis auszuschalten, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Prüfkopfanzordnung entwickelt, die den Einsatz eines flüssigen Koppelmittels gestattet. Die besten Übertragungseigenschaften hinsichtlich der Meßwertreproduzierbarkeit ergaben sich dabei mit Terpentinöl. Diese Koppelflüssigkeit hat außerdem den Vorteil, nach der Messung auf dem Prüfkörper keine Spuren zu hinterlassen. Aushärtende Koppelmittel lassen eine reproduzierbare Ankopplung von Schallsender und -empfänger nicht zu.

Zur Intensitätsmessung eignen sich ebenfalls Frequenzen zwischen 50 - 150 kHz. Der Intensitätswert wird am Ultraschalloszillographen aus der Höhe h der ersten Impulsamplitude bestimmt. Die von äußeren Einflüssen und der Bauteilgeometrie abhängige Intensitätsbestimmung mit einem Röhrenvoltmeter (Zeigerinstrument) kann dagegen nur in Ausnahmefällen vorteilhaft eingesetzt werden.

Die hier entwickelten und in den entsprechenden Kapiteln hinsichtlich Aufbau und Handhabung beschriebenen Prüfköpfe gestatten also neben der Messung von V_L auch die Bestimmung von V_T und J . Mit diesen zerstörungsfrei gewonnenen drei voneinander unabhängigen Ultraschall-Meßgrößen läßt sich demnach das dreiparametrische, komplexe Prüfverfahren P_3 (V_L , V_T , J) realisieren. Der zweite Untersuchungsabschnitt dieser Arbeit galt daher der Beantwortung der Frage nach den baupraktischen Einsatzmöglichkeiten des neuen Verfahrens. Die erforderlichen Untersuchungen wurden dementsprechend an hydratisierenden Bindemitteln, erhärteten Betonbauteilen und einachsigt belasteten Bauteilen bis zu deren Versagen durchgeführt. Aus wirtschaftlichen Erwägungen wurde bei den jeweiligen Anwendungsfällen gleichzeitig geprüft, welche Reduktionen (Wegfall von Meßparametern) des komplexen Verfahrens P_3 ohne einen Informationsverlust ebenfalls noch zu brauchbaren Ergebnissen führten.

Bei der Untersuchung an hydratisierenden Bindemitteln hat sich gezeigt, daß das Prüfverfahren für das Forschungslabor eine empfindliche Nachweismethode darstellt. Aus den "Ultraschallmeßgröße - Hydratationszeit"-Kurven und deren numerischen 1. Ableitungen läßt sich die Hydratationskinetik während der Bindemittelerstarrung entnehmen. So können das Erstarrungsverhalten unterschiedlicher Zemente oder die Einflüsse und Auswirkungen von Zusatzmitteln auf das Abbinden meßtechnisch einwandfrei erfaßt werden. Außerdem ließ hier das gleichzeitige Messen von V_L und V_T während des Abbindens erstmals auch die Beobachtung der vom Hydratationsfortschritt abhängenden Änderung einer elastischen Materialkonstanten zu. Daher war es möglich, eine geschlossene Darstellung des Aufbaus und des elastischen Verhaltens des während der Hydratation entstehenden Feststoffskeletts anzugeben. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen scheint die Messung der Impulsintensität hier keine zusätzliche Information zu erbringen. Da ihre Ergebnisse außerdem durch Schrumpf- und

Schwindvorgänge, die den Kontakt zwischen Prüfkopf und Bindemittel stören, beeinflußt werden, kann für die Beobachtung von Hydratationsvorgängen das auf zwei Meßparameter reduzierte Verfahren $P_2 (V_L, V_T)$ angewendet werden. Sein Einsatz ist sowohl am reinen als auch am mit Zuschlägen vermischten Bindemittel möglich. Nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse können jedoch wegen der geringen Werteänderungen der Ultraschallmeßparameter während der Bindemittelerhärtung Vorhersagen über die jeweils erreichte Festigkeit noch nicht getroffen werden.

