

Diss. ETH Nr. 11665

# **Die Drei-Koeffizienten-Ultraschallspektroskopie als zerstörungsfreie Methode zur Prüfung von Gesteinen**

**ABHANDLUNG**

zur Erlangung des Titels

**DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN**

der **EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH**

vorgelegt von

**Markus Spühler**

Dipl. Natw. ETH

geboren am 21. Februar 1966

von Zürich

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. C. Schindler, Referent

Prof. Dr. V. Dietrich, Korreferent

Dr. sc. techn. T. Lüthi, Korreferent, EMPA Dübendorf

Zürich 1996

## ZUSAMMENFASSUNG

Sowohl in der Forschung als auch in der Industrie und Praxis besteht ein grosser Bedarf nach neuen, schnellen und zerstörungsfreien Methoden zur Untersuchung und Prüfung von Gesteinen und mineralischen Baustoffen.

Die Auswahl, Entwicklung und Erprobung einer solchen neuen Methode, der Drei-Koeffizienten-Ultraschallspektroskopie, ist das Thema der vorliegenden Arbeit.

In einer ersten Phase, der Evaluation bereits existierender zerstörungsfreier Prüfmethoden, wurden zwei Verfahren für weiterführende Vorversuche ausgewählt: Die Ultraschallspektroskopie und die Impedanzspektroskopie. Bei der auf Ultraschall basierenden Methode wird die Änderung des Frequenzganges und Schwächung eines Signales bei der Durchschallung eines Materials untersucht. Bei der Impedanzspektroskopie wird die elektrische Leitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante eines Stoffes in Funktion der Wechselstromfrequenz untersucht. Aufgrund der erzielten Resultate wurden die Ultraschallverfahren zur Weiterentwicklung ausgewählt.

Zwischen den Ultraschalleigenschaften und den mechanischen Eigenschaften eines Materials besteht ein enger Zusammenhang. Neben der Schallgeschwindigkeit ist die Dämpfung des Ultraschalls eine charakteristische Materialeigenschaft. Die quantitative Erfassung der Ultraschalldämpfung von Gesteinen und mineralischen Werkstoffen ist allerdings recht schwierig und bis anhin nicht zufriedenstellend gelöst worden.

Mit der Drei-Koeffizienten-Ultraschallspektroskopie wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt die Ultraschallschwächung eines Materials zu quantifizieren und als Materialkonstante zu bestimmen. Als physikalischer Ansatz wurde die folgende Gleichung aufgestellt:

$$A_1 = A_0 \cdot G_f \cdot e^{-(Q_r + Q_a \cdot f + Q_s \cdot f^2) \cdot d}$$

Gleichung der  
Drei-Koeffizienten-Ultraschallspektroskopie

- $A_0$  = Amplitude an der Stelle 0
- $A_1$  = Amplitude an der Stelle 1
- $G_f$  = Geometriefaktor des Schallfeldes
- $Q_r$  = Reflektionskoeffizient
- $Q_a$  = Absorptionskoeffizient
- $Q_s$  = Streukoeffizient
- $f$  = Frequenz in MHz
- $d$  = Durchschallte Distanz in mm

Diese Gleichung berücksichtigt die drei Hauptprozesse der Ultraschalldämpfung in einem Material: die Reflektion an Grenzflächen, die Absorption an Kornkontakten und die Streuung an Störstellen. Die drei Koeffizienten  $Q_r$ ,  $Q_a$  und  $Q_s$  lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit aus geeignet ermittelten Messdaten berechnen. Sie sind Materialkonstanten und erlauben es damit die Ultraschallschwächung eines Werkstoffes quantitativ zu erfassen.

Die Entwicklung und Erprobung der Drei-Koeffizienten-Ultraschallspektroskopie erfolgte stufenweise an Materialien und Hydratationsprozessen mit steigender Komplexität:

- Plexiglas und Hart-PVC
- Sand unterschiedlicher Zusammensetzung und Kornfraktion
- Modellgips unterschiedlicher Zusammensetzung
- Hydratation von Modellgips
- Beton mit unterschiedlichem Wasser/Zement-Wert
- Hydratation von Portlandzement in Normmörtel

Die Probenmaterialien wurden mit breitbandigen 0.5 MHz Prüfköpfen (Longitudinalwellen) durchschallt, die Signale analog erfasst, digitalisiert und abgespeichert. Die Ultraschallschwächung wurde anschliessend auf einem PC-486 berechnet.

