

M3 „Ultraschall“

Aufgaben

1. Messen Sie die Schallgeschwindigkeit von Ultraschallwellen
 - a. in Acrylglas in Reflexion bei 1, 2 und 4 MHz und Transmission bei 2 MHz
 - b. in Aluminium bei 2 MHz.Berechnen Sie den Elastizitätsmodul der Materialien.
2. Ultraschallechographie (B-Bild). Gegeben ist ein Acrylglasblock, der an mehreren Positionen mit Bohrungen unterschiedlichen Durchmessers versehen wurde. Nehmen Sie ein Ultraschall-Schnittbild (B-Bild, Grauwertdarstellung) des Acrylglasblocks auf.
3. Messen Sie unter Verwendung des Transversalwellensets mit den 2 MHz-Sonden die Signallaufzeiten und –amplituden nach Durchlaufen einer sich im Wasser befindlichen Acrylplatte. Interpretieren Sie die Daten. Bestimmen Sie den Grenzwinkel der Totalreflektion.
4. Schätzen Sie das Auflösungsvermögen durch Messung zweier nah beieinanderliegender Störstellen ab.

Literatur

Gerthsen Physik, D. Meschede, 24. Auflage, 4.3, 4.4
W. Demtröder, Experimentalphysik 1, 6. Auflage, 11.9, 11.11, 11.14

Zubehör

Ultraschallgerät GAMPT-Scan mit Software, Ultraschallsonden 1, 2 und 4 MHz, Sondenhalter, Acrylglaszylinder mit drei unterschiedlichen Längen, verschiedene Aluminiumblöcke, Acrylglasblock mit Bohrungen, Transversalwellenset

Schwerpunkte zur Vorbereitung

- Wellen, mathematische Beschreibung von Wellen
- Wellengleichung
- Wellen in elastischen Medien, Longitudinal- und Transversalwellen, elastische Module
- Intensität einer Welle, Reflexions- und Transmissionsfaktor
- Prinzip von Fermat, Reflexions- und Brechungsgesetz
- Absorption, Absorptionskoeffizient

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Grundsätzlich werden die Ultraschallsonden mit einem Ultraschallgel an die Untersuchungsmedien angekoppelt. An jedem Versuchsplatz befinden sich jeweils eine Ultraschallsonde 1 MHz und 4 MHz und zwei Ultraschallsonden 2 MHz. In diesem Versuch werden Laufzeiten und Amplituden von kurzzeitigen Ultraschallpulsen gemessen. Daraus können die Schallgeschwindigkeit und die Schalldämpfung, aber auch die Position von Störstellen bestimmt werden. Die ausgesandte Ultraschallwelle wird an Änderungen der Schallimpedanz (Grenzflächen, Störstellen, Risse etc.) teilreflektiert; sowohl das reflektierte als auch das transmittierte Signal können detektiert werden (Einstellung mit Umschalter 2b Abb. 1). Die Laufzeit ist die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn des Sendepulses und dem Beginn des detektierten Pulses. In jedem Aufgabenteil sind die Einstellungen am Gerät (Abb. 1: 2a: Sendeleistung, 3: Grundverstärkung, 1a-d: laufzeitabhängige Verstärkung, Frequenzfilter) für das entsprechende Echo zu optimieren. Die Filterung der Frequenzen erfolgt mittels Software im Menü „Filter“. Dabei kann die obere und untere Grenzfrequenz des Filters sowie die Form der Filterfunktion festgelegt werden. Bei der Verwendung der Filterfunktion ist darauf zu achten, den Filter im Bereich der genutzten Frequenz zu verwenden. Die Bandbreite des Filters sollte so gewählt werden, dass störende Signale (z.B. Oberwellen) unterdrückt werden, jedoch sollte die Signalintensität durch zu kleine Bandbreiten nicht zu stark gemindert werden. Bei sehr breitbandigen Messsignalen sollte ein Filter hoher Ordnung verwendet werden, da es bei der Rechteckfunktion zur Ausbildung von Nebenminima (Abb. 2) kommt.



