

Versuchsanleitung S 9 : Ultraschall-Impulsecho

1 Einleitung

Ultraschallwandler (auch Schallköpfe oder Transducer genannt) werden entweder kontinuierlich von einem Sinusgenerator zu Schwingungen angeregt oder durch einen sehr kurzen Spannungsimpuls zu einer kurzzeitigen Schwingung, vergleichbar dem Ausschwingen eines gedämpften Oszillators. Bei piezoelektrischen Materialien wird hierbei der reziproke piezoelektrische Effekt ausgenutzt. Die aus dem angekoppelten Medium auf einen Wandler auftreffenden Ultraschallwellen bewirken geringe Deformationen des Wandlers, die infolge des direkten piezoelektrischen Effektes in elektrische Spannungen umgewandelt werden. Ein und derselbe Wandler kann somit sowohl als Sender wie auch als Empfänger genutzt werden. Da die empfangenen Ultraschallwellen in Amplitude und Phase vom durchschallten Medium geprägt werden, ergeben sich wichtige Anwendungen besonders in der Medizin, Materialprüfung und als Echolot in der Schifffahrt.

2 Grundlagen

Moderne Ultraschallwandler bestehen aus piezoelektrischen Materialien in Form von Kristallen (Quarz), Keramiken (Bariumtitanat, Bleizirkonattitanat, PZT) und Polymerfolien (Polyvinylidenfluorid, PVDF). Da die Übertragung der Energie einer mechanischen Welle durch elastische Kräfte erfolgt, ist die Ankopplung des Wandlers an das zu durchschallende Medium wichtig. Kerngröße ist hierbei der Wellenwiderstand (Schallkennimpedanz, akustischer Widerstand) Z als Produkt aus Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit c :

$$Z = \rho \cdot c \quad (2-1)$$

Da die longitudinale Schallgeschwindigkeit für Flüssigkeiten primär von der adiabatischen Kompressibilität und für Festkörper vom Elastizitätsmodul E sowie der Poissonschen Querkontraktionszahl ν abhängt, spiegelt die akustische Impedanz die elastischen Materialeigenschaften wider. Änderungen und Sprünge der akustischen Impedanz an Grenzflächen führen zu einer teilweisen Reflexion sowie Brechung der Schallwelle, verbunden mit deren Schwächung in Ausbreitungsrichtung. In Flüssigkeiten treten wegen der Abwesenheit von Scherkräften nur Longitudinalwellen auf. In Festkörpern sind auch Transversalwellen möglich. Die Schallgeschwindigkeit der Transversalwellen c_T ist stets geringer als die der Longitudinalwellen c_L . Trifft eine Longitudinalwelle aus einer Flüssigkeit mit einem Einfallswinkel $\alpha \neq 90^\circ$ auf eine Festkörperoberfläche, entstehen sowohl eine Longitudinal- als auch Transversalwelle (mit Schwingungsrichtung in der Einfallsebene). Die Ausfallswinkel β_L sowie β_T genügen dem Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha}{c_F} = \frac{\sin \beta_L}{c_L} = \frac{\sin \beta_T}{c_T} . \quad (2-2)$$

Ist die Weglänge der Schallwelle bekannt, kann aus der Laufzeit eines Schallimpulses die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. Bei geringer Dämpfung können multiple Echos ausgewertet werden, was die Genauigkeit erhöht. Eine andere Möglichkeit besteht in der Einstrahlung einer kontinuierlichen Welle und deren Abstimmung auf Resonanzwellenlänge (vergleiche Versuch S 6 - Stehende Wellen). Zwischen den Stirnflächen eines Stabes oder zwischen beiden Seiten einer Platte bildet sich dann eine stehende Welle heraus, für die gilt

$$\lambda = \frac{2L}{n} , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2-3)$$

Aus der transversalen Schallgeschwindigkeit und der Dichte ρ lässt sich der Schermodul (auch Schub- oder Torsionsmodul) G berechnen :

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-4)$$

Aus der Kenntnis von c_T und c_L kann man die Poissonzahl bestimmen, es gilt :

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2-5)$$

Aus c_L , G und ν ergibt sich der Elastizitätsmodul E :

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2-6)$$

Bei der Ausbreitung in einem Medium erfährt die Schallwelle eine Schwächung. Hierbei nehmen die Schallintensität sowie die damit verbundenen Schallfeldgrößen beim Durchdringen einer Schichtdicke x ab. Für J_0 die einfallende und J_x die austretende Intensität ist die Dämpfung $D = \frac{J_x}{J_0}$ definiert. Ursachen einer Schallschwächung können sein:

- die (eigentliche) Absorption D_{Abs} (Umwandlung von Schallenergie in andere Energieformen)
- die Schallfeldgeometrie D_{Geo} (z. B. Abnahme der Schallenergie im Fernfeld des Wandlers)
- eine Reflexion an Grenzschichten D_{Refl} (hängt von der Art des benachbarten Mediums ab)
- die Streuung D_{Streu} (an vorhandenen Strukturinhomogenitäten)