Die als Materialkonstanten ermittelten Dämpfungskoeffizienten  $Q_r$ ,  $Q_a$  und  $Q_s$  erwiesen sich dabei als bedeutend aussagekräftiger und empfindlicher bezüglich der mechanischen Eigenschaften eines Materials als die gemessene Ultraschallgeschwindigkeit.

So konnte zum Beispiel mit Hilfe der Drei-Koeffizienten-Ultraschallspektroskopie das Absinken der Druckfestigkeit von Modellgips-Proben mit Glimmerzuschlag trotz einer damit verbundenen, grossen Geschwindigkeitszunahme eindeutig vorausgesagt werden. Als besonders geeignet erwies sich die quantitative Bestimmung der Ultraschallschwächung auch zur Untersuchung und Kontrolle der Hydratationsprozesse von Modellgips und Portlandzement. Der Ablauf der Hydratation konnte kontinuierlich über einen grossen Zeitraum verfolgt und quantitativ erfasst werden. Dies war mit den gleichzeitig ausgeführten Geschwindigkeitsmessungen nicht möglich.

Die Drei-Koeffizienten-Ultraschallspektroskopie ist damit eine aussagekräftige und schnelle Methode zur zerstörungsfreien Prüfung von homogenen Gesteinen und Hydratationsprozessen.

## ABSTRACT

In research as well as in industry and practice there is a great need for new, fast and non-destructive methods of examination and testing various rocks and concrete. The choice, development and testing of such a method, the Three-Coefficients-Ultrasound-Spectroscopy, is the subject of the present thesis.

At a first stage, the evaluation of already existing non-destructive testing methods, two procedures have been selected for progressing pre-tests: the ultrasound-spectroscopy and the impedance-spectroscopy. The method based on ultrasonic measurements checks the alteration of frequency and the attenuation of a signal when it traverses a material. The impedance spectroscopy checks the electrical conductivity and the value of the dielectric constant of a material as a function of the frequency of alternating current. Because of the achieved results the ultrasonic method was selected for further development. There is a close connection between ultrasonic and mechanical properties of a material. Beside the velocity of sound, the attenuation of a ultrasonic signal is a characteristic property of materials. The quantitative measurement of the attenuation of ultrasonic waves in rocks and concrete is rather difficult and has not been solved satisfactory up to now.

Now, the Three-Coefficients-Ultrasound-Spectroscopy is a newly developed method, allowing to quantify the attenuation and to determine it as a physical constant of a specific material. The method is based on the following physical equation:

$$A_1 = A_0 \cdot G_f \cdot e^{-(Qr + Qa \cdot f + Qs \cdot f^2) \cdot d}$$

Equation of the Three-coefficients-Ultrasound-Spectroscopy

- $A_0$  = amplitude (position 0)
- $A_1$  = amplitude (position 1)
- $G_f$  = geometric factor
- $Qr$  = coefficient of reflection
- $Qa$  = coefficient of absorption
- $Qs$  = coefficient of scattering
- $f$  = frequency (MHz)
- $d$  = distance of transmission (mm)

This equation considers the three main processes of ultrasonic attenuation in given material: the reflection of the confining surfaces, the absorption of the grain contacts and the scattering. Because of their different dependence on frequencies, the three coefficients  $Qr$ ,  $Qa$  and  $Qs$  can be calculated from a suitable measured data set. They are physical constants of a material and make it possible to quantify the attenuation of ultrasound.

For the developing and the testing of the method the following materials (with growing complexity) were used:

- perspex and solid PVC
- sands of different composition and grain fraction
- gypsum of different composition
- hydratation of gypsum
- concrete of different water/cement ratios
- hydratation of Portland cement in standard mortar

For testing two broad-band piezo-transducers (0.5 MHz, P-waves) were used in a transmission line. The signals were measured in analog mode, digitalized and stored. Finally the attenuation of ultrasound was calculated on a PC-486.

The attenuation coefficients  $Q_r$ ,  $Q_a$  and  $Q_s$  turned out to be more significant and more sensitive regarding the mechanical properties of materials than the measured ultrasonic velocities.

For example: By means of the Three-Coefficients-Ultrasound Spectroscopy the decrease of pressure resistance of gypsum with additional mica could be predicted in spite of the connected significant increase of velocity. The quantitative definition of the attenuation of ultrasound turned out to be particularly suitable for examination and control of hydratation processes of gypsum and Portland cement. The process of hydratation could be observed and quantified continually during a long period, which was not possible by means of simultaneous measurement of velocity.

*The Three-Coefficients-Ultrasound Spectroscopy is therefore an informative and fast non-destructive testing method for homogeneous rocks and processes of hydratation.*