

Ultraschallmessungen und Sonografie

Schall ist eine longitudinale mechanische Welle, bei der sich zeitlich periodisch der Druck in einem Medium (Gas, Flüssigkeit, Festkörper) ändert. Ultraschall ist Schall mit einer Frequenz oberhalb von 20 kHz bis zu 1 GHz, darüber spricht man von Hyperschall, unterhalb von 20 Hz von Infraschall. Ultraschallwellen werden wie andere Wellen: reflektiert, absorbiert, transmittiert, gestreut, gebeugt, gebrochen und zeigen Interferenz. Eine wichtige Anwendung von Ultraschallwellen ist die medizinische Diagnostik und die Materialprüfung. Dort werden Frequenzen zwischen 1 MHz und 40 MHz genutzt.

1 Lernziele

- Kenngrößen von Wellen mit Einheit: Wellenlänge, Frequenz, Amplitude, Phase, Ausbreitungsgeschwindigkeit (Phase)
- Longitudinal- und Transversal-Wellen
- Für Schallwellen: Impedanz, Reflektions- und Transmissionskoeffizient
- Grundlagen und Unterschiede zwischen Sonographie und Tomographie

2 Experimenteller Aufbau

- Ultraschallechoskop GAMPT-GS200 mit PC
- Schallköpfe mit Sensor 1 MHz(blau);
2×2 Mhz(rot); 4 MHz (grün)
- drei zylindrische Probenkörper aus Polyacrylat
- Wasserwanne mit beweglicher Reflektionswand
- Polyacrylatkörper mit verschiedenen Bohrungen
- PVC-Block mit nicht sichtbarer innerer Struktur



3 Messungen

- Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Polyacrylat bei 2 MHz und 4 MHz.
- Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Wassert bei 2 MHz in Reflektion durch lineare Regression des Weg-Zeit Gesetzes.
- Untersuchen Sie mittels Ultraschall-Reflexionen einen Polyacrylat Körper mit verschiedenen Bohrungen.
- Zusatz: Untersuchen Sie einen undurchsichtigen Körper und bestimmen Sie die innere Struktur.

4 Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus dem Echoskop mit den Schallköpfen und einen Computerarbeitsplatz. Die Schallköpfe können sowohl als Sender, als Empfänger und auch als beides gleichzeitig arbeiten (siehe Abb. im Zusatzmaterial).

4a) zu 3a) **Schallgeschwindigkeit in Polyacryl**

Vorbereitung: Verbinden Sie die zwei roten 2 MHz-Köpfe mit dem Echoskop und stellen Sie den Auswahlschalter TRANSMITTER|RECEIVER-MODE auf 1|2, damit ein Kopf als Sender und der andere als Empfänger arbeitet – Transmissionsmode. Verwenden Sie den mittleren Polyacrylatzylinder und etwas Gel/Wasser zur Ankopplung Probe/Kopf. Zeichnen Sie Echogramme im Amplitudenmodus (A-Mode) auf. Variieren Sie dabei am Echoskop den Sendepiegel (OUTPUT) und die Empfangsverstärkung (GAIN), wobei die Drehregler der laufzeitabhängigen Verstärkung (TGC-Time-Gain-Control) alle auf Null-Position (linker Anschlag) stehen. Variieren Sie zusätzlich mit der Software im linken Feld -Parameter- die Samplerate und den Messbereich in μs . Als Anzeige sollte both benutzt werden, damit sowohl die einhüllende Amplitude als auch die einzelnen Schallschwingungen sichtbar sind. Werden Sie so vertraut mit den Einstellmöglichkeiten und erfassen Sie ein oder zwei aussagekräftige Screenshots für Ihr Praktikumsbuch zur Dokumentation. Begründen Sie stichpunktartig Ihre Parameterwahl für weitere Untersuchungen.

