

1. Problemstellung

Die Anwendung zerstörungsfreier Prüfmethode ermöglicht den Nachweis von örtlichen und zeitlichen Veränderungen von Baustoffen, die z.B. infolge unterschiedlicher Verarbeitung, Überlastung, veränderter stofflicher Zusammensetzung oder einwirkender Umwelteinflüsse entstanden sind¹.

Neben den ausschließlichen Labormethoden, die in Form der Resonanzfrequenzprüfung und der Eigenschwingzeitmessung angewendet werden, hat sich die Ultraschallprüfmethode zu Verfahren entwickelt, das sowohl als Labor- als auch als Baustellenprüfverfahren geeignet ist.

Ultraschallmessungen werden oft mit der Zielstellung durchgeführt, aus nur *einer* Messgröße, der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle [V_P], und unter Verwendung einer geschätzten Querdehnzahl elastische Kennwerte des Baustoffes zu berechnen. Diese Vorgehensweise vernachlässigt die möglichen Veränderungen der Querdehnzahl infolge der anzutreffenden Gefügeunterschiede, des aktuellen Feuchtegehaltes sowie des Einflusses verschiedener Geometrien von Baustoffproben im Ergebnis der Beprobung von Bauwerksteilen. Für die Erprobung von Baustoffrezepturen im Labor sollte diese Berechnungsmethode nur zum Auffinden von Orientierungswerten verwendet werden.

Zur Erhöhung der Aussagesicherheit von Ultraschallmessungen wurden deshalb die Forschungsarbeiten in der Vergangenheit darauf orientiert, eine zweite Ultraschallmessgröße, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle [V_T] zu bestimmen [2]. Die Erfassung von V_T mit speziell entwickelten Scherwellenwandlern führt jedoch zu einem erhöhten Zeitaufwand für die durchzuführenden Messungen, da die zur Anregung der Transversalwelle benötigten Schubkräfte zu komplizierteren Ankoppelbedingungen führen. Das Erkennen des Schwingungseinsatzes der Transversalwelle im Schwingungsbild der Probe ist oft schwierig und setzt besondere Erfahrung voraus. Weiterhin sind an den häufig in der Baustoffprüfung verwendeten Probekörpern, wie Normprismen oder Bohrkernen mit einem Durchmesser von ca. 50 mm, die Bestimmung von V_T aufgrund der zu geringen Querabmessungen und der zur Verfügung stehenden Schallwandlergeometrien nicht möglich.

In den nachfolgenden Ausführungen soll ein Schallwandlersystem vorgestellt werden, bestehend aus sogenannten Dehnwellen-Prüfköpfen, mit denen die erforderlichen Messgrößen aus zwei Wellenarten, der Longitudinalwelle und der Dehnwelle, ermittelt werden. Aus dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten erfolgt die Bestimmung der Querdehnzahl, die zur weiteren Berechnung der elastischen Kennwerte verwendet wird. Weitere Anwendungsmöglichkeiten, die sich aus der Bauform des Wandlersystems ergeben, werden vorgestellt. Die erforderlichen Geometrieverhältnisse der zu messenden Probekörper werden diskutiert.

2. Grundlagen

Die Entstehung von Longitudinalwellen setzt eine unbehinderte Wellenausbreitung im sogenannten „unendlich ausgedehnten Medium“ voraus, die Entstehung von Dehnwellen ist an eine Wellenausbreitung im „stabförmigen Medium“ gebunden. Eine ungestörte Wellenausbreitung in „unendlich“ ausgedehnten Medien muss jedoch als ein Idealzustand betrachtet werden. Für Schallmessungen an endlichen Bauteilen und Laborprobekörpern sind daher ihre Mindestabmessungen von großer Bedeutung.

Die Geometrieigenschaften der Probekörper erfordern im Entstehungsfall der Longitudinalwelle, dass die Schallwellenlänge λ klein gegenüber den Querabmessungen (\emptyset ; bzw. Kantenlänge) sowie der Länge des Probekörpers ist. Für eine ungestörte Longitudinalwellenausbreitung geben [2,4] den Grenzwert $\lambda < 2b$ (b = Bauteildicke) an, der die Bedingung als „unendlich“ ausgedehnt erfüllt.