Für die gemeinsame Dämpfung gilt :

$$D = D_{\text{Abs}} \cdot D_{\text{Geo}} \cdot D_{\text{Refl}} \cdot D_{\text{Streu}} \quad (2-7)$$

Die Schallabsorption ist gekennzeichnet durch eine exponentielle Abnahme der Schalldruckamplitude mit der Schichtdicke x .

$$p(x) = p_0 e^{-\alpha x} \quad (2-8)$$

α ist eine Materialkonstante und wird als Absorptionskoeffizient und der negative Exponent $-\alpha x$ als Extinktion bezeichnet. Aus dem Absorptionskoeffizienten lässt sich das Dämpfungsmaß D als die Abnahme des Schalldruckpegels in Dezibel je Wegeinheit ableiten:

Eine Schalldruckabnahme verursacht eine Intensitätsabnahme

$$J(x) = J_0 e^{-\alpha_j x} \quad (2-9)$$

mit $\alpha_j = 2\alpha$. Meist wird α angegeben, da die Ultraschallempfänger in der Regel Druckwandler sind.

3 Versuchsanordnung

3.1 longitudinale Schallgeschwindigkeit in zylindrischen Stäben

An beiden Enden eines Stabes sind Piezoschwinger angekoppelt. Ein Wandler wird mit einem elektrischen Nadelimpuls angeregt und mittels Digitaloszilloskop die Laufzeit der Ultraschallwelle durch den Stab gemessen. Aus der Länge des Stabes ergibt sich die Schallgeschwindigkeit.

3.2 Ultraschalldämpfung

An beiden Seiten einer Stahlplatte der Dicke d sind Wandler angekoppelt. Nach Anregung mittels Nadelimpuls werden am zweiten Wandler multiple Echos beobachtet. Da die Schallwelle zwischen zwei aufeinander folgenden Echos den Weg $2d$ zurückgelegt hat, ergibt sich aus dem Amplitudenverhältnis des Schalldruckes der Absorptionskoeffizient α .

3.3 Transmissionskoeffizient, longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeiten

Mit einem Messaufbau, bestehend aus einer mit Wasser gefüllten Glaswanne mit zwei Wandlern und einer im Becken drehbar angeordneten ca. 1 cm starken Platte aus dem Probematerial können bei schrägem Einfall im Festkörper auftretende longitudinale und transversale Schallwellen untersucht werden. Die transversale Schallwelle hat als Scherwelle die kleinere Ausbreitungsgeschwindigkeit. Vergrößert man den Einfallswinkel ergeben sich mehrere Bereiche:

Einfallswinkel 0°: Es wird nur das HF-Signal der longitudinalen Schallwelle, vergrößert und verbreitert durch Mehrfachreflexionen im Festkörper, beobachtet.

Kleiner Winkel bis etwa 10°: Mehrfachreflexe verschwinden, Amplitude wird kleiner.

Bereich von 10° bis etwa 30°: Überlagerung von Signalen der longitudinalen und der transversalen Welle.

Bereich über 30°: nur noch Signal der transversalen Welle mit Amplitudenmaximum bei einem Einfallswinkel von etwa 40°, bei größeren Winkeln kleiner werdende Amplitude.

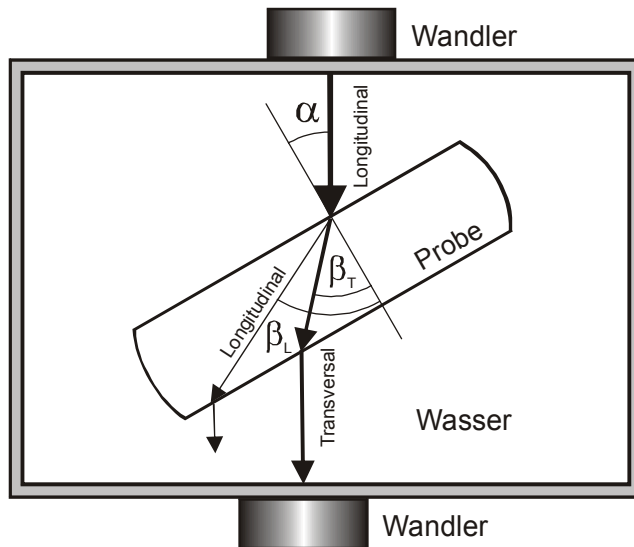


Abbildung: Anordnung zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler und transversaler Ultraschallwellen im Festkörper

Eine planparallele Platte des Probematerials befindet sich in einer Flüssigkeit (Wasser) mit bekannter Schallgeschwindigkeit. Bei senkrechtem Einfall breiten sich im Festkörper nur longitudinale Wellen aus. Bei größeren Einfallswinkel entstehen sowohl longitudinale als auch transversale Schallwellen. Bei $\beta_T = 45^\circ$ hat die Intensität der Transversalwelle ein Maximum. Der Einfallswinkel α kann auf einer Skala abgelesen werden.