Messung Transmission: Messen Sie von den drei Zylindern die jeweilige Länge und geben Sie diese mit der Messungenauigkeit an. Bestimmen Sie mit dem Echoskop im A-Mode/Amp jeweils für die drei Zylinder die Zeit bis das Signal am Empfänger ankommt. Dies ist der Fall, wenn die Amplitude beginnt steil anzusteigen^a

Messung Reflektion: Wechseln Sie am Ausgang PROBE 1 zu dem Kopf mit 1 MHz. Stellen Sie das Echoskop mit dem Auswahlschalter TRANSMITTER | RECEIVER-MODE auf 1|1 um mit dem selben Kopf an Ausgang 1 den Reflektionsmodus auszuwählen. Der Kopf ist nun Sender und Empfänger zugleich. Benutzen Sie für die weiteren Messungen sowohl den Kopf 1 Mhz und 4MHz, um für die drei Zylinder jeweils die Laufzeiten des reflektierten Signals zu messen. So können Sie die Schallgeschwindigkeit bei 1 MHz und bei 4 MHz ermitteln.

Werten Sie diesen Versuchsteil inklusive Fehlerrechnung aus.

4b) zu 3b) **Schallgeschwindigkeit in H₂O**

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Wasser wird die Reflektionsmethode benutzt. Es steht ein mit Wasser gefülltes Bassin mit einem verschiebbaren Reflektionskörper aus Edelstahl zur Verfügung. Bestimmen Sie die Reflektionszeit der Schallwellen ohne und mit dem Reflexionskörper für mindestens fünf verschiedenen Entfernungen vom Sender/Empfänger. Beobachten und Notieren Sie was mit dem gemessenen Reflektionssignal passiert, wenn Sie den Reflektionskörper leicht verdrehen. Wieso ist dies der Fall? Führen Sie eine lineare Regression für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durch, siehe Auswertung.

4c) zu 3c) **Manuelle Laufzeit-Tomographie**

Der zur Verfügung stehende Probenkörper mit verschiedenen Bohrungen ist im Anhang dargestellt. Er veranschaulicht bereits viele verschiedene Situationen, welche bei einer Ultraschalluntersuchung auftreten können. Im Brightness-Mode (B-Mode) arbeitet der Kopf im Reflektionsmodus. Es werden kontinuierlich die Amplituden der A-Diagramme bestimmt und diese zeitlich leicht versetzt als Streifen mit der Amplitude entsprechenden Grau oder Farbwert dargestellt. Wenn der Kopf bei der Aufzeichnung langsam mit konstanter Geschwindigkeit über den Körper bewegt wird, entsteht so ein zweidimensionales Abbild mit dem horizontalen Ort auf der x -Achse und der Eindringtiefe (Reflektionszeit) auf der y -Achse. Benutzen Sie zuerst den 1 Mhz-Kopf und scannen Sie den Körper. Sie können mit den Drehreglern am Echoskop zur laufzeitabhängigen Verstärkung (Time-Gain-Control - TGC) ihre Darstellung optimieren. Zum Beispiel können Sie die mit der Tiefe zunehmende Absorption des Signals kompensieren. Untersuchen Sie mindestens folgende Aspekte qualitativ und belegen Sie Ihre Ergebnisse mit dokumentierten Screenshots: i) Unterschied zwischen mehr oder weniger tiefen Bohrungen, wenn keine TGC-Verstärkung benutzt wird - zunehmende Absorption ; ii) Verdeckung tieferer Reflektionen durch flachere Streuquellen ; iii) Entstehung von Schatten in der doppelten Tiefe aufgrund von Mehrfachreflektionen.

Benutzen Sie danach den 4 MHz Kopf. Zeigen Sie, dass sich nur mit diesem die zwei kleinen, dicht beieinanderliegenden Bohrungen unterscheiden lassen - Auflösungsvermögen.

4d) zu 3d) **Zusatz: Geheimer Testblock**

Es wird Ihnen ein undurchsichtiger PVC-Block gegeben. Versuchen Sie, eine Skizze der inneren Struktur des Blockes anhand von aufgezeichneten B-Bildern zu erstellen. Diese muss nicht maßstabsgerecht sein, wenn doch, so haben Sie vorher sicherlich auch die Schallgeschwindigkeit in Polyvinylchlorid (PVC) ermittelt ☺.

^aWir benutzen nicht die Zeit, wenn das Maximum angenommen wird, weil der Trigger $t = 0$ der Erfassung mit dem Start der Aussendung gesetzt wird.