Sind die Querabmessungen deutlich kleiner als die Wellenlänge λ und die Probekörperlänge größer als die Wellenlänge λ , so entstehen Dehnwellen (Stabwellen). Der dynamische Elastizitätsmodul ist nur von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Dehnwelle und der Rohdichte abhängig.

Zur Trennung des „unendlich“ ausgedehnten vom „stabförmigen“ Medium wird nach [5] für die in der Baustoffprüfung sinnvollen Messlängen das Verhältnis $\emptyset/\lambda = 1,5$ als Grenzwert angegeben.

Da für die Baustoffprüfung die Erzeugung und Messung einer reinen Dehnwelle praktisch nicht relevant ist und die Auswertung der Longitudinalwelle als einzige Wellenart zur Bestimmung von elastischen Kennwerten zu den genannten Berechnungsfehlern führt, muss der Geometriebereich messtechnisch genutzt werden, der sowohl eine Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle als auch der Dehnwelle zulässt.

3. Beschreibung des Dehnwellenmessverfahrens

3.1 Messaufbau

Der prinzipielle Messaufbau zur Durchführung des Dehnwellenmeßverfahrens ist aus Abb. 1 ersichtlich.

Der dargestellte Messaufbau stellt eine Vorzugsvariante für die Durchführung von Labormessungen dar. Zum Analysieren der Ultraschallkurven mit dem Transientenrecorder PSO wird eine spezielle Mess- und Analysesoftware benötigt. Die Berechnung der elastischen Kennwerte erfolgt mit einem separaten Rechenprogramm.

Insitu-Messungen werden vorzugsweise mit einem Speicheroszilloskop PM 99B und der dazugehörigen Transfersoftware durchgeführt.

Die Verwendung der Messvorrichtung UMV 10 ermöglicht eine genaue Positionierung des Probekörpers zwischen den Schallköpfen sowie eine reproduzierbare Einstellung des Ankoppeldruckes der Prüfköpfe an die Probe durch eine digitale Druckanzeige.

3.2 Messregime

Das Dehnwellenmessverfahren stellt eine Impulsanregung auf der Basis eines steiflankigen Rechtecksignals dar, wobei in der Vorderflanke des Impulses die hohen Frequenzen zur Anregung der Longitudinalwelle (Ultraschallaufzeitmessung) und in der variablen Impulsbreite die zur Anregung der Dehnwelle (Resonanzmessung) notwendigen niedrigen Frequenzen enthalten sind.

Die Grundlage des Messverfahrens besteht in der Digitalisierung der Zeitsignale, d.h. der Signale, die die Ultraschallaufzeit und das Eigenschwingungsverhalten des Probekörpers beinhalten.

Ultraschallaufzeitmessung

Beim Transientenrecorder PSO 5570 sowie beim Speicheroszilloskop PM 99B sind die technischen Grenzen für eine Digitalisierung von den Analog-Digital-Wandlern abhängig und können beim PSO in unterschiedlichem Maße an die jeweiligen Prüfaufgaben angepaßt werden. Tabelle 1 verdeutlicht die Konfigurationsmerkmale bei den genannten Gerätetypen:

Tabelle 1: Gerätekonfigurationen

	Transientenrecorder PSO 5570	Speicheroszilloskop PM 99B
max. Abtastrate:	40 MHz	25 MHz
Zeitauflösung:	25 ns	40 ns
Amplitudenauflösung:	12 Bit (→ 72 dB)	8 Bit (→ 48dB)
Standardspeichertiefe:	0,5 bis 256 KByte	0,5 KByte

Aus Tabelle 1 resultiert, dass beim Transientenrecorder PSO die Abtastrate aufgrund der großen Speichertiefe frei gewählt werden kann. Für die praktische Durchführung von Prüfaufgaben leitet sich ab, dass z.B. bei einer gewählten Abtastrate von 100 ns und 4 KByte Speichertiefe eine Gesamtmesszeit (Abtastrate x Speichertiefe) $t = 0,4$ ms entsteht und somit bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit $VP = 4000$ m/s Probekörperlängen s ($VP \times t$) bis ca. 1,6 m gemessen werden können. Die Speichertiefe von 0,5 KByte würde bei Anwendung des PM 99B unter ansonsten gleichen Messbedingungen nur zu einer auswertbaren Probekörperlänge von ca. 20 cm führen. Eine Zoomfunktion, die im Zeitbereich des Schwingungseinsatzes angewendet werden kann, ermöglicht jedoch, dass eine vergleichbare Probekörperlänge gemessen werden kann.