Die Bestimmung der elastischen Konstanten an erhärteten Betonkonstruktionen läßt sich ebenfalls mit dem zweiparametrischen Prüfverfahren $P_2 (V_L, V_T)$ durchführen. Es hat sich gezeigt, daß die direkt aus dem Verhältnis V_L/V_T bestimmbare dynamische Poissonkonstante μ_d je nach Betonalter, Verdichtung oder Zusammensetzung Werte zwischen 0,15 und 0,30 annehmen kann. Für einen normal verdichteten Konstruktionsbeton ergeben sich bei einem Alter von mehr als 28 Tagen im Mittel Werte um 0,22. Aufgrund der einfachen und sicheren Messung der beiden Schallgeschwindigkeiten V_L und V_T mit dem vorgeschlagenen Prüfverfahren kann bei der dynamischen Bestimmung der elastischen Konstanten an beliebig geformten Betonbauteilen jetzt auf unsichere Schätzwerte von μ_d verzichtet werden. Im Gegensatz zu dem für derartige Zwecke gelegentlich im Labor eingesetzten Resonanzverfahren ist die Impulsschallmethode nicht an eine bestimmte Prüfkörpergeometrie gebunden.

Im Hinblick auf die Möglichkeit eines Einsatzes der Ultraschallprüfung zur zerstörungsfreien Produktionskontrolle von Betonfertigteilen konnte durch entsprechende Untersuchungen nachgewiesen werden, daß das dreiparametrische Prüfverfahren $P_3 (V_L, V_T, J)$ im Rahmen von Relativmessungen grundsätzlich in der Lage ist, innerhalb von Bauteilserien äußerlich nicht sichtbare Verdichtungsmängel und Rezepturänderungen anzuzeigen. Für derartige Untersuchungen hat sich die Modifikation $P_3 (V_L, J, \mu_d)$ des vorstehend genannten Prüfverfahrens als am vorteilhaftesten erwiesen, wobei μ_d wiederum aus dem Verhältnis V_L/V_T bestimmt wird. Eine Differenzierung nach den möglichen Ursachen, die Veränderungen in den Ultraschallmeßgrößen und gegenüber der angestrebten Betongüte bewirken, kann durch die unterschiedlichen Einflüsse der jeweiligen Rezepturänderung auf das Wertetripel V_L, J, μ_d erfolgen. Für diese Untersuchung muß im Hinblick auf die Aussagekraft des Prüfverfahrens der Impulsintensität J besondere Bedeutung beigemessen werden.

Für den Nachweis von Hohlräumen, unverpreßten Spannkämen, Kiesnestern oder Rißflächen senkrecht zur Durchschallungsrichtung kann auf die Messung von V_T verzichtet werden. Mit dem Verfahren $P_2 (V_L, J)$ lassen sich Fehlstellen, deren Durchmesser wenigstens 20 % der Bauteildicke betragen, sicher nachweisen. Durch die Kombination von V_L und J ist außerdem in vielen Fällen eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Fehlstellentypen möglich. Aus wirtschaftlichen Erwägungen kann diese Prüftechnik wegen des erforderlichen, engen Meßpunktrasters nur an Bauteil- oder Bauwerksbereichen eingesetzt werden, in denen bereits größere Hohlräume vermutet werden.

In einer weiteren Untersuchung wurden einachsige auf Druck beanspruchte Probekörper senkrecht zur Belastungsrichtung durchschallt. Durch den Einsatz der Flüssigkeitsankopplung konnte die - üblicherweise bei derartigen Untersuchungen durch Oberflächenverformungen des belasteten Bauteils hervorgerufene - Beeinflussung der Prüfkopfankopplung und damit auch der Intensitätswerte vermieden werden. So war es möglich, im Kurzzeitversuch allein über den belastungsabhängigen Intensitätsverlauf sowohl das Einsetzen der Mikrorisse (Mikrorißgrenze) als auch einen Belastungskennwert zu ermitteln, der offenbar der Dauerstandfestigkeit entspricht. Abgesehen davon läßt sich die Kinetik der gesamten Rißentwicklung bis zum Bauteilversagen meßtechnisch einfach erfassen. Bei diesen Untersuchungen ergab sich grundsätzlich die Möglichkeit, das Verfahren P_3 auf nur einen Meßparameter zu reduzieren. Da V_L bei der hier ausschlaggebenden Bestimmung von J jedoch ohne Mehraufwand mitgemessen wird, erscheint ein derartiges Vorgehen nicht zweckmäßig. Solange daher der belastungsabhängige Abfall von μ_d nicht erklärt und damit für eine Auswertung herangezogen werden kann, muß für die Beobachtung der Rißentwicklung in belasteten Bauteilen dem zweiparametrischen Verfahren $P_2 (V_L, J)$ der Vorzug gegeben werden.

