

Versuch VM 1 (Veterinärmedizin) „Ultraschall“

Aufgaben

1. Messen Sie die Schallgeschwindigkeit von Ultraschallwellen in Acrylglas in Reflexion bei einer Frequenz von 1 MHz. Berechnen Sie aus der Schallgeschwindigkeit den Elastizitätsmodul von Acrylglas.
2. Ultraschallechographie (A-Bild). Gegeben ist ein Acrylglasblock, der an mehreren Positionen mit Bohrungen unterschiedlichen Durchmessers versehen wurde. Bestimmen Sie mittels einer Laufzeitmessung des Echos die Position von fünf Bohrungen bezüglich zweier gegenüberliegender Seitenflächen des Acrylquaders. Berechnen Sie die Durchmesser der Bohrungen.
3. Ultraschallechographie (B-Bild). Nehmen Sie ein Ultraschall-Schnittbild (B-Bild, Grauwertdarstellung) des in Aufgabe 2 verwendeten Acrylglasblocks auf.

Literatur

Gerthsen Physik, D. Meschede, 24. Auflage, 4.3, 4.4
W. Giese, Kompendium der Physik für Veterinärmediziner, 1997, Kap. 8

Zubehör

Ultraschallgerät GAMPT-Scan mit Software, Ultraschallsonde 1 MHz, Acrylglaszylinder mit drei unterschiedlichen Längen, Acrylglasblock mit Bohrungen

Schwerpunkte zur Vorbereitung

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

Grundlagen

Wellenerscheinungen findet man in vielen Bereichen der Physik: Mechanik (Wasserwellen, Wellen in elastischen Stäben, etc.), Akustik (Wellen auf einer Saite, Schallwellen, etc.), Elektrizitätslehre (Radiowellen, Wellen auf Kabeln, etc.), Optik (Lichtwellen) und vielen anderen mehr. Allen diesen Wellenerscheinungen liegt die gleiche Differentialgleichung zu Grunde, die zu charakteristischen Lösungen führt. Betrachten wir eine Welle, die sich entlang der x -Achse ausbreitet und in der x - y -Ebene schwingt, so hat eine typische Lösung der Wellengleichung die folgende Form:

$$y(x,t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right) + \varphi \right]. \quad (1)$$

Dabei bezeichnet A die Amplitude der Welle, λ (Einheit: m) die Wellenlänge (d.h. den Abstand zweier Wellenberge entlang der x -Achse, siehe Abb. 1), f (Einheit: Hz) die Frequenz und φ eine Phasenverschiebung. Die Schwingungsperiode (Einheit: s) ist durch $T = 1/f$ gegeben (dabei ist T der zeitliche Abstand zwischen zwei Wellenbergen, siehe Abb. 1). Im Gegensatz zu einer Schwingung, deren periodische Bewegung nur in der Zeit stattfindet, zeichnet sich die Welle dadurch aus, dass die periodische Bewegung sowohl entlang einer Raumrichtung (hier der x -Achse) als auch gleichzeitig in der Zeit stattfindet. Diese beiden periodischen Vorgänge bestimmen die Ausbreitungsgeschwindigkeit (genauer: Phasengeschwindigkeit) c (Einheit: m/s) der Welle:

$$c = \lambda f. \quad (2)$$

Ist die Auslenkung der betrachteten physikalischen Größe parallel zur Ausbreitungsrichtung, so liegt eine Longitudinalwelle vor, ist die Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, so spricht man von einer Transversalwelle. Lichtwellen sind Transversalwellen, Schallwellen Longitudinalwellen. Bei Wellen in elastischen Medien können sowohl longitudinale als auch transversale Anteile vorliegen.

In der Akustik unterscheidet man den Hörschall vom Infraschall (mit Frequenzen unterhalb des Hörschalls) und vom Ultraschall (mit Frequenzen oberhalb des Hörschalls bis 100 MHz). Dabei geht man vom Hörbereich des Menschen aus, der im Frequenzgebiet von 20 Hz bis 20 kHz liegt. Hörbereiche von Tieren können sich zu wesentlich höheren Frequenzen erstrecken; so können Hunde bis etwa 45 kHz, Katzen bis etwa 65 kHz und Ratten sogar bis 80 kHz hören.

Im vorliegenden Experiment werden Ultraschallwellen in elastischen Medien verwendet. Die Frequenzen liegen dabei bei 1 MHz und somit deutlich oberhalb des Hörbereichs von Lebewesen. Ein elastisches Medium wird durch seine Dichte ρ (Einheit: kg/m^3) und den Elastizitätsmodul E (Einheit: $\text{Pa} = \text{N/m}^2$) gekennzeichnet. Dabei geht man von der Beobachtung aus, dass viele Medien sich bei kleinen Verformungen elastisch verhalten, d.h. bei Verschwinden der Zug- oder Druckspannung σ ihre ursprüngliche Form wieder einnehmen. Dies wird durch das Hookesche-Gesetz ausgedrückt: Die Verzerrung ε eines elastischen Körpers ist proportional zur Spannung σ , wobei der Elastizitätsmodul

