

# US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik

**Ziel:** Es sollen die grundlegenden physikalischen Eigenschaften und Begriffe der Ultraschall-echographie kennengelernt und angewendet werden.

**Stichworte:** Akustische Impedanz, A-Scan, B-Scan, Dämpfung, Durchschallungs Verfahren, piezo-elektrischer Effekt, Puls-Echo Verfahren, Reflexionskoeffizient, Schallgeschwindigkeit, Transmission, Ultraschall

**Motivation:** In der Medizin wird der Ultraschall sowohl in der Therapie als auch zur Diagnose eingesetzt. So sind z.B. biometrische Messungen mit Ultraschall eine wichtige Methode in der Augenheilkunde.

## Theoretische Grundlagen

Menschen hören in einem Frequenzbereich von ca. 16 Hz bis ca. 20 kHz. Der Frequenzbereich oberhalb der Hörschwelle, mit Frequenzen von ca. 20 kHz bis ca 1 GHz, wird *Ultraschall* genannt. Oberhalb von 1 GHz spricht man von Hyperschall und unterhalb der Hörschwelle von Infrashall. Der Bereich der Ultraschalltechnik findet dabei vielfach seine Anwendung in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und in der Medizin.

Schall ist eine longitudinale Welle,

$$p(x, t) = p_0 + v_0 Z \cos(\omega t - k x) \quad (1)$$

die sich aufgrund von Druckschwankungen fortbewegt. Dabei ist  $Z = c \cdot \rho$  die *akustische Impedanz* (oder Schallkennwiderstand), die durch die Dichte  $\rho$  des durchstrahlten Materials und der Schallgeschwindigkeit in diesem Material bestimmt wird. Eine Schallwelle verhält sich ähnlich einer elektromagnetischen Welle (Reflexion, Brechung,...), jedoch ist die Phasengeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit) der Schallwelle aufgrund der Druck- bzw. Dichteänderungen materialabhängig. In Gasen und Flüssigkeiten breitet sich der Schall immer als Longitudinalwelle aus. Die *Schallgeschwindigkeit* hängt z.B. bei einer Flüssigkeit von ihrer Kompressibilität  $\kappa$  und ihrer Dichte  $\rho$  ab.

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}} \quad (2)$$

Bei einem Festkörper ist die Schallausbreitung komplizierter, da infolge Schubspannungen nicht nur Longitudinalwellen sondern auch Transversalwellen möglich sind. Hier ersetzt bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit in einem Festkörper das Elastizitätsmodul  $E$  die Kompressibilität  $\kappa^{-1}$ .

$$c_{Fe} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

Dabei unterscheidet sich die Schallgeschwindigkeit für die Longitudinale- und Transversale Welle im Festkörper. Schallgeschwindigkeiten in Festkörpern sind grundsätzlich Richtungsabhängig.

Bei der Schallausbreitung geht in der Regel ein Teil der Energie durch Absorption verloren. Die Intensität  $I_0$  nimmt exponentiell nach der Strecke  $x$  ab

$$I(x) = I_0 \cdot e^{\alpha x} \quad (4)$$

dabei ist  $\alpha$  der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude. Da Luft den Ultraschall sehr stark absorbiert, verwendet man in der Regel in der Medizin zwischen Schallgeber und zu untersuchendem Material ein Kontaktmittel.

Trifft eine Schallwelle auf eine Grenzfläche so wird ein Teil der Schallwelle reflektiert. Der Reflexionskoeffizient  $R$ , das Verhältnis von reflektierten zu einfallender Schallintensität, setzt sich dabei aus der akustischen Impedanz  $Z = \rho \cdot c$  der beiden angrenzenden Materialien zusammen.

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (5)$$

Der Transmittierte Anteil  $T$  läßt sich aus  $T = 1 - R$  berechnen.