Resonanzmessung

Zur Ermittlung der Dehnwellenresonanz mittels Impulsdurchschallung wird vorzugsweise die Frequenzanalyse (FFT) eingesetzt. Diese erfordert die Erfüllung des Shannonschen Abtasttheorems, d.h. die Abtastrate muss doppelt so hoch gewählt werden wie die maximal zu messende Frequenz. Eine Nichtbeachtung führt zu Aliasing Effekten. Im praktischen Anwendungsfall treten Dehnwellenresonanzen bis maximal 100 kHz auf, so dass Abtastraten von 200 kHz notwendig sind.

Die spektrale Auflösung des Frequenzsignals würde bei dieser Messfrequenz von 200 kHz und einer gewählten Speichertiefe von z.B. 4000 Messpunkten (Messfrequenz / Speichertiefe) 50 Hz betragen.

Unter Beachtung der erörterten Digitalisierungsbedingungen muss bei der Anwendung des Dehnwellenmessverfahrens für eine exakte Bestimmung von elastischen Kennwerten jeweils eine Messung mit *hoher* Abtastrate für die Ultraschalllaufzeit (kurzer Signalausschnitt) und eine mit *niedriger* Abtastrate für die FFT zum Erfassen der Resonanzschwingungen (langer Signalausschnitt) durchgeführt werden.

3.3 Geometrieverhältnisse in der Baustoffprüfung

Die theoretischen Überlegungen zeigen in Übereinstimmung mit den praktischen Erfahrungen, dass der messtechnisch nutzbare Geometriebereich für Baustoffuntersuchungen vorzugsweise zu Probekörpergeometrien führt, die bei quadratischen und kreisförmigen Querschnitten einen Schlankheitsgrad von 1 : 2 bis 1 : 4 haben.

Die Begründung liegt im Frequenzspektrum des Rechtecksignals. Die zur Anregung der Dehnwelle notwendige Impulsenergie steht über eine Bandbreite von ca. 2 bis 100 kHz zur Verfügung. An Messobjekten mit hoher akustischer Grenzfrequenz konnten in der FFT Frequenzen bis 250 kHz nachgewiesen werden, die zur Entstehung von Longitudinalwellen führen. Bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von $V_P = 4000$ m/s stehen somit Wellenlängen λ ($\lambda = V_P/\text{Erregerfrequenz}$) von 1,6 cm (Erregung Longitudinalwelle) bis 20 cm (Erregung Dehnwelle) zur Verfügung. Damit können alle Messaufgaben bearbeitet werden, die z.B. an Normprismen, den Abmessungen entsprechenden Bohrkernen und Betonbalken (z.B. 100mmx100mmx400mm) durchgeführt werden sollen. Berechnungen an Probekörpern mit rechteckigem Querschnitt werden bei der Dehnwellenmessung softwareseitig nicht in Betracht gezogen. Da sie in der Praxis dennoch auftreten (z.B. Dachziegelproben), sind die Auswirkungen der Geometrieigenschaften auf das Messverfahren genauen Betrachtungen zu unterziehen. Die Abb. 2 zeigt die Ultraschallkurven sowie die Frequenzanalyse der Resonanzschwingungen von zwei Bohrkernen aus Beton mit einem Schlankheitsgrad 1 : 2 und 1 : 4. Die Erhöhung des Schlankheitsgrades führt, wie erwartet, zur Abbildung von Schwingungen höherer Ordnung.

Die Darstellung der Resonanzschwingungen höherer Ordnung ist mit dem Dehnwellenmessverfahren analog zur Resonanzfrequenzprüfung (EG-Meter) möglich. Dadurch entstehen zusätzliche Möglichkeiten,

Gefügeveränderungen aufgrund des empfindlicheren Reagierens der Resonanzschwingungen höherer Ordnung auf den unelastischen Verformungsanteil des Gefüges (innere Dämpfung) zu erfassen.