5 Auswertungen

5a) zu 3a) **Schallgeschwindigkeit in Polyacryl**

Der Schall durchdringt bei der Transmissionsmessung nicht nur den Probenkörper sondern auch Materialien im Sender und Empfänger. Somit sind zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Polyacryl die unterschiedlichen Laufzeiten t_i für unterschiedliche Probenlängen ℓ_i zu bestimmen, mit der zugehörigen Messunsicherheit. Berechnen Sie aus den drei vermessenen Längen mit den zugehörigen Laufzeiten die drei möglichen Paare der Längen- und Zeitdifferenz ($\Delta t_{ij} = t_i - t_j, \Delta \ell_{ij} = \ell_i - \ell_j; i, j = 1, 2, 3$) und die zugehörigen Messunsicherheiten. Ermitteln Sie die zugehörigen Schallgeschwindigkeiten c_{ij} und überprüfen Sie, ob Ihre Werte in dem Intervall ihrer Größtfehlerabschätzung liegen. Gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen $c_{1\text{MHz}}$ und $c_{4\text{MHz}}$?

5b) zu 3b) **Schallgeschwindigkeit in H₂O**

Wesentlich genauer ist die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, wenn viele Weg-/Laufzeitpaare vorliegen. Bestimmen Sie $c_{\text{H}_2\text{O}}$ durch lineare Regression durch Auftragung von Weg über Zeit. Was ist die physikalische Bedeutung des Offsets in der Regression?

5c) zu 3c) **Manuelle Laufzeit-Tomographie**

Hier sind keine quantitativen Auswertungen durchzuführen. Dafür sollte Ihre qualitative Beschreibung der beobachteten Phänomene um so sorgfältiger ausfallen.

6 Literatur

In der Referenz [1] im Kapitel M4 finden Sie Hinweise zu Schallmessungen und in M4.0.2 etwas zu Schallwandlern. In der Staatsexamensarbeit von Frau Wolz [3] sind der Aufbau und die Grundlagen in allen Details beschrieben. Auch sei auf den Versuch 125 des Praktikums in Jena hingewiesen [4].

- [1] W. Schenk und F. Kremer (Hrsg.) *Physikalisches Praktikum*. Springer, 14. Auflage, 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00666-2>.
- [2] D. Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer, 25. Auflage, 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45977-5>.
- [3] S. N. F. Wolz. „Ultraschall - Aufbau eines Demonstrationsexperiments für den Schuleinsatz“. Staatsexamensarbeit (30 Mbyte). 2013. URL: http://hpfr03.physik.uni-freiburg.de/arbeiten/diplomarbeiten/wolz_wissenschaftliche_arbeit_2013.pdf.
- [4] Universität Jena. *125 - Messungen mit Ultraschall*. Hrsg. von Grundpraktikum Physik. 2017. URL: http://www.physik.uni-jena.de/Versuch_125.html.

7 Vorbereitung, Fragen und Berechnungen vor Versuchsantritt

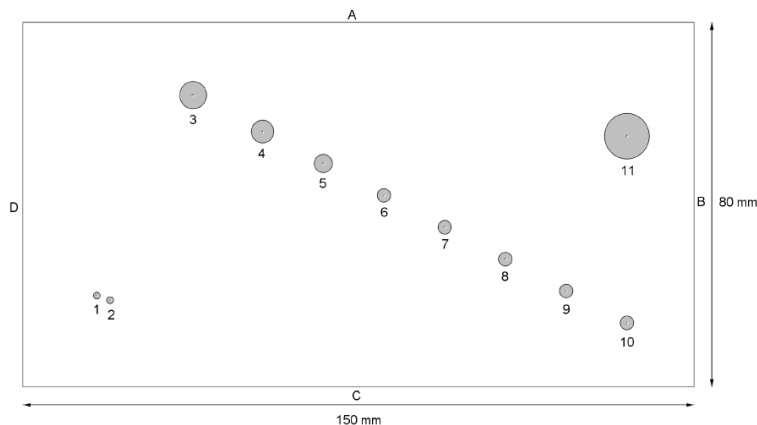
- a) Erklären Sie in knappen Worten/Skizzen die allgemeinen Begriffe von Wellen wie Wellenlänge, Frequenz, Amplitude, Phase, Ausbreitungsgeschwindigkeit und dies speziell für Schallwellen.
- b) Was sind Longitudinalwellen und was Transversalwellen, welche liegen bei Schall vor?
- c) Was sind Gemeinsamkeiten zwischen Licht- und Schallwellen und was sind gravierende Unterschiede?
- d) Wenn man die Zeit in Sekunden zwischen dem Blitz und dem Donner durch 3 teilt, erhält man die Entfernung in Kilometer. Welchen Annahmen und Formeln liegen dieser Regel zu Grunde?
- e) Was ist die Schallgeschwindigkeit in Luft und in Wasser und in Stahl? Welche Wellenlänge haben Schallwellen in Wasser bei $f = 1\text{ MHz}$.
- f) Welcher Druckamplitude in Pascal hat der Schall an der Hörschwelle bei 0 dB_{SPL} (dezi-Bel Sound Pressure Level - Schalldruckpegel) und bei der Schmerzgrenze von $120\text{ dB}_{\text{SPL}}$.
- g) Was ist die Schallkennimpedanz Z_F und wie wird diese berechnet?
- h) Was bedeutet das Wort Tomographie und was ist der Unterschied zur Sonographie?
- i) Was ist der piezoelektrische Effekt? Nennen Sie drei Anwendungen, wo piezoelektrische Kristalle verwendet werden.