Die Erzeugung von Ultraschall kann auf verschiedene Arten geschehen. Eine Methode ist die Anwendung des reziproken *piezo-elektrischen Effekt*. Bringt man einen piezoelektrischen Kristall in ein elektrisches Wechselfeld, so kann man diesen zu Schwingungen anregen, wenn eine polare Achse des Kristalls in Richtung des elektrischen Feldes zeigt. Der Piezokristall strahlt beim Schwingen *Ultraschallwellen* ab. Stimmt die Anregungsfrequenz mit der Eigenfrequenz des Kristalls überein (Resonanz), können große Schwingungsamplituden erzeugt werden, sodaß extrem hohe Schallenergiedichten genutzt werden können. Der Piezokristall kann auch umgekehrt als Schallempfänger genutzt werden, hierbei treffen die Schallwellen auf den Kristall und regen diesen zu Schwingungen an. Quarze sind dabei die meist benutzten piezoelektrischen Kristalle, da sie gleichbleibende physikalische Eigenschaften haben. Jedoch haben sie einen relativ schwachen piezoelektrischen Effekt.

In der Medizin verwendet man Ultraschall, um Informationen über den durchstrahlten Körper zu erhalten. Hierzu verwendet man häufig Laufzeitmessungen. Das Prinzip besteht darin, daß man einen kurzzeitigen Schallimpuls aussendet und dessen Laufzeit nach einer definierten Meßstrecke mit einem Empfänger mißt. Es werden zwei Verfahren in der Ultraschalltechnik angewendet, das Durchschallungs-Verfahren und das Impuls-Echo-Verfahren.

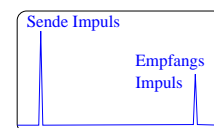
Beim *Durchschallungs-Verfahren* wird mit einem Ultraschallsender ein kurzzeitiger Schallimpuls ausgesendet und am anderen Ende des Probenstücks mit einem Ultraschallempfänger aufgefangen. Befindet sich eine Fehlstelle in der durchstrahlten Probe, so wird eine abgeschwächte Intensität am Ultraschallempfänger gemessen. Eine Aussage darüber, wo sich die Fehlstelle in der Probe befindet, ist nicht möglich.

Beim *Impuls-Echo-Verfahren* wird der Ultraschallsender auch als Empfänger verwendet. Der ausgesendete Ultraschallpuls wird hierbei an einer Grenzfläche reflektiert und nach seiner Rückkehr von der Empfänger aufgenommen. Bei Fehlstellen kann die Höhe des Echos Aufschluß über die Größe der Fehlstelle geben. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit kann aus der Laufzeit  $t$  die Lage der Fehlstelle über

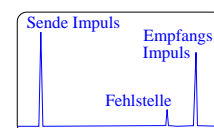
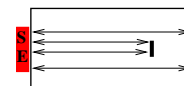
$$s = \frac{1}{2} c t \quad (6)$$

bestimmt werden.

**Durchschallungs-Verfahren**



**Impuls-Echo-Verfahren**



In der Medizin werden verschiedene Darstellungsarten für die Laufzeitdiagramme verwendet.

- Der *A-Scan* (Amplituden Scan) ist ein eindimensionales Verfahren und wird zur Abtastung von Strukturen eingesetzt. Bei dieser Darstellung werden die Echoamplituden als Funktion der Laufzeit dargestellt.
- Mit dem *B-Scan* (Brightness Scan) kann durch Bewegen der Sonde ein zweidimensionales Bild aufgenommen werden. Die Echoamplituden werden in Helligkeitsabstufungen dargestellt, sodaß man ein zweidimensionales Schnittbild erhält.
- Der *TM-Scan* (Time-Motion Scan) kann durch eine schnelle Abtastung eine zeitliche Bildfolge aufnehmen, sodaß z.B. die Bewegung eines Organes sichtbar gemacht werden kann.

## Vorbereitung

- Informieren Sie sich in der Literatur über die Schallgeschwindigkeit  $c$  und die *akustische Impedanz* in Luft, destiliertem Wasser, Blut, Knochen und Acryl.