4. Anwendungen des Schallwandlersystems

4.1 Messen von Laborprobekörpern

Bestimmung von elastischen Konstanten

Das Hauptanwendungsgebiet des Dehnwellenmessverfahrens besteht in der Bestimmung von elastischen Kennwerten, wie der Schallgeschwindigkeit (V_P , V_D , V_S und V_R), der Querdehnzahl, des E- und G-Moduls an Laborprobekörpern (z.B. Normprismen und Betonbalken der Abmessungen 100mmx100mmx400mm). Messwertvergleiche zwischen der Dehnwellenmessung und der Resonanzfrequenzmessung (EG-Meter) ergaben bei den ermittelten Resonanzfrequenzen Messwertdifferenzen bis maximal 2%. Daraus ergeben sich E-Modulunterschiede von maximal 4%. Die Differenzen resultieren aus der unterschiedlichen Art der Anregung beider Messverfahren zum Schwingen des Probekörpers. Das Dehnwellenmessverfahren stellt eine *Impulsanregung* (Übertragung eines Frequenzspektrums durch den Schallgeber) dar, die Resonanzfrequenzprüfung (EG-Meter) erzeugt durch *Dauerschall* Eigenresonanzen, die bei *gleicher* Frequenz im Resonanzfall zur Amplitudenverstärkung führen.