Abb. 1 Frontansicht des Ultraschallgeräts

Die Laufzeit ist die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn des Sendepulses und dem Beginn des detektierten Pulses. In jedem Aufgabenteil sind die Einstellungen am Gerät (Abb. 1: 2a: Sendeleistung, 3: Grundverstärkung, 1a-d: laufzeitabhängige Verstärkung, Frequenzfilter) für das entsprechende Echo zu optimieren. Die Filterung der Frequenzen erfolgt mittels Software im Menü „Filter“. Dabei kann die obere und untere Grenzfrequenz des Filters sowie die Form der Filterfunktion festgelegt werden. Bei der Verwendung der Filterfunktion ist darauf zu achten, den Filter im Bereich der genutzten Frequenz zu verwenden. Die Bandbreite des Filters sollte so gewählt werden, dass störende Signale (z.B. Oberwellen) unterdrückt werden, jedoch sollte die Signalintensität durch zu kleine Bandbreiten nicht zu stark gemindert werden. Bei sehr breitbandigen Messsignalen sollte ein Filter hoher Ordnung verwendet werden, da es bei der Rechteckfunktion zur Ausbildung von Nebenminima (Abb. 2) kommt.

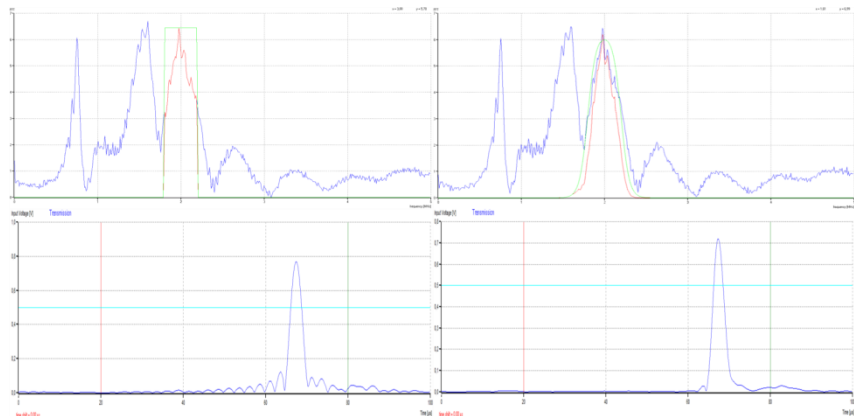


Abb. 2 Signal einer Transmissionsmessung mit rechteckförmigem Filter (links) und mit Filter 12. Ordnung (rechts). Darunter die zugehörigen Amplitudensignale.

Zu 1: Messung der Schallgeschwindigkeit.

Laufzeitmessungen werden an drei Acrylglaszylindern unterschiedlicher Länge sowie an einem Aluminiumblock durchgeführt.

In einer Reflexionsmessung wird der Probekörper senkrecht aufgestellt, die Ultraschallsonde wird an der oberen Deckfläche angekoppelt und die Laufzeit zwischen Sendepuls und dem Echo von der Reflexion an der Unterlage wird gemessen. In einer Transmissionsmessung liegt der Probekörper horizontal und die Ultraschallsonden werden an beiden Enden angekoppelt. Alle Ultraschallsonden werden mit einer Anpassungs- und Schutzschicht auf der aktiven Fläche hergestellt; diese führt zu

einem systematischen Fehler in der Laufzeitmessung, da letztere stets die Laufzeit t_A in der Anpassungsschicht beinhaltet. In Reflexion erhält man

$$t' = 2(t + t_A) = 2\left(\frac{s}{c} + t_A\right) \quad (1)$$

und in Transmission

$$t' = t + 2t_A = \frac{s}{c} + 2t_A, \quad (2)$$

wobei t' die gemessene Laufzeit, c die Schallgeschwindigkeit, s die Länge des Probenkörpers und t die Laufzeit im Probenkörper bezeichnen. In Aufgabe 1a) wird für drei unterschiedliche Längen des Probenkörpers die Laufzeit gemessen, so dass Schallgeschwindigkeit c und parasitäre Laufzeit t_A durch eine lineare Anpassung bestimmt werden können. In 1b) wird der bestimmte Wert von t_A zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Aluminium verwendet.

