

US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik

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

Stichworte: Akustische Impedanz, Auflösungsvermögen, A-Scan, B-Scan, Cepstrum, Dämpfung, Durchschallungs Verfahren, Fast-Fourier-Transformation, piezo-elektrischer Effekt, Puls-Echo Verfahren, Reflexionskoeffizient, Schallgeschwindigkeit, Transmission, Ultraschall

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 Infraschall. 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 ρ 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 κ und ihrer Dichte ρ 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 κ^{-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 α 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 Schallenergiegedichten 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.

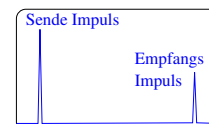
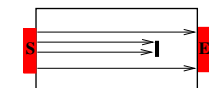
In der Medizin verwendet man Ultraschall, um Informationen über den durchstrahlten Körper zu erhalten. Hierzu verwendet man häufig Laufzeitmessungen. Das Prinzip besteht darin, daß man einen kurzzeitigen Schallimpuls aussendet und dessen Laufzeit nach einer definierten Meßstrecke mit einem Empfänger 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

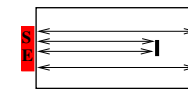
$$s = \frac{1}{2} c t \quad (6)$$

bestimmt werden. Die Laufzeitdiagramme können in einem *A-Scan*, *B-Scan* oder einem *TM-Scan* dargestellt werden.[1]

Durchschallungs-Verfahren



Impuls-Echo-Verfahren



Vorbereitung

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

- Berechnen Sie die Wellenlänge und die Periode einer 2 MHz Schwingung in Acryl.

Aufgaben

- Machen Sie sich mit den Geräten und den Programmeinstellungen vertraut.
- Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels Impuls-Echo-Verfahren und mittels Durchschallungs-Verfahren.
- Bestimmen Sie den materialspezifischen Schwächungskoeffizient von Acryl mittels des Impuls-Echo-Verfahrens.
- Es sollen die Dicken zweier Acrylplatten mit dem Impuls-Echo-Verfahren, aus der FFT und aus dem Cepstrum bestimmt werden.
- Vermessen Sie das Augenmodell.

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 Drehknopf kann der Einsatz von einer Ultraschallsonde im Impuls-Echo Verfahren (1/1 oder 2/2) oder von zwei gleichen Ultraschallsonden im Durchschallungs-Verfahren (1/2 oder 2/1) 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 zwei Ultraschallsonden mit 2 MHz (rot) zur Verfügung. Als Kontaktmittel wird bidestilliertes Wasser verwendet.

Die Ultraschallsonden sind empfindlich, deshalb vorsichtig behandeln!!!

Die vom Echoskop gemessenen Daten werden mit einem Rechner erfaßt und mit dem Programm **EchoView** angezeigt und ausgewertet. Die Meßsoftware ist sofort nach dem Starten des Programms aktiv. Der Bildschirm ist in 3 Bereiche gegliedert. Im oberen Bereich befindet sich eine Leiste zur Wahl der Scan-Art; der Knopf zum Abspeichern bzw zur Verarbeitung der gemessenen Signale (z.B. FFT) befinden sich auch in der obersten Leiste.

Bei der Wahl des **A-Mode** erscheinen zwei Bildschirmbereiche. Im oberen Fenster kann das A-Bild-Signal als Funktion der Zeit (Menüpunkt **Time**) oder als Funktion der Eindringtiefe (Menüpunkt **Depth**) dargestellt werden. Für die Berechnung der Eindringtiefe des Ultraschallpulses muß die Schallgeschwindigkeit (Menüpunkt **Params/ Sound Velocity [m/s]**) als Zahlenwert eingegeben werden. Die ständige Aktualisierung des aufgenommenen A-Scan-Bildes kann mit der **Freeze**-Taste gestoppt und mit der **Start**-Taste wieder aktiviert werden. Für die Bestimmung von Laufzeitdifferenzen und zur Bestimmung der Pulsamplituden stehen Cursor zur Verfügung.

Im unteren Fenster wird die laufzeit- bzw. tiefenabhängige Verstärkung (*Time Gain Control*) angezeigt, um Intensitätsschwächungen auszugleichen. Die Verstärkungsparameter *Threshold*, *Wide*, *Slope* und *Start* können am Echoskop eingestellt werden.

Unter **Diagram Selection** können zwei weiteres Fenster geöffnet werden, das eine zeigt das Frequenzspektrum und das zweite das zugehörige Cepstrum. Für die Berechnung der Spektren werden nur die Daten verwendet, die sich zwischen den beiden cursern befindet.

Die gemessenen Daten können im Ascii-Format mit dem Menüpunkt *Export* abgespeichert werden. Beim Menüpunkt *print* kann ein Bild des Bildschirms oder die Daten in ein pdf-File geschrieben werden.