Darstellung von Gefügeveränderungen an Probekörpern aus Straßenbeton

Die Erfassung von Gefügeveränderungen an Betonbalken (100mm x 100mm x 400mm) aus Straßenbeton infolge wechselnder Temperatur und Feuchtebelastungen mit unterschiedlichen Intensitäten (1. bis 3. Belastungsstufe) verdeutlicht Abb. 3. Die Messungen erfolgten jeweils am Ende einer Wasserlagerung. Aus den dargestellten Resonanzkurven ist deutlich zu erkennen, dass die Erhöhung der Belastung des Betongefüges von der 1. bis zur 3. Belastungsstufe sich durch eine sinkende Resonanzfrequenz und durch eine steigende Dämpfung widerspiegelt. Eine weitere Verbesserung der spektralen Auflösung im Ergebnis der Frequenzanalyse würde zusätzlich eine genauere Bestimmung des Verlustfaktors als Maß für die innere Dämpfung ermöglichen.

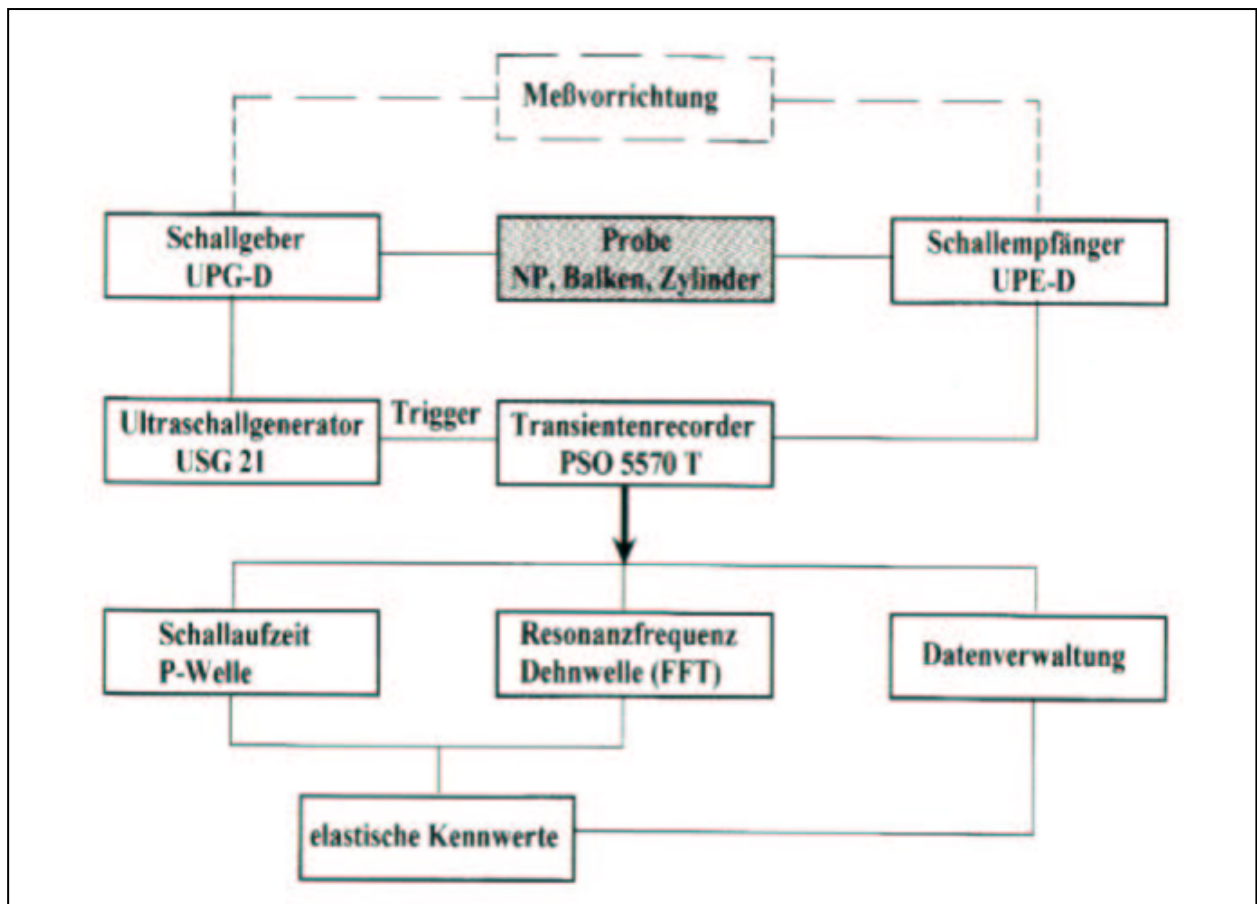
(Verarbeitung von Datensätzen mit hoher Speichertiefe in der FFT)