Dichten: Acrylglas: 1180 kg/m^3 , Aluminium: 2700 kg/m^3 .

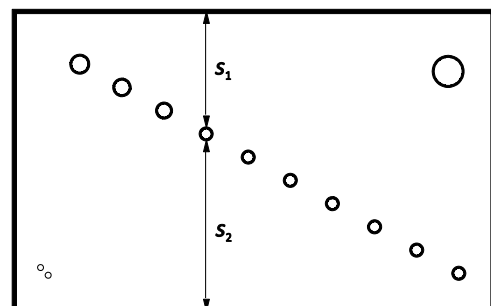
Arbeitsplatz / Zylinderlänge	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)
I	41,7	81,67	122,04
II	39,93	82,29	122,71
III	40,35	81,99	122,35
IV	40,91	80,26	122,21

Tabelle 1: Maße der Acrylglaszylinder

Zu 2: Ultraschallechografie (B-Bild).

Beim Ultraschall-Schnittbild (B-Bild) wird die Echoamplitude als Grauwert und die Laufzeit als Tiefe dargestellt. Die Auftragung vieler sukzessive aufgenommener Tiefenlinien ergibt das Schnittbild. Eine exakte Erfassung der lateralen Koordinate erfordert ein zusätzliches Linearpositionierungssystem, welches im Praktikum nicht zur Verfügung steht. Jedoch kann man durch langsame und gleichmäßige Führung der Ultraschallsonde mit der Hand recht gute Bilder aufnehmen.

Nehmen Sie ein optimiertes B-Bild eines Acrylblocks, siehe schematische Darstellung rechts, auf. Die Ultraschallsonde sollte dabei über einen Wasserfilm angekoppelt werden, da das Ultraschallgel eine starke Haftreibung verursacht. Die Bildqualität wird durch folgende Parameter bestimmt:



- Güte des Scannersystems
- Axiale Auflösung (Ultraschallfrequenz)
- Laterale Auflösung (Ultraschallfrequenz, Schallfeldgeometrie)
- Grauwertauflösung (Sendeleistung, Verstärkung, Tiefenausgleich (TGC))
- Zeilenzahl (Scan-Geschwindigkeit)
- Abbildungsfehler (Schallschatten, Mehrfachreflexionen, Bewegungsartefakte).

Zu 3: Transversalwellenset

Als Ausbreitungsmedien werden entweder isotrope elastische Festkörper mit Elastizitätsmodul E , Schermodul G und Kompressionsmodul K oder Flüssigkeiten mit Kompressionsmodul K betrachtet. Im Fall einer Longitudinalwelle sind Wellenauslenkung ξ und Ausbreitungsrichtung (in diesem Fall die z -Richtung) parallel und man erhält die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}, \quad (3)$$

aus der man die Phasengeschwindigkeit für die Longitudinalwelle

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

ablesen kann. Wird zusätzlich die bei Longitudinalwellen auftretende Querkontraktion berücksichtigt erhält man die Phasengeschwindigkeit zu

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (5)$$

wobei μ die Poisson- oder Querkontraktionszahl bezeichnet.

Im Fall einer Transversalwelle in einem isotropen Medium hat die Wellengleichung die gleiche Form wie in (3), mit der Ausnahme, dass der Elastizitätsmodul E durch den Schermodul G ersetzt wird. Die Phasengeschwindigkeit der Transversalwelle ist daher

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (6)$$

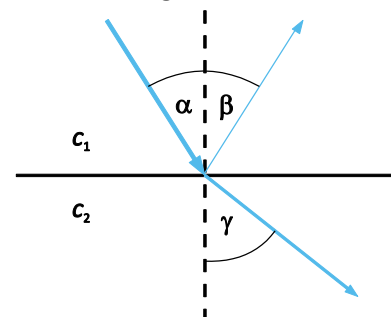
In Flüssigkeiten und in Gasen können sich lediglich Longitudinalwellen ausbreiten, weil der Schermodul verschwindet. Die Phasengeschwindigkeit ist daher

$$c_f = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (7)$$

Trifft eine Ultraschallwelle auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien mit den Schallgeschwindigkeiten c_1 und c_2 , siehe Abb. 3, so kann die Schallwelle reflektiert und gebrochen werden. Auch hier ist das Prinzip von Fermat gültig: Eine Welle läuft zwischen zwei vorgegebenen Punkten immer so, dass die Laufzeit minimal ist. Die Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung und dem Lot zur Grenzfläche seien mit α , β und γ bezeichnet. Dann kann man leicht zeigen, dass wie in der Optik das Reflexionsgesetz $\alpha = \beta$ sowie das Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c_1}{c_2} \text{ gelten.} \quad (8)$$