## Aufgaben

- Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels Impuls-Echo-Verfahren und mittels Durchschallungs-Verfahren.
- Ein Acrylblock mit definierten Fehlstellen unterschiedlicher Größe und Tiefe soll mit dem Impuls-Echo Verfahren untersucht werden (A-Scan und B-Scan).
- Es soll an einem Augenmodell mit einem A-Scan die Abmessungen des Auges bestimmt werden.

## Versuchsaufbau

Der Experimentelle Aufbau besteht im wesentlichen aus einem Ultraschallechoskop, Ultraschallsonden verschiedener Frequenzen und einem Rechner für die Datenaufnahme und Datenanalyse. Das Echoskop kann nur im Impuls-Betrieb betrieben werden. Mit dem Kippschalter REFLEC./TRANS. kann der Einsatz von einer Ultraschallsonde (Impuls-Echo Verfahren) oder zwei gleichen Ultraschallsonden (Durchschallungs-Verfahren) gewählt werden. Die Sende- bzw. Empfangsleistung der Sonden können in einem Bereich von 0...30 dB bzw. 0...35 dB eingestellt werden. Es stehen für den Versuch Ultraschallsonden mit 1 MHz (blau), 2 MHz (rot) und 4 MHz (grün) zur Verfügung. Die Frequenz der angeschlossenen Sonde wird vom Echoskop automatisch erkannt.



**Die Ultraschallsonden sind empfindlich, deshalb  
vorsichtig behandeln!!!**



Die vom Echoskop gemessenen Daten werden mit einem Rechner erfaßt und mit dem Programm **AScan** angezeigt und ausgewertet werden. Die Meßsoftware ist sofort nach dem Starten des Programms aktiv.

## Versuchsdurchführung

### Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Impuls-Echo-Verfahren

- Bestimmen Sie die Abmessungen der Acrylzyylinder mit einer Schieblehre.
- Stellen Sie Einen der Acrylzyylinder auf ein Papiertuch<sup>1</sup> und koppeln Sie von oben eine 2 MHz-Sonde (rot) mit Koppelgel an.
- Bestimmen Sie mit einem A-Scan die Laufzeit eines Echos und bestimmen Sie hieraus die Schallgeschwindigkeit.
- Wiederholen Sie die Messung mit den anderen Acrylzyindern.
- Messen Sie die Schallgeschwindigkeit bei allen drei Acrylzyindern mit der 1 MHz- oder 4 MHz Ultraschallsonde. Verfahren Sie wie bei den vorherigen Messungen mit der 2 MHz Sonde.
- Aufgrund der Anpassungsschicht der Sonden weisen die berechneten Schallgeschwindigkeiten einen systematischen Fehler auf. Aus diesem Grund mißt man alle Zylinder mit zwei Sonden unterschiedlicher Frequenz und somit auch unterschiedlicher Anpassungsschicht. Aus der Differenz der Laufzeitstrecken  $\Delta s = s_1 - s_2$  erhält man die Schallgeschwindigkeit im Acryl ohne Laufzeitfehler. Berechnen Sie  $\Delta s$  für alle drei Zylinder.
- Berechnen Sie für alle Zylinder die Laufzeitgeschwindigkeit ohne Laufzeitfehler und vergleichen Sie das Ergebnis mit der Literatur.

### Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren

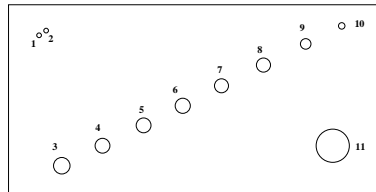
- Bestimmen Sie die Abmessungen der Acrylzyylinder mit einer Schieblehre.
- Legen Sie einen der Acrylzyylinder horizontal in die schwarze Halterungen und koppeln Sie an beiden Stirnseiten eine 2 MHz-Sonde (rot) mit Koppelgel an.
- Bestimmen Sie mit einem A-Scan die Laufzeit, die der Schallimpuls zum Durchlaufen des Zylinders benötigt und berechnen Sie hieraus die Schallgeschwindigkeit. Probieren Sie verschiedene Einstellungen aus und protokollieren Sie diese.
- Wiederholen Sie die Messung mit den anderen Acrylzyindern.