Insgesamt konnte anhand der durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, daß sich durch den Einsatz der hier entwickelten Schallprüfköpfe und der damit geschaffenen Möglichkeit, neben V_L auch V_T und J zu messen, die Aussagekraft der bisher einparametrisch durchgeführten und nur auf V_L basierenden, zerstö-

rungsfreien Schallprüfverfahren erheblich steigern ließ. Durch die Kombination mehrerer Ultraschallmeßparameter konnten vorhandene Erkenntnisse erweitert und zusätzlich Hinweise auf neue baupraktische Anwendungsfälle gewonnen werden. Da sich in vielen Fällen schon die zweiparametrischen Verfahren P_2 als hinreichend genau erwiesen und außerdem alle Schallmeßparameter mit nur einer Prüfanordnung ermittelt werden können, hält die hier vorgeschlagene zerstörungsfreie Prüfmethode auch wirtschaftlichen Überlegungen stand.

7. Ausblick

Die im Rahmen der vorgelegten Arbeit gewonnenen Erkenntnisse haben gezeigt, daß eine Verbesserung der Prüfsituation auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Materialprüfung im Bauwesen durch den Einsatz mehrparametrischer, reiner Ultraschallverfahren erwartet werden darf. Aufgrund der teilweise sehr ermutigenden Meßergebnisse sollten umfangreiche und tiefgehende Anschlußuntersuchungen folgen. Dafür steht bisher ein universell einsetzbares Prüfgerät nicht zur Verfügung. Die Meßgerätehersteller werden daher aufgerufen, ihrerseits einen entsprechenden Beitrag zu leisten und dem Bauwesen eine geeignete Prüfapparatur anzubieten. Ein derartiges Meßgerät sollte folgende Minimalforderungen erfüllen:

Frequenzbereich:	50 - 500 kHz
Meßwertanzeige:	Oszillographenröhre und Zeigerinstrument
Laufzeitablesung:	Kippverzögerung über ein in μ s-geeichtes Stellpotentiometer
Meßbereiche:	0 - 100 μ s, 0 - 1000 μ s, 0 - 10.000 μ s
Intensitätsmessung:	geeichter Verstärkungsregler 0 - 80 dB
Intensitätsanzeige:	Oszillographenröhre und Röhrenvoltmeter (s. o.) mit Mittelwertanzeige und Schreiber Ausgang

Vom Standpunkt der modernen Elektronik bietet der Bau eines solchen Prüfgerätes keine Schwierigkeiten.

Sind geeignete Prüfapparaturen vorhanden, sollten die weiteren Untersuchungsschwerpunkte vornehmlich auf dem Gebiet der Fertigteilkontrolle gesetzt werden. Aber auch die Laboruntersuchungen zur Überwachung von Erstarrungsvorgängen oder Rißentwicklungen unter äußerer Last bieten nach entsprechender Vervollkommnung bisher nicht genutzte Möglichkeiten beispielsweise zur Überprüfung der Wirkung von Zusatzmitteln auf das Abbindeverhalten oder zur Optimierung von Betonrezepturen hinsichtlich der Dauerstandfestigkeit.

Neben der Weiterentwicklung und Vervollkommnung mehrparametrischer Ultraschallprüfverfahren sollten aber nicht die großen Möglichkeiten übersehen werden, die auch auf dem Gebiet des Bauwesens von dem Impulsochverfahren erwartet werden können. Als wichtigste Anwendungsfälle seien hier nur die Defektoskopie und die Schallschwächungsmessung genannt. Hier bedarf es aber noch umfangreicher Entwicklungsarbeiten zur ausreichenden elektronischen bzw. mechanischen Dämpfung der für derartige Anwendungszwecke erforderlichen Schallschwinger.