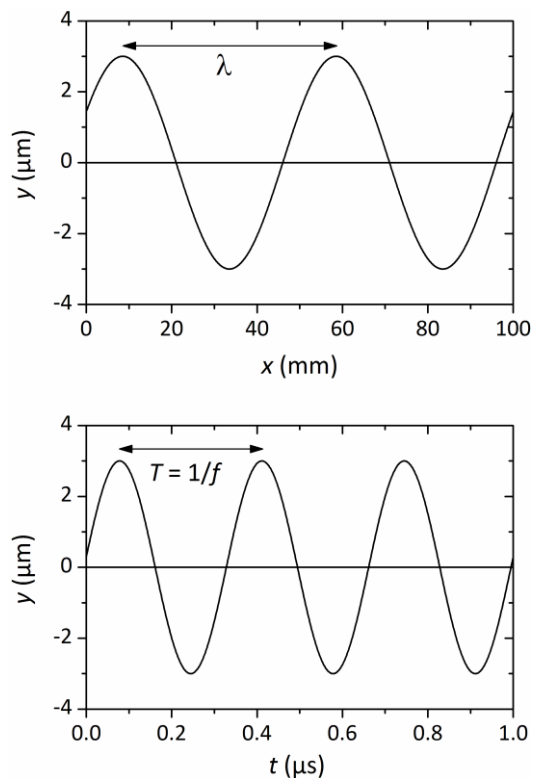


Abb. 1 Darstellung einer Welle, die sich entlang der x -Achse ausbreitet für (a) $t = \text{const}$ und (b) $x = \text{const}$.

E als Proportionalitätskonstante auftritt:

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Dabei ist die Zug- bzw. Druckspannung die senkrecht zu einem Querschnitt der Fläche A angreifende Kraft F_z (siehe Abb. 2) dividiert durch diese Fläche. Nimmt man an, dass die Kraft parallel zur z -Richtung angreift und die Fläche A in der dazu senkrechten Ebene liegt, gilt:

$$\sigma = \frac{F_z}{A}. \quad (4)$$

Als Dehnung oder Stauchung bezeichnet man das Verhältnis der Längenänderung Δl zur ursprünglichen Länge l (siehe Abb. 2):

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta l}{l} \right|. \quad (5)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_l von Longitudinalwellen in elastischen Medien wird durch die Dichte und den Elastizitätsmodul bestimmt und ist durch

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

gegeben.

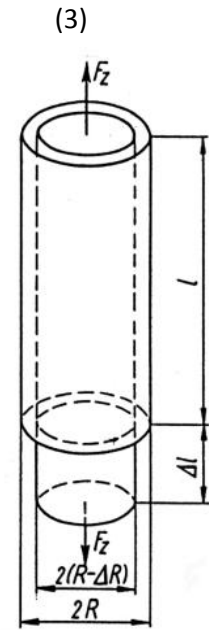


Abb. 2 Deformation eines Zylinders durch eine Zugkraft

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Ultraschallwellen in unterschiedlichen Medien.

Medium	Schallgeschwindigkeit (m/s)
Luft	340
Wasser	1500
Weichteilgewebe	1540
Knochen	3600

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. Die Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung und dem Lot zur Grenzfläche seien mit α , β und γ bezeichnet. Dann gelten wie in der Optik das Reflexionsgesetz $\alpha = \beta$ sowie das Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (7)$$

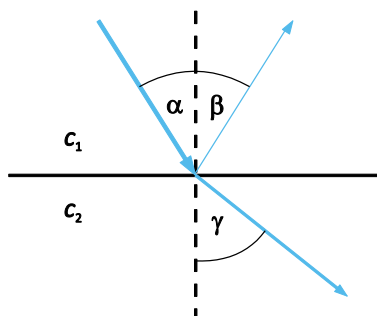


Abb. 3 Zum Brechungsgesetz. Eine Welle trifft auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien mit den Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_1 und c_2 .

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.

In diesem Versuch werden Laufzeiten 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; das reflektierte Signal wird detektiert. Die Laufzeit ist die Zeitdifferenz zwischen dem Maximum des Sendepulses und dem Maximum des detektierten Pulses. In jedem Aufgabenteil sind die Einstellungen am Gerät (Sendeleistung, Grundverstärkung, laufzeitabhängige Verstärkung) für das entsprechende Echo zu optimieren.

Zu 1: Messung der Schallgeschwindigkeit.

Laufzeitmessungen werden an drei Acrylglaszylindern unterschiedlicher Länge 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 (siehe Abb. 4). 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:

$$t' = 2(t + t_A) = 2\left(\frac{s}{c_l} + t_A\right) \quad (8)$$

wobei t' die gemessene Laufzeit, c die Schallgeschwindigkeit, s die Länge des Probekörpers und t die Laufzeit im Probekörper bezeichnen. In Aufgabe 1 wird für drei unterschiedliche Längen des Probekörpers die Laufzeit gemessen, so dass die Schallgeschwindigkeit c_l und die parasitäre Laufzeit t_A durch eine lineare Anpassung bestimmt werden können. Die Dichte von Acrylglas beträgt $\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$.