Vergleicht man die Laufzeit der Schallwelle durch das Becken ohne Probe mit derjenigen bei senkrecht stehender Platte, kann man die Schallgeschwindigkeit der longitudinalen Welle c_L bestimmen. Da die Transmission der Transversalwelle für einen Durchgangswinkel von $\beta_T = 45^\circ$ durch die Platte am größten ist, lässt sich aus dem Maximum der transversalen Amplitude der dazugehörige Einfallswinkel α nach Gl. (2-2) bestimmen und damit die transversale Schallgeschwindigkeit berechnen.

Es gilt :

$$c_T = \frac{c_F}{\sqrt{2} \sin \alpha} \quad (3-1)$$

Hierbei ist $c_F = 1483 \text{ m/s}$ die Schallgeschwindigkeit des Wassers.

Aus den Gleichungen (2-4) bis (2-6) lassen sich die longitudinale Schallgeschwindigkeit und die elastischen Konstanten bestimmen.

3.4 Untersuchung einer Platte auf strukturelle Unregelmäßigkeiten (sogenannte Ungängen)

Eine Aluplatte hat auf ihrer Rückseite eine durch Fräsen hervorgerufene Unregelmäßigkeit. Die Form der gefrästen Struktur ist durch Abtasten mit einem Wandler zu ermitteln.

4 Aufgaben

In diesem Abschnitt werden die zu bearbeitenden Aufgaben nur grundsätzlich aufgeführt. Genauere Hinweise zur Versuchsdurchführung befinden sich am Arbeitsplatz.

- 4.1 Bestimmen Sie die Eigenfrequenz eines Piezoschwingers.
- 4.2 Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in einem zylindrischen Stab.
- 4.3 Bestimmen Sie die Dämpfungskonstante einer Stahlplatte.
- 4.5 Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Intensitäten von longitudinaler und transversaler Schallwelle in Abhängigkeit vom Einfallswinkel und bestimmen Sie hieraus die elastischen Konstanten E , G , ν .
- 4.6 Bestimmen Sie die Lage und Form einer Ungänze in einer Metallplatte.

5 Fragen

- 5.1 Wie lauten die Wellengleichungen für ebene longitudinale sowie transversale Schallwellen im homogenen Festkörper ?
- 5.2 Ein Schallwandler (kreisrunder Dickenschwinger, Durchmesser $d = 10$ mm) wird mit 2,5 MHz angeregt. Bis zu welchem Abstand vom Wandler reicht das Nahfeld in Wasser $c = 1340$ m/s ?
- 5.3 Welches sind die Vorteile von Ultraschall gegenüber Hörschall ?
- 5.4 Der Wandler von 5.2 strahlt eine Leistung von 1 W ab. Wie groß ist etwa die Strahlungsintensität nahe der Strahlungsachse in 20 cm Abstand ?
- 5.5 Leiten Sie nach dem Prinzip der Überlagerung von Elementarwellen nach HUYGENS das Brechungsgesetz ab.
- 5.6 Das FERMAT'sche Prinzip besagt, dass ein Lichtstrahl stets den optisch kürzesten Weg nimmt, den mit der kürzesten Laufzeit zwischen zwei Punkten A, B . Zwischen A und B liege eine Grenzfläche zweier Medien mit n_1 , n_2 . Leiten Sie aus dem FERMAT'schen Prinzip das Brechungsgesetz ab.
- 5.7 Ein Dickenschwinger von 1 mm Wandstärke hat eine Resonanzfrequenz von 2,5 MHz . Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit der longitudinalen Welle in diesem Material ?
- 5.8 Was bezeichnet man als Fehlanpassung, welche Folgen hat sie und wie kann man sich behelfen ?
- 5.9 Die senkrecht auf eine planparallele Platte von 25 mm Dicke eingestrahlte Ultraschallwelle zeigt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Echos eine Abschwächung des Schalldruckes von 30 % . Wie groß ist die Dämpfung (in dB \cdot cm $^{-1}$) ? Welchen Wert hat die Dämpfungskonstante ?
- 5.10 Eine longitudinale Ultraschallwelle mit einer Frequenz von 2,5 MHz trifft schräg auf eine ebene Platte und regt in dieser eine Transversal- und eine Longitudinalwelle an. Beide können auf der anderen Seite der Platte getrennt von zwei Wandlern detektiert werden. Welche Frequenzen haben beide Wellen, wenn sich die Schallgeschwindigkeiten verhalten wie $\frac{c_L}{c_T} = 1,2$?

Literatur

- [1] Millner, R. (Aut.-Koll.) : Wissensspeicher Ultraschalltechnik
Fachbuch-Verlag, Leipzig, 1987
- [2] Kuttruff, H. : Physik und Technik des Ultraschalls
S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1988
ISBN 3-7776-0427-5
- [3] Hering, E. u. a. : Physik für Ingenieure
Springer-Verlag, Berlin, 2004
ISBN 3-540-21036-9
- [4] http://www.ias.et.tu-dresden.de/akustik/Skripte/Ultraschall/Skript_US1_02.pdf
http://www.ias.et.tu-dresden.de/akustik/Skripte/Ultraschall/Skript_US1_03.pdf
- [5] <http://www.gampt.de/versuch.pdf>