Es bleibt daher zu hoffen, daß die Situation auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Materialprüfung im Bauwesen durch den Einsatz mehrparametrischer, reiner Ultraschallprüfverfahren und durch zusätzliche Weiterentwicklungen auf dem apparativen Sektor schon in naher Zukunft erheblich verbessert werden kann. Dafür neue Impulse und Anregungen zu geben, war ein wesentlicher Beweggrund für die Durchführung der vorgelegten Arbeit.

8. Verzeichnis der verwendeten Bezeichnungen und Symbole

a	Betonalter, Hydratationszeit
α	Schallschwächungskoeffizient
β	Betondruckfestigkeit
d	Dicke einer Schwingkeramik
D	Schall-Durchlässigkeitsgrad einer Grenzfläche
δ	Divergenzwinkel eines Schallstrahls
E, E_d	Elastizitätsmodul, dynamischer
f	Frequenz einer Schallschwingung
F	Querschnittsfläche
G, G_d	Schubmodul, dynamischer
h	Höhe der ersten Impulsamplitude
H	Hydratationsgrad
I	Flächenträgheitsmoment
J	Schallimpulsintensität
L	Schallweglänge (Bauteildicke)
$\lambda, \lambda_L, \lambda_T$	Schallwellenlänge, longitudinal, transversal
μ, μ_d	Poissonkonstante (Querdehnungszahl), dynamische
n	Wellenzahl
N	Nahfeldlänge des Schallfeldes
p	Schalldruck
Q, Q_d	Kompressionsmodul, dynamischer
r	Radius einer Scheibe aus Schwingkeramik
R	Schall-Reflexionsgrad einer Grenzfläche (auf Seite 60 auch: Reifegrad des Betons)
ϱ	Materialdichte
S	Mechanische Druckspannung
t, t_L, t_T	Schall-Impulslaufzeit, longitudinal, transversal
T	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
V, V_L, V_T V_D, V_O, V_B	Schallgeschwindigkeit (der Longitudinal-, Transversal-, Dehn-, Oberflächen- und Biegewelle)
W	Schallwiderstand

9. Literaturverzeichnis

- [1] Sokoloff, S.J.: Zur Frage der Fortpflanzung ultraakustischer Schwingungen in verschiedenen Körpern. E.N.T. 6 (1929), S. 454 - 461
- [2] Mühlhäuser, O.: Verfahren zur Bestimmung von Werkstoffen, besonders zur Ermittlung von Fehlern darin. DRP 569598 (1931)
- [3] Meyer, E.
Buchmann, G.: Über einfache Werkstoffprüfungen mit magnetostruktiven Ultraschallgeräten. Akustische Zeitschrift 3 (1938), S. 132 - 136
- [4] Meyer, E.,
Bock, E.: Hörschall- und Ultraschalluntersuchungen von Betonbalken mit Rissen. Akustische Zeitschrift 4 (1939), S. 232 - 237
- [5] Jones, R.: The application of ultrasonics for the testing of concrete. Research 1 (1948), Nr. 8, S. 383 - 384
- [6] 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
- [7] Jones, R.: Testing the Quality of Concrete in a Thick Wall Concrete and Constructional Engineering 45 (1950), S. 391 - 394
- [8] Leslie, J.R. An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures. Proceedings of the American Concrete Institute 46 (1949/50), S. 17 - 36
- [9] Whitehurst, 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)
- [10] 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.
- [11] Eisenmann, K.: Untersuchung der Risßbildung des Betons mit Ultraschall. Beton- und Stahlbetonbau 46 (1951), S. 19
- [12] Eisenmann, K.
Steinkamp, G.: Messung der Tiefen und Weiten von Betonrissen mittels Ultraschall. Beton- und Stahlbetonbau 49 (1954), S. 36 - 38
- [13] Eisenmann, K.,
Odewald, G.: Untersuchung der elastischen Eigenschaften von Beton mittels Ultraschall. Beton- und Stahlbetonbau 54 (1959), S. 156 - 158