4.2 Profilmessung an Bohrkernen

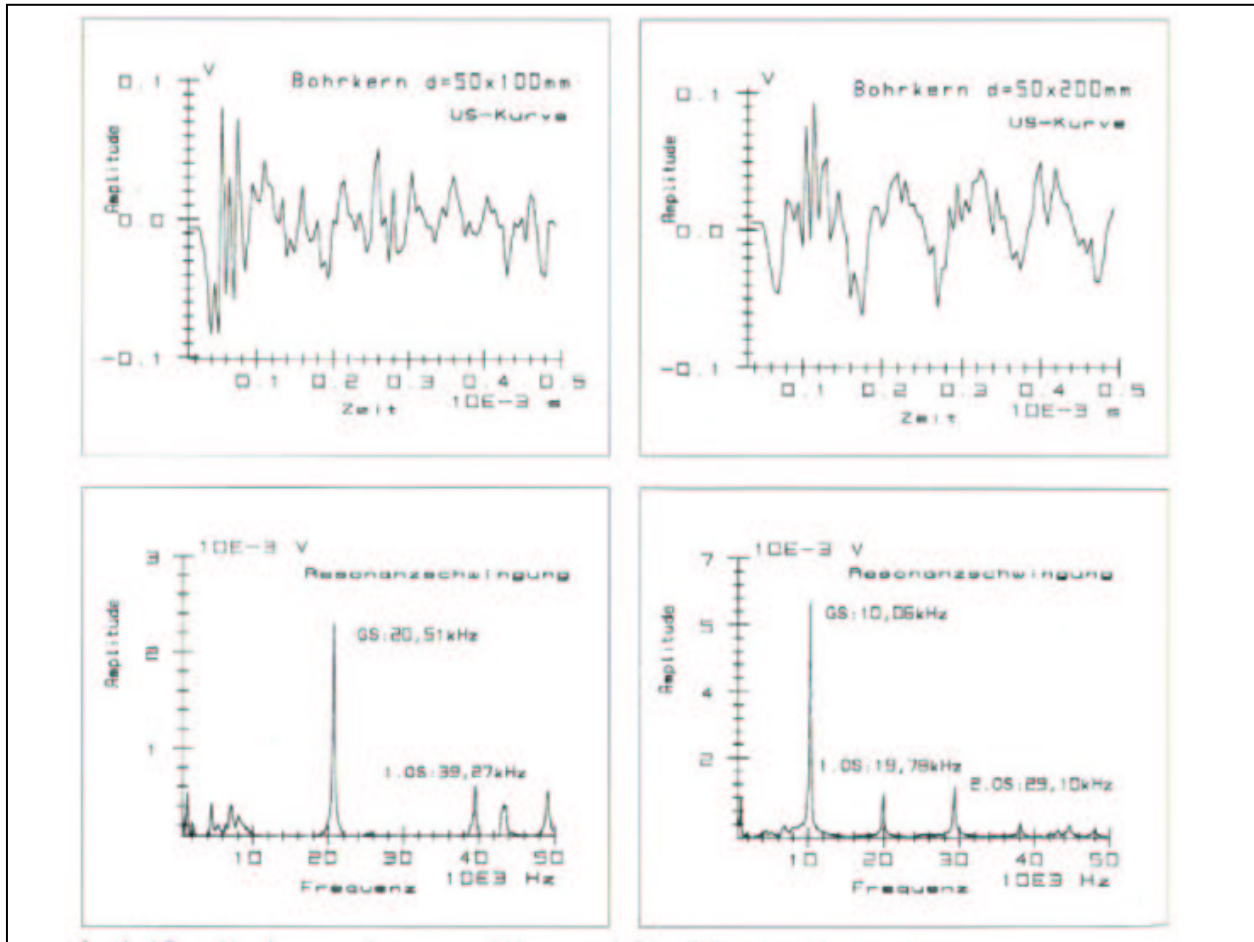
Die punktförmige Ankopplung der Dehnwellenprüfköpfe sowie die genaue Positionierung des Probekörpers in der Ankoppelvorrichtung (siehe Abb. 4) eröffnet die Möglichkeit, Profilmessungen z.B. an Bohrkernen durchzuführen. Untersuchungen zur Bestimmung der Eindringtiefe von Steinverfestigern (Basis Kieselsäureester), die an zwei Baustoffen, Naturstein und Ziegelmateral, durchgeführt wurden, zeigt Abb. 5. Die Messungen wurden in einem Abstand von 4 mm über die Bohrkernlänge durchgeführt. Gut zu erkennen ist aus dem Kurvenverlauf der 1. Tränkung beim Seeberger Sandstein die Eindringtiefe des Steinverfestigers mit ca. 20 mm mit einer sich anschließenden Übergangszone, bis der Kurvenverlauf der Nullmessung erreicht wird. Durch die Erfassung der Übergangszone kann die erforderliche, allmähliche Eigenschaftsänderung vom verfestigten zum unverfestigten Material nachgewiesen werden. Das Ziegelmateral „Ückermünde“ (Hintermauerziegel) spiegelt ebenfalls die erzielte Verfestigung wider, die jedoch gegenüber dem Seeberger Sandstein einen geringeren Wert erreicht.