Versuchsdurchführung

Programm und Geräteeinstellungen

- Legen Sie eine der Acrylplatten auf ein Papiertuch¹ und koppeln Sie von oben eine 2 MHz-Sonde (rot) mit bidestiliertem Wasser an.
- Mit dem Puls-Echo-Verfahren soll ein A-Scan durchgeführt werden. Stellen Sie die Verstärkung (TGC) am Echoskop so ein, dass mindestens vier Reflexe gut zu sehen sind. Bestimmen Sie für alle Reflexe die Laufzeiten und Amplituden. Exportieren Sie die Graphiken.
- Messen Sie mit der Schieblehre die Dicke der Acrylplatte. Berechnen aus den gemessenen Daten die Schallgeschwindigkeit für Acryl.
- Im Programm kann zwischen *AM*, *HF* und *AM + HF* gewählt werden. Welche unterschiedlichen Größen werden bei diesen Einstellungen angezeigt. Identifizieren Sie die 2 MHz Schwingung und messen Sie für mindestens 5 Schwingungen die Periode aus. Berechnen Sie aus der Periode die gemittelte Wellenlänge und gemittelte Frequenz und vergleichen das Ergebnis mit der Theorie.
- Bemaßen Sie im Protokoll die exportierte Graphik. Zeichnen Sie in die Graphik, bei welchen Zeiten Sie die Pulse ausgemessen haben und an welchen Stellen Sie die Amplitude vermessen haben.
- Tragen Sie berechnete Schallgeschwindigkeit in das Meßprogramm ein und bestimmen Sie aus der Tiefenmessung die Dicke der Acrylplatte. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der vorher bestimmten Dicke.

Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

- Bestimmen Sie die Abmessungen aller Acrylzyylinder mit einer Schieblehre.
- Stellen Sie einen der Acrylzyylinder auf ein Papiertuch und koppeln Sie von oben eine 2 MHz-Sonde (rot) mit bidestiliertem Wasser an.
- Bestimmen Sie mit einem A-Scan die Laufzeit des Echos.
- Wiederholen Sie die Messung mit den anderen Acrylzyindern. Führen Sie die Messung für mindestens 7 weitere Längen durch. Hinweis: Die einzelnen Zylinder können auch aufeinandergestellt werden. Dabei müssen die einzelnen Zylinder mit bidestiliertem Wasser gekoppelt werden.

¹Das Papiertuch beeinflusst die Messung nicht, vermeidet aber Kratzer auf dem Probenstück.

- Aufgrund der Anpassungsschicht der Sonden weisen die berechneten Schallgeschwindigkeiten eine systematische Messunsicherheit auf. Bestimmen Sie mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung die Laufzeit geschwindigkeit und die Dicke der Anpassungsschicht. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Literatur.

Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren

- Legen Sie einen der Acrylzyylinder horizontal in die schwarze Halterungen und koppeln Sie an beiden Stirnseiten eine Sonde 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.
- Wiederholen Sie die Messung mit den anderen Acrylzyindern.
- Vergleichen Sie die Ergebnisse aus dem Impuls-Echo-Verfahren mit den Ergebnissen des Durchschallungsverfahrens.

Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

- Stellen Sie einen der Acrylzyylinder auf ein Papiertuch und koppeln Sie von oben eine 2 MHz-Sonde (rot) mit bidestiliertem Wasser an.
- Messen Sie die Amplituden des ausgesendeten und des reflektierten Pulses (Achtung!! Auf evtl. eingestellte Verstärkungen achten und gegebenenfalls einkorrigieren).
- Wiederholen Sie die Messung für 6 weitere Zylinder. Hinweis: Die einzelnen Zylinder können auch aufeinandergestellt werden. Dabei müssen die einzelnen Zylinder mit bidestiliertem Wasser gekoppelt werden.
- Berechnen Sie aus ihren Daten die Dämpfung.

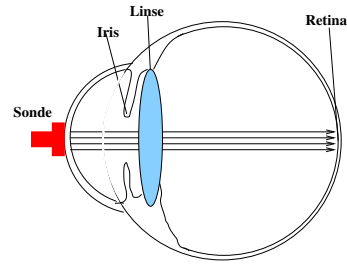
Spektrale Analyse und Cepstrum

- Nehmen Sie mit Hilfe zweier Acrylscheiben und einem ca 40*mm langen Zylinder Mehrfachimpulse im Impuls-Echo Verfahren auf. Legen Sie hierzu zwei verschieden dicke Acrylscheiben aufeinander. Stellen Sie den Acrylzyylinder auf die beiden Scheiben. Verwenden Sie bidestiliertes Wasser um die Acrylelemente zu koppeln. Der Acrylzyylinder dient als Vorlaufstrecke, sodaß die Mehrfachechos besser von dem Initialecho getrennt werden können. Koppeln Sie die 2-MHz-Sonde mit bidestiliertem Wasser an den Zylinder an.
- Nehmen Sie eine Mehrfachreflexion auf. Stellen Sie die Verstärkung so ein, daß möglichst 3 Mehrfachreflexionen zu sehen sind.
- Setzen Sie die Marker so, daß Sie mit Hilfe der FFT-Funktion ein Spektrum und das Cepstrum der Sonde erhalten. Interpretieren Sie das Ergebnis.

- Analysieren Sie mit der FFT und dem Cepstrum die Mehrfachechos. Bestimmen Sie aus dem Spektrum die Laufzeit der Reflexe und berechnen Sie mit Hilfe der vorher bestimmten Schallgeschwindigkeit die Dicke der Platten.

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 Ein-schallwinkel, 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 empfindlichem 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.



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