- [14] Steinkamp, G.: Ultraschallimpulsgerät für Beton
Dissertation 1953, TH Braunschweig
- [15] Steinkamp, G.: Ultraschallimpulsgerät für Beton
Elektronische Rundschau 10 (1956), S. 172 - 173
- [16] 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
- [17] Kordina, K.,
Roy, V.
Waubke, N.V.: Ultraschallmessungen an bewehrten Kiesbetonen
Materialprüfung 9 (1967), Nr. 3, S. 81 - 85
- [18] 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 Uni-
versität Braunschweig, 1968
- [19] Roy, V.: Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen an Beton
Dissertation TU Braunschweig, 1967
- [20] 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
- [21] Waubke, N.V.: Versuche zur Überwachung von Erhärtungsvorgängen bei
hydraulischen Baustoffen mittels Ultraschall
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik
für Beton und Stahlbeton", 23. - 25. 4. 1969, Leipzig,
S. 81
- [22] Bergmann, L.: Der Ultraschall
6. Auflage, Stuttgart, Hirzel 1954
- [23] Krautkrämer, H.,
Krautkrämer, J.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall
Springer-Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1961
- [24] Matauschek, J.: Einführung in die Ultraschalltechnik
VEB Verlag Technik, Berlin 1961
- [25] 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
- [26] Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1969
- [27] Brunarski, L.: Non-Destructive Methods of Testing Concrete Draft
instructions on the application of sclerometric,
ultrasonic and resonance methods
Paper prepared for the conference of the RILEM Working
Group to be held in Bucarest, September 1964, War-
schau 1964

- [28] 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 Mondestructive Testing Meeting, Varna 1968, Bucarest 1968.
- [29] Horn, W.: Betrachtungen zur komplexen zerstörungsfreien Prüfung von Beton Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik für Beton und Stahlbeton", Leipzig, 23. - 25. 4. 1969, S. 85
- [30] 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
- [31] Pohl, E.: Überblick über die modernen zerstörungsfreien Prüfverfahren von Beton und Abgrenzung ihrer Anwendungsgebiete Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig 9 (1963), S. 137 - 148, Sonderdruck
- [32] 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
- [33] Skramtajev, B.G.,
Lesćinsky, 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
- [34] Wesche, K.H.: Die Prüfung der Betonfestigkeit im Bauwerk Betonstein-Zeitung (1967), Heft 6, S. 267 - 277
- [35] Wiebenga, J.G.: A Comparison between Various Combined Non-Destructive Testing Methods, to Derive the Compressive Strength of Concrete TNO-Report Nr. B1-68-61/1 H. 1.8, Delft, August 1968
- [36] Leers, K.-J.: Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit mechanischen Schwingungen und ihre Anwendung bei Werkstoffen der Steine und Erden-Industrie Habilitationsschrift TU Clausthal, 1969
- [37] Hönig, A.
Zapletal, V.: Ultraschall- und radiometrische Rohdichtemessung von Strahlenschutzbeton Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig (1966), Heft 1 und 2, S. 23
- [38] 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

- [39] Gensel, J.: Einfluß der Stahlbewehrung und der Feuchtigkeit auf die Geschwindigkeit von Ultraschall-Impulsen in Beton
Bauteilzeitung 19 (1965), Nr. 9, S. 464 - 467
- [40] 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
- [41] 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
- [42] Vadász, J.: Korrektur der Meßwerte bei den zerstörungsfrei ermittelten Betonfestigkeiten
Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 17 (1968), Heft 6 (B) - Reihe 63, S. 1615
- [43] Ebering, R.: Zur Ortung von Hohlräumen an Betonbrücken
Deutsche Eisenbahntechnik 10 (1962), Nr. 12, S. 562 - 565
- [44] Facaoaru, I.: Ultraschallprüfung von Beton in der rumänischen Baupraxis
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig (1966), Heft 1/2, S. 19 - 22
- [45] Hütter, A.: Methoden zur Prüfung des Betons mit Ultraschall
Bauplanung - Bautechnik 9 (1955), S. 385 - 389
- [46] Jones, R.
Gatfield, E.N.: Testing Concrete by an Ultrasonic Pulse Technique
Road Research Technical Paper 34 (1955), S. 1 - 48, London
- [47] Malhotra, V.M.: Nondestructive Methods for Testing Concrete
Department of Energy, Mines and Resources
Ottawa-Mines Branch Monograph 875
- [48] Martincek, G.: Nedestruktivne dynamicke metody skusania stavebných materialov a konstrukcii.
Vydavatel' stvo slovenskej akademie vied Bratislava 1962
- [49] Weigler, H.
Kern, E.: Über die Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschallverfahrens zur Beurteilung der Betongüte
Betonstein-Zeitung 31 (1965), Heft 5, S. 279 - 286
- [50] Whitehurst, E.A.: Evaluation of Concrete Properties from Sonic Tests
Monograph of the American Concrete Institute (ACI), Series 2 (1966)
- [51] Beauzée, C.: Erreurs de mesure dans la détermination du module d'élasticité par la méthode sonique
RILEM Bulletin 21, Paris 1954