5. Zusammenfassung

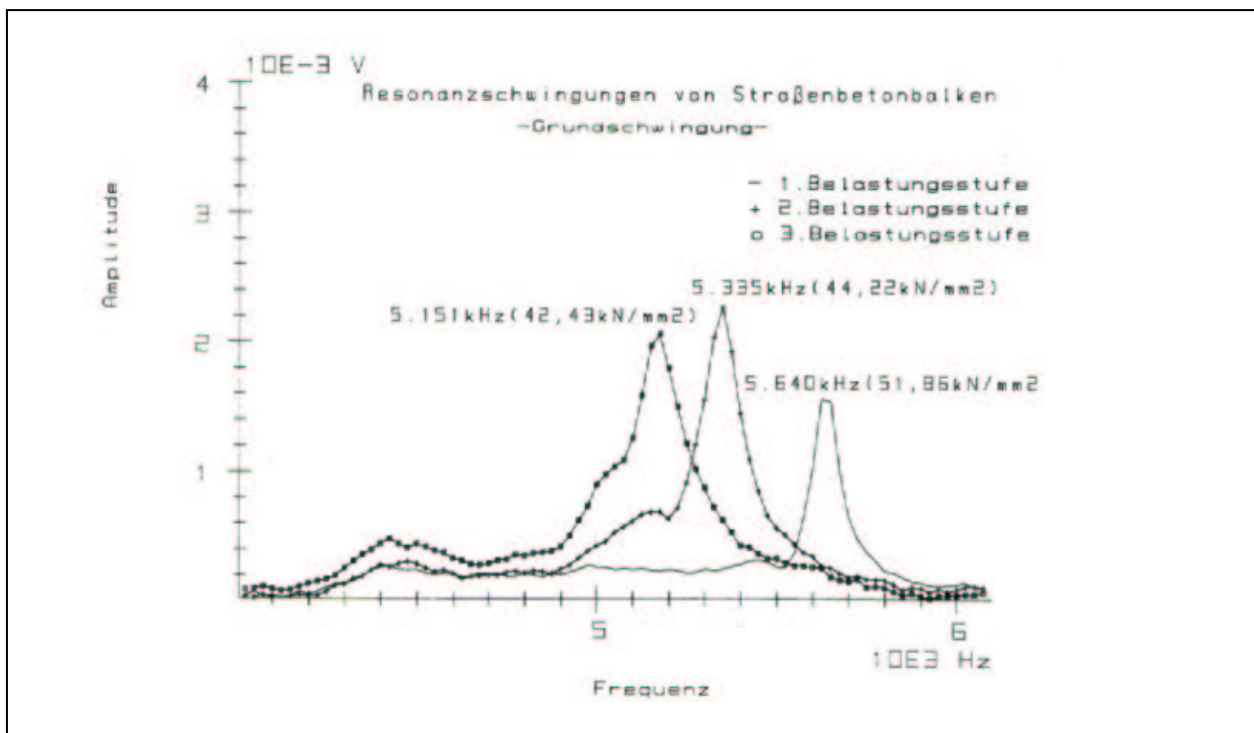
Das Dehnwellenmessverfahrens ermöglicht für die genannten Probekörpergeometrien die Bestimmung von elastischen Kenngrößen und stellt somit als ein neues Verfahren eine Erweiterung zu den bereits bekannten Prüfverfahren (Resonanzfrequenzverfahren, Eigenschwingzeitmessung) dar. Die trockene Ankopplung der Schallköpfe ist beim Messen an Schalflächen, gesägten oder geschliffenen Oberflächen vorteilhaft, jedoch muß der Einfluß einer erhöhten Oberflächenrauigkeit, z.B. infolge Frosteinwirkung auf die übertragenen Frequenzen, noch näher untersucht werden. Die Darstellung von Resonanzschwingungen höherer Ordnung an schlanken Probekörpern eröffnet die Möglichkeit, Aussagen zum Anteil der unelastischen Verformung des Gefüges zu erlangen. Die Bestimmung des Verlustfaktors kann als Bewertungskriterium zur Dämpfung mit in Betracht gezogen werden. Profilmessungen zur Bestimmung der Eindringtiefe und Wirksamkeit von Steinverfestigern wurden an den untersuchten Baustoffen mit reproduzierbaren Ergebnissen durchgeführt.