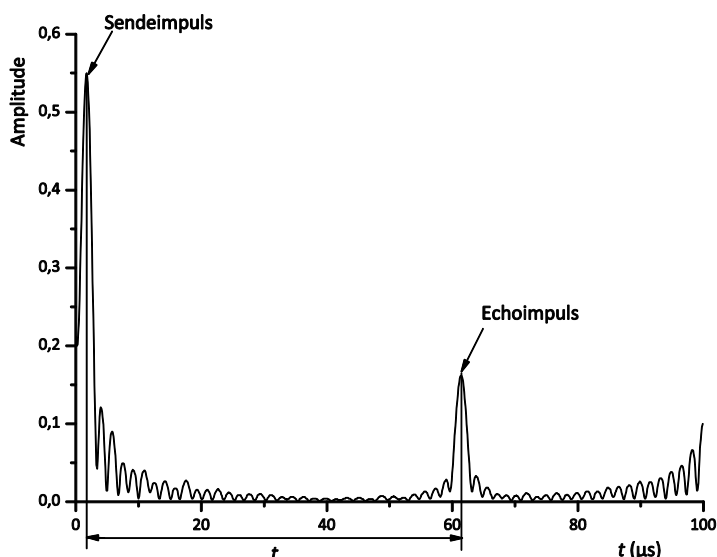


Abb. 4 Amplituden des Sende- und Echoimpulses. Die gemessene Laufzeit t' ist definiert als zeitlicher Abstand zwischen den Maxima der beiden Impulse.

Zu 2: Ultraschallechografie (A-Bild).

Unter Kenntnis der in Aufgabe 1 ermittelten Schallgeschwindigkeit lässt sich nun der Abstand von Störstellen in Acrylglas bestimmen. Dazu wird der in der Abbildung 5 gezeigte Acrylglasblock verwendet. Messen Sie die Abstände s_1 und s_2 von fünf ausgesuchten Bohrungen von den beiden Seitenflächen durch Messung der Laufzeit des Ultraschallsignals und berechnen Sie die Durchmesser der Bohrungen.

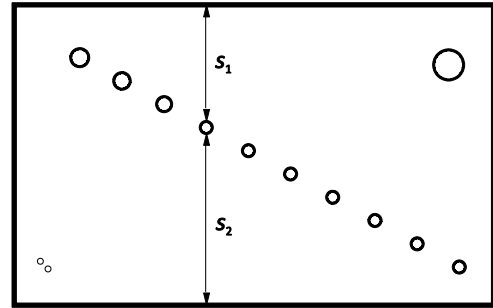


Abb. 5 Probekörper aus Acrylglas (Seitenansicht) mit Bohrungen unterschiedlichen Durchmessers.

Zu 3: 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 des Acrylblocks 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)
- Grauwertaufklärung (Sendeleistung, Verstärkung, Tiefenausgleich (TGC))
- Zeilenzahl (Scan-Geschwindigkeit)
- Abbildungsfehler (Schallschatten, Mehrfachreflexionen, Bewegungsartefakte).

Bedienungselemente des Ultraschallgeräts GAMPT-Scan



Abb. 6 Frontplatte des Ultraschallgeräts GAMPT-Scan

Die Experimente im vorliegenden Versuch zum Ultraschall werden im Reflexionsmodus (siehe Abb. 6, rot eingerahmtes Bedienfeld) durchgeführt. Die Ultraschallsonde ist zu Beginn des Versuchs bereits an der Buchse (2c) angeschlossen; ziehen Sie das Verbindungskabel nicht aus der Buchse. Achten Sie darauf, dass der Schalter (2b) auf der Stellung "Reflection" steht. Mit dem Drehknopf (2a) stellen Sie die Schalleistung an der Ultraschallsonde ein. Wählen Sie eine Einstellung zwischen 20 und 30 dB. **Die Geräte sind nicht für den medizinischen Gebrauch zugelassen. Versuchen Sie daher nicht, Ultraschallbilder von sich oder anderen Personen aufzunehmen.**

Das mit "Transmitter" bezeichnete Bedienfeld wird im Versuch nicht verwendet.

Die Daten (Echobild und auch B-Bild) werden von einer gerätespezifischen Software auf einem Laptop dargestellt. Sie werden zu Beginn des Versuchs in die Bedienung der Software eingewiesen. Zeitmessungen erfolgen direkt innerhalb der Software durch Setzen von Positionsanzeigern. Da das Echosignal schwächer ist als der Sendeimpuls, muss es zur Darstellung auf dem Bildschirm verstärkt werden. Dazu verwendet man eine laufzeitabhängige Verstärkung (time gain control, TGC), die es erlaubt, Signale (in diesem Fall das Echo) in gewissen Zeitbereichen gezielt zu verstärken. Zur Einstellung der TGC werden die Regler (1a) bis (1d) in Abb. 6 verwendet. Die GAMPT-Software zeigt neben dem Echobild das Zeitprofil der TGC, welches ein intuitives Verständnis der vier Regelparameter "Startpunkt", "Steigung", "Breite" und "Schwellenwert" vermittelt, und daher einen einfachen Einstieg in die Messungen ermöglicht.