- [52] Dawance, G.: Principe Méthode et Appareillage de Mésure Annales Institut Technique du Batiment et des Traveaux, Publics 140, Paris 1950
- [53] Facaoaru, I., Stamate, Gh.: 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
- [54] 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
- [55] 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
- [56] Pohl, E.: Prüfung von Beton mit nieder- und hochfrequenten mechanischen Schwingungen Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig (1962), Heft 1, S. 19 - 64
- [57] 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)
- [58] Wesche, K.G.: Möglichkeiten für die Anwendung von Ultraschall bei der Betonprüfung Bautechnik 32 (1955), Nr. 5, S. 151 - 155
- [59] Whitehurst, E.A.: Dynamic Tests Special Technical Publication of the American Society for Testing Materials 169-A-1966 (Philadelphia)
- [60] 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
- [61] 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
- [62] 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

- [63] Nepper-Christensen, P.: Measurements of Ultrasonic Pulse Velocity in Green Concrete
Highway Research No. 1, Part I (1968), S. 451 (Abstract)
- [64] Bossi, J.: Les controles nondéstructifs des effets du gel sur les bétons pour barrages
RILEM Bulletin 26, Paris 1955
- [65] Flaga, K.,
Dohnalik, M.: Versuche zur Anwendung von Ultraschallwellen bei der Untersuchung der Korrosion von Beton
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik für Beton und Stahlbeton", 23. - 25. 4. 1969, Leipzig, S. 39
- [66] Gensel, J.: Prüfung von Baustoffen und Bauelementen mit Ultraschall
Bauzeitung (1963), Heft 12 (1964), Heft 1
- [67] Riedel, W.,
Göhring, Ch.: Auswertung von Ultraschall-Laufzeitmessungen und Resonanzfrequenzmessungen zur Ermittlung des Korrosionsgrades von Zementmörtelprismen
Tagungsbericht "Zerstörungsfreie Prüf- und Meßtechnik für Beton und Stahlbeton", 23. - 25. 4. 1969, Leipzig, S. 97
- [68] Strenzke, E.A.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Güteüberwachung hydrotechnischer Baumaßnahmen
Bauplanung - Bautechnik 23 (1969), Nr. 3, S. 133 - 136
- [69] 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
- [70] Galan, A.: Die Bildung und Verbreitung von Mikrorissen im Beton bei mittlerer Druck- und Zugbeanspruchung
Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 17 (1968), Heft 6 (B) - Reihe 63, S. 1526
- [71] Jones, R.: The Elasticity and Rupture of Concrete and Stone at Constant Rates of Loading
Nature 165 (1950), Nr. 4184, S. 39 - 40
- [72] 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
- [73] 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
- [74] RILEM: Ergebnisse einer Tagung der RILEM Working Group on the Non-Destructive Testing of Concrete, 26. - 28. 4. 1966 in Aachen
RILEM Bulletin (1966), Nr. 33, S. 367 - 369