Berechnungen vor Versuchsantritt

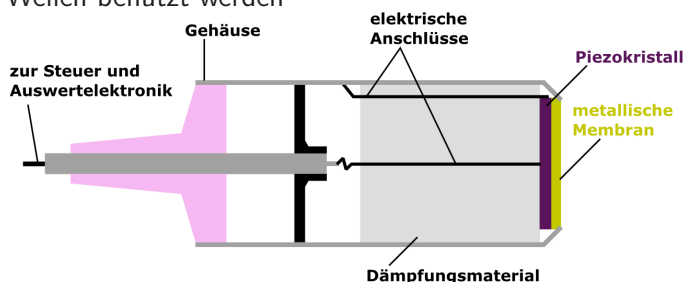
- j) Erdbebenwellen breiten sich mit zirka 7 km/s aus. Wie lange braucht solch eine Welle bis zur gegenüberliegenden Seite der Erde bei Propagation durch den Erdmittelpunkt?
- k) Leiten Sie die Gleichung für den Größtfehler der Schallgeschwindigkeit $u(c)$ bei der Differenz-Methode nach 3a) ab.
- l) Der Schallreflektionsfaktor an der Grenzfläche zwischen zwei Medien gibt das Verhältnis zwischen den Drücken der einfallenden und der reflektierten Welle an. Er wird berechnet aus den Schallimpedanzen nach $r = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)$ mit $Z_i = c_i \rho_i$ aus der jeweiligen Schallgeschwindigkeit und Dichte des Mediums i . Berechnen Sie diesen für die Grenzfläche Wasser-Luft. Können Sie nun erklären, warum man Walgesang nur unter Wasser hören kann und warum bei Ultraschall immer ein Kontaktgel verwendet wird? Selbiges trifft auch für Lichtwellen zu: Beim Übergang von einem Medium zum einem anderen Medium wird um so mehr Reflektiert, je größer der Unterschied in der Ausbreitungsgeschwindigkeit ist, siehe auch die Ableitung für Schall in [3].

8 Zusatzmaterial

- der verwendete Probenkörper aus Acrylglas, Polymethylmethacrylat (PMMA)

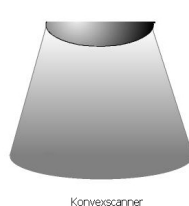
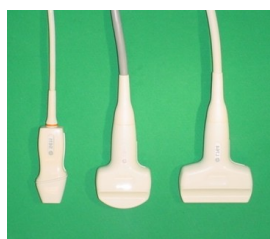


- ein Ultraschallkopf schematisch - der selbe Piezokristall kann zum Senden und zum Empfang der Wellen benutzt werden



- Sonden in der Medizin bestehen of aus vielen Sendern und Empfängern gleichzeitig.

Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ultraschallsonde>



Beachten Sie im Ultraschallbild die zunehmende Absorption mit der Tiefe, insbesondere wenn die Wellen schon an Knochen teilweise reflektiert wurden.