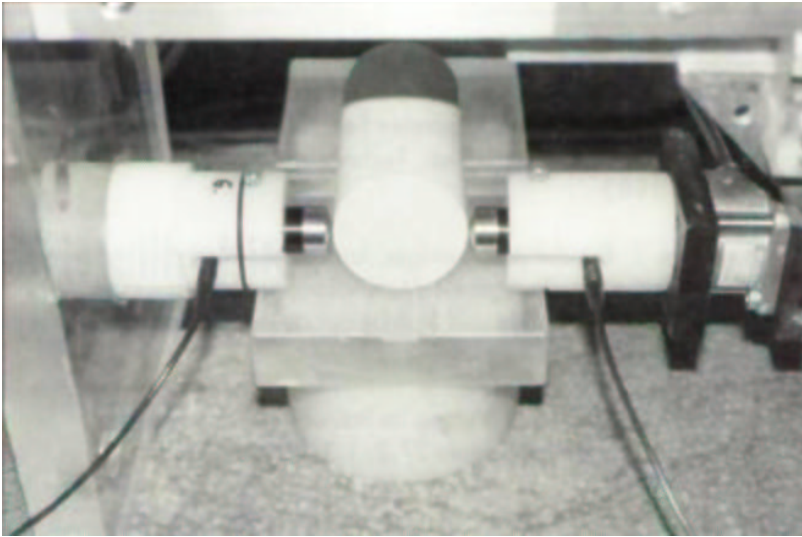
1) Messprinzip der Dehnwellenmessung



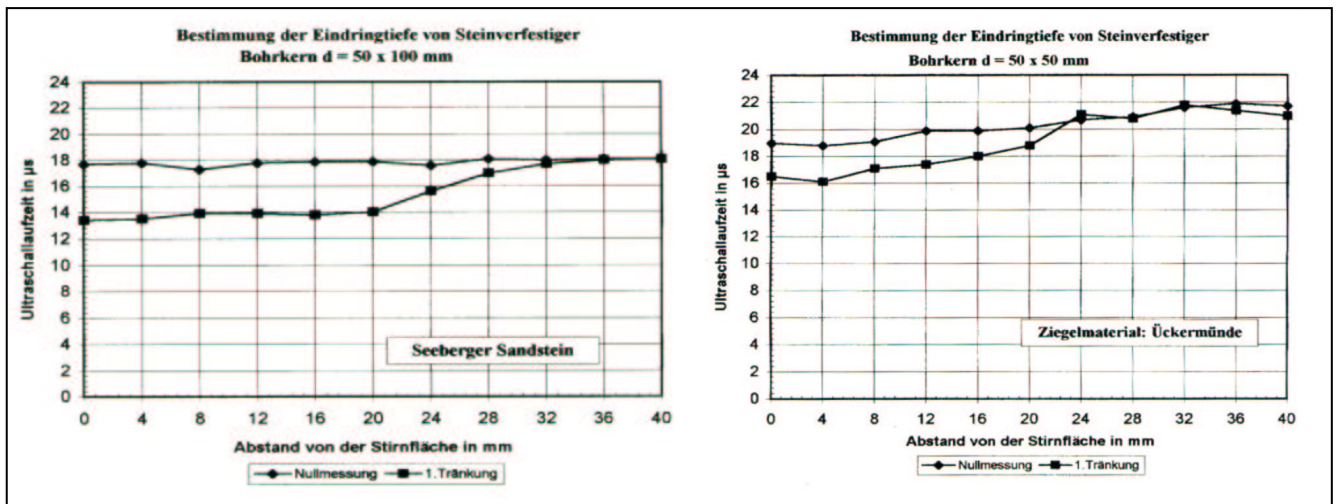
2) Ultraschall-Kurve und dazugehörige Resonanzschwingungen von Bohrkernen mit unterschiedlichen Schlankheitsgraden 1:2 (links) und 1:4 (rechts); GS: Grundschiwingung, OS: Oberschiwingung



3) Resonanzkurven von Straßenbetonbalken nach unterschiedlicher Wechsellagerung: Klammerwerte geben dvn. E-Modul an



4) Durchführung der Profilmessung



5) Profilmessungen an Bohrkernen aus Naturstein und Ziegelmaterial

6. Literatur

- [1] Hillger, W.: Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschallprüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen. Diss., Technische Universität Braunschweig 1983
- [2] Neisecke, J.: Ein dreiparametrisches, komplexes Ultraschall- Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 28, 10/74
- [3] Neisecke, J.: Ultraschallprüfung im Bauwesen - eine kritische Wertung. DGZfP, Symposium 27.2.-1.3. 1991 in Berlin
- /4/ Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden für Beton. 2. Auflage Verlag für Bauwesen Berlin
- /5/ Rentsch, W.; Krompholz, G.: Zur Bestimmung elastischer Konstanten durch Schallgeschwindigkeitsmessungen. Fachzeitschrift der Bergakademie Freiberg 7- 8 (1961)

7. Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Messprinzip der Dehnwellenmessung

Abb. 2: Ultraschallkurve und dazugehörige Resonanzschwingungen von Betonbohrkernen mit unterschiedlichen Schlankheitsgraden 1:2 (links) und 1:4 (rechts); GS:Grundschiwingung

Abb. 3: Resonanzkurven von Straßenbetonbalken nach unterschiedlicher Wechsellagerung; Klammerwerte geben dyn. E-Modul an

Abb. 4: Durchführung der Profilmessung

Abb. 5: Profilmessungen an Bohrkernen aus Naturstein und Ziegelmaterial

Verfasser:

Dipl.-Ing. *Wolfgang Erfurt*
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Fakultät Bauingenieurwesen
Bauhaus-Universität Weimar

Rolf Krompholz
GEOTRON - ELEKTRONIK
Ultraschall-Meßtechnik