- [75] Rüsck, H.: Der Einfluß der Deformationseigenschaften des Betons auf den Spannungsverlauf
Schweizerische Bauzeitung 77 (1969), Heft 9
- [76] Wenzel, K.: Über die Möglichkeiten einer Betonuntersuchung mittels Ultraschall
Dissertation TH Braunschweig, 1950
- [77] Ciganek, M.: Prüfung großer Bauwerke bzw. Bauteile mittels Ultraschall
Zement und Beton (1963), Nr. 27, Wien
- [78] Ciganek, M., Sedlak, J.: Statistische Veränderlichkeit der Betongüte bei fertigestellten Bauten nach den Meßergebnissen mittels Ultraschallverfahren
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig (1963), S. 149 - 162
- [79] Cyganek, M.: Prüfungen großer Bauwerke bzw. Bauteile durch Ultraschall-Messungen
Die Bauwirtschaft (1964), Heft 21 - 22
- [80] 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
- [81] Neisecke, J., Waubke, N.V.: Homogenitätskontrolle und Fehlstellennachweis an Betonbauteilen mittels Ultraschall.
Amtliche Materialprüfung des Landes Niedersachsen, Heft 12 (1973), S. 14
- [82] Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüfung von Strahlenschutzwänden im VEB-Atomkraftwerk I mit Ultraschall
Bauplanung - Bautechnik 16 (1962), Nr. 9, S. 446 - 448
- [83] Pohl, E.: Prüfung von Betonbauteilen mit Ultraschall, Arbeitsanweisung für die Baupraxis
Baustoffindustrie (1964), Nr. 11, S. 333 - 337, und Nr. 12, S. 374 - 376
- [84] 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
- [85] Wesche, K.H.: Betonprüfung mit Hilfe von Ultraschall
Beton- und Stahlbetonbau 48 (1953), Nr. 5, S. 116 - 119
- [86] Frielinghaus, R.: Über die Ultraschallprüfung feuerfester Steine.
Das Echo (1966) Nr. 17, S. 117 - 123 (Hauszeitschrift der Fa. I. u. H. Krautkrämer - Köln).

- [87] 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
- [88] Röthig, H.: Ultraschalldämpfung von Beton. Schriftenreihe der Bauforschung - Stahlbeton. Deutsche Bauinformation - Berlin 1972
- [89] Facoaru, I., Teodoru, G., Bubulac, L.: Recherches sur l'Utilisation des Mesurages d'Atténuation des Ultrasons pour la Détermination de la Résistance du Béton. Rapport présenté à la Session du Groupe de Travail RILEM pour l'Essai Non-destructif, Bucarest 1964
- [90] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. Bauverlag, Wiesbaden - Berlin, 1964
- [91] Sell, R.: Der E-Modul des Betons - eine Studie seiner Definition. Dissertation München 1959
- [92] Phileo, R.E.: Comparisons of results of three methods for determining Young's modulus of elasticity of concrete. Proc. A.C.I. 26 (1955), S. 461 - 469
- [93] Martinček, G.: Einige Anwendungsmöglichkeiten zerstörungsfreier dynamischer Methoden zur Prüfung des Betons. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig 9 (1963), S. 169 - 175, Sonderdruck
- [94] Hennicke, H.W., Leers, K.-J.: Die Bestimmung elastischer Konstanten mit dynamischen Methoden. Tonind.-Ztg. 89 (1965), 23/24, S. 538 - 543
- [95] RILEM: Rilem Recommendation NDT 1, Testing of Concrete by the Ultrasonic Pulse Method. 1st Edition, 1972
- [96] Kottas, H.: Zur Bestimmung des Querdehnungskoeffizienten mit Hilfe der E- und G-Modul-Meßtechnik. Tonind.-Ztg. 89 (1965), H. 23/24, S. 538
- [97] Hütter, A.: Festigkeitsprobleme des Betons, Internationales Kolloquium in Dresden 1968. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 17 (1968), Heft 6, S. 1487.
- [98] Berg, O.I.: Die Hauptentwicklungsrichtungen der Theorie der Festigkeit und Verformungen des Betons. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 17 (1968) Heft 6, S. 1489.
- [99] Rüsck, H.: Physikalische Fragen der Betonprüfung. Zement - Kalk - Gips 12 (1959), Heft 1, S. 1 - 9
- [100] Richart, F., Brandtzaeg, A.: The failure of concrete. University of Illinois, 1929, Bull. No. 190 IV.

Die Schriftenreihe des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau wird
im Selbstverlag herausgegeben.

2446 652