Abb. 3 Zum Brechungsgesetz. Eine Welle trifft auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien mit den Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_1 und c_2 .



Ist $c_2 > c_1$, so wird die Schallwelle, wie in Abb. 3 gezeigt, vom Lot weg gebrochen. Für Einfallswinkel größer als

$$\alpha_g = \arcsin\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (9)$$

tritt Totalreflektion ein.

Die Größe der Amplituden der reflektierten und der transmittierten Schallwelle hängen stark von der Grenzflächenbeschaffenheit und der Kopplung zwischen den Medien ab. So wird eine Ultraschallwelle an einem Hohlraum und beim Übergang von einem Festkörper in Luft praktisch totalreflektiert. Im Versuch werden die Ultraschallsonden grundsätzlich mit einer dünnen Ultraschallgelschicht an die Untersuchungsmedien angekoppelt, um die Amplitude der transmittierten Welle zu optimieren.

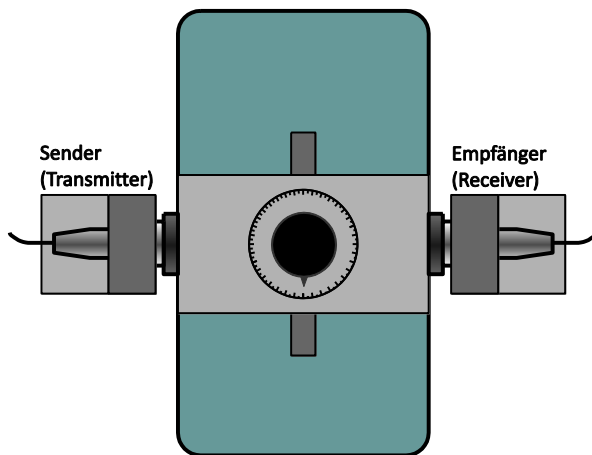


Abb. 4 Transversalwellenset.

Das im Versuch verwendete Transversalwellenset besteht aus einer Wasserwanne, an die zwei 2 MHz-Resonatoren angekoppelt werden. Eine Acrylglas- oder Aluminiumplatte ist an einer Drehvorrichtung befestigt und wird ins Wasser abgesenkt. Das vom Sender abgestrahlte Signal wird nach Durchlaufen des Wassers und der Platte vom Empfänger registriert. Beobachten Sie das empfangene Signal qualitativ für unterschiedliche Winkelpositionen der Platte. Wie lassen sich die Beobachtungen verstehen? Messen Sie die Amplitude des transmittierten Signals als Funktion der Winkelposition mit einer

Schrittweite von 2.5° . Bestimmen Sie den Grenzwinkel der Totalreflektion. Diskutieren Sie, was beim Auftreffen einer im Wasser verlaufenden Longitudinalwelle unter schrägem Einfall auf einen Festkörper geschieht. Berücksichtigen Sie, dass sich in Festkörpern sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen ausbreiten können.

Nützliche Werte: $c_{Luft} = 343 \frac{m}{s}$; $c_{Wasser} = 1485 \frac{m}{s}$; $\frac{E_{Acryl}}{G_{Acryl}} \approx 2$

Zu 4: Auflösungsvermögen.

Messen Sie den Abstand zweier benachbarter Störstellen in einem Acrylglasblock (siehe Abbildung zu 2.) mit der 1 MHz und der 4 MHz Ultraschallsonde. Schätzen Sie das Auflösungsvermögen ab. Ist die Abschätzung konsistent mit der Wellenlänge des Schalls?