---

<sup>1</sup>Das Papiertuch beeinflußt die Messung nicht, vermeidet aber Kratzer auf dem Probenstück.

## Untersuchung eines Acrylblocks auf Bohrungen

- Bestimmen Sie die Abmessungen des Acrylblocks mit einer Schieblehre.
- Bestimmen Sie die Lage der Bohrungen mit dem Impuls-Echo-Verfahren. Stellen Sie hierzu den Acrylblock auf ein weiches Papiertaschentuch und koppeln Sie eine 1 MHz Sonde von oben auf den zu untersuchenden Block. Verwenden Sie Wasser als Koppelmedium.
- Messen Sie die Schalllaufzeiten (A-Scan) an verschiedenen Stellen, um aus den Zeiten die Tiefe der Störstellen zu bestimmen. Verwenden Sie die in den vorherigen Versuchen ermittelten Schallgeschwindigkeiten.
- Drehen Sie den Acrylblock um und wiederholen Sie die Messungen. Auf diese Weise können Sie die Größe der Störstellen bestimmen.
- Verwenden Sie gegebenenfalls auch Ultraschallsonden unterschiedlicher Frequenz, da die Tiefenauflösung frequenzabhängig ist.
- Berücksichtigen Sie bei Ihrer Auswertung die Laufzeitkorrektur aufgrund der Schutzschicht auf den Sonden.
- Führen Sie an dem Acrylblock einen B-Scan durch und ermitteln Sie aus dem Bild die Abmessungen der Störstellen.

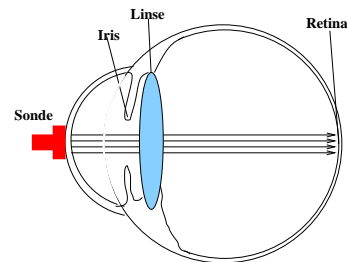


**Nach der Messung das Koppelmedium mit weichen Papiertaschentüchern von der Probe und den Sonden wischen!!!**



## Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

Anhand eines Augenmodells sollen die Abstände im Auge bestimmt werden. In der Abbildung unten ist eine Skizze des Augenmodells zu sehen (Maßstab 1:3). Bestimmen Sie die Abmessungen mit dem Impuls-Echo Verfahren. Verwenden Sie die 2 MHz-Sonde (rot), die Sie mit etwas Koppelgel vorsichtig !!! auf die Mitte der Hornhaut setzen. Verändern Sie unter LEICHTEM Druck den Einschallwinkel, bis Sie ein Echo an der Rückwand der Retina sehen. Drücken Sie nicht zu stark mit der Ultraschallsonde auf die Hornhaut, sie ist aus einem empfindlichen Material gefertigt, das sich leicht deformieren läßt. Bei zu starkem Druck können sich Risse im Material bilden und das Augenmodell zerstören. Nehmen Sie mit einem A-Scan die Echos an den Grenzflächen der Iris und der Retina auf und bestimmen Sie aus den Laufzeiten die Abmessungen des Auges. Berücksichtigen Sie bei der Berechnung



der Augenabstände, daß die Schallgeschwindigkeit in der Linse  $c_L = 2500 \text{ m/s}$  und in der Glaskörperflüssigkeit  $c_{GK} = 1410 \text{ m/s}$  unterschiedlich ist.



**Reinigen Sie die Hornhaut ausschließlich mit einem angefeuchteten, weichen Tuch!! Verwenden Sie kein Reinigungsmittel oder heißes Wasser!!!**



## Literatur

- [1] G. Sorge *Faszination Ultraschall*, Teubner 2002
- [2] Geschke *Physikalisches Praktikum* Teubner