

US2 "Grundlagen der Ultraschalltechnik"

Robert Konradi
robert.konradi@tu-dortmund.de

Lauritz Klünder
lauritz.kluender@tu-dortmund.de

Durchführung: 15.05.2018, Abgabe: 22.05.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
4 Auswertung	4
4.1 Vorbereitung	4
4.2 Bestimmung der Dämpfung	6
4.3 Schallgeschwindigkeit Impuls-Echo-Verfahren	8
4.4 Schallgeschwindigkeit Durchschallungs-Verfahren	9
4.5 Spektrale Analyse und Cepstrum	9
4.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	10
5 Diskussion	11
Literatur	11

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Grundlagen der Ultraschallechographie in ihren Anwendungsbereichen kennengelernt werden.

2 Theorie

Als Ultraschall bezeichnet man den Frequenzbereich von 20 kHz bis ca. 1 GHz. Zum Vergleich hören Menschen ein Frequenzbereich von 16 Hz bis ca. 20 kHz. Um diese longitudinalen Wellen, in seinen Anwendungen, wie in der Werkstoffprüfung und in der Medizin, beschreiben zu können wird diese Formel

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

verwendet. Dabei ist $Z = c \cdot \rho$ die akustische Impedanz und ρ ist die Dichte des durchstrahlten Materials. Da Ultraschall sich aufgrund von Druckschankungen fortbewegt, ist ihre Geschwindigkeit materialabhängig. Die Schallgeschwindigkeit in einer Flüssigkeit ist von ihrer Kompressibilität κ und der Dichte ρ abhängig.

$$c_{\text{flüssig}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}}$$

Bei Schallausbreitung in Festkörpern sind auch Transversalwellen möglich, da sie Richtungsabhängig sind. Hierbei ist die Kompressibilität κ antiproportional zum Elastizitätsmodul E des Festkörpers.

$$c_{\text{fest}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Die Intensität einer Schallwelle nimmt exponentiell ab.

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

Dabei ist α der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude. Da Luft ein sehr hohen Absorptionskoeffizient hat wird in der Medizin ein Kontaktmittel zwischen Sonde und dem untersuchendem Material verwendet. Wie bei elektromagnetische Wellen haben sie die Eigenschaft zu reflektieren. Dabei setzt sich der Reflexionskoeffizient R , das Verhältnis von reflektierten zu einfallender Schallintensität zusammen.

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

Der Anteil der transmittierten Wellen lässt sich aus $T = 1 - R$ berechnen. Um Ultraschallwellen zu erzeugen nutzt man den piezo-elektrischen Effekt aus. Dabei werden die piezoelektrische Kristall in ein elektrisches Wechselfeld gebracht. Durch die Richtung des elektrischen Feldes werden die polaren Achsen des Kristalls zu Schwingung angeregt und senden dabei Ultraschallwellen aus. In der Medizin werden zwei Messmethoden

angewendet. Zum einen das Durchschallungs-Verfahren. Wie der Name schon sagt werden die Probestücke durchschallt. Dabei sendet der Sender ein kurzzeitigen Schallimpuls aus und am andere Ende wird dies durch ein Empfänger aufgefangen. Bei einer Fehlstelle wird die Intensität abgeschwächte am Empfänger gemessen. Die andere Messmethode ist das Impuls-Echo-Verfahren. Dabei ist der Sender gleichzeitig der Empfänger. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit lässt sich die zurückgelegte Strecke des Ultraschalls mit folgender Formel bestimmen:

$$s = \frac{1}{2}ct. \quad (2)$$

Bei einer Fehlstelle wird der reflektierte Schall eher am Empfänger angekommen. Die Laufzeitdiagramme können in einen A- oder B-Scan dargestellt werden.

3 Durchführung

Der experimentelle Aufbau besteht aus einem Ultraschallechoskop, Ultraschallsonde und einen Rechner für die Messaufnahmen. Die Sende- sowie Empfangsleistung der Sonde liegen im Bereich von 30 – 35 db. Für die Datenaufnahme wird der A-Scan verwendet. Um eine klare Pulsendarstellung am Rechner zu ermöglichen wird zwischen dem Körper und der Sonde bidestiliertes Wasser aufgetragen. Zunächst wird mit Hilfe des Puls-Echo-Verfahrens die Laufzeit zwischen zwei Impulsen eines Acrylzyinders bestimmt und aus den gemessenen Daten wird die Schallgeschwindigkeit in Acryl berechnet, siehe Formel (2). Anschließend wird mit einer Schieblehre die Länge des Acrylzyinders bestimmt. Um den Absorptionskoeffizient zu bestimmen werden an 6 Acrylzyinders, unterschiedlicher Höhe, die Amplituden des ausgesendeten und des reflektierten Pulses aufgenommen. Zur Schallgeschwindigkeitsbestimmung von Acryl werden wieder an 6 Acrylzyinders mit zwei unterschiedlichen Messmethoden, einmal Implus-Echo-Verfahren sowie Durchschallungs-Verfahren, die Laufzeiten aufgenommen.

Zur Spektralen Analyse werden zwei Acrylscheiben mit bidestiliertes Wasser gekoppelt und anschließend unterhalb eines Acrylzyinders gestellt. Der Zylinder dient als Vorlaufstrecke um ein Mehrfachecho besser von dem Initialecho trennen zu können. Bei dieser Aufnahme wird versucht möglichst 3 Mehrfachreflexionen dargestellt zu können um anschließend am Rechner ein Spektrum sowie Cepstrum zu erhalten. Mit diesem Sprechtrum kann nun die Dicke der beiden Scheiben bestimmt werden. Zur letzten Messaufnahme wird das Implus-Echo-Verfahren auf ein Augenmodell untersucht. Es muss beachtet werden, dass die Schallgeschwindigkeit in der Linse $c_L = 2500 \text{ m/s}$ anders ist als die Geschwindigkeit im Glaskörper $c_{GK} = 1410 \text{ m/s}$ ist.

4 Auswertung

4.1 Vorbereitung

Zur Vorbereitung für diesen Versuch wird die Schallgeschwindigkeit c und die akustische Impedanz Z von einigen Materialien bestimmt. Sie sind in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1: Literaturwerte für Schallgeschwindigkeiten und akustischen Impedanzen [3]
[1].

	$c / \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$Z / \frac{\text{kg s}}{\text{m}^4}$
Luft 0 °C	331	$427 \cdot 10^3$
dest. Wasser 20 °C	1485	$1483 \cdot 10^3$
Blut	1560	$1,6 \cdot 10^6$
Acryl	2730	$3,22 \cdot 10^6$

Als erstes wird von einem Acrylzylinder, mit dem Puls-Echo-Verfahren, die Schallgeschwindigkeit bestimmt. Dazu ist die Höhe des Zylinders, mit den zugehörigen Messergebnissen in Tabelle 2 abgebildet. Für die Schallgeschwindigkeit wird die Formel 2 verwendet.

Tabelle 2: Abmessungen und Messergebnisse des ersten Acrylzylinders.

L / cm	Puls 1		Puls 2		$\Delta t / \text{s}$	$c / \frac{\text{m}}{\text{s}}$
	U / V	t / s	U / V	t / s		
3,935	1	30,1	0,118	59	28,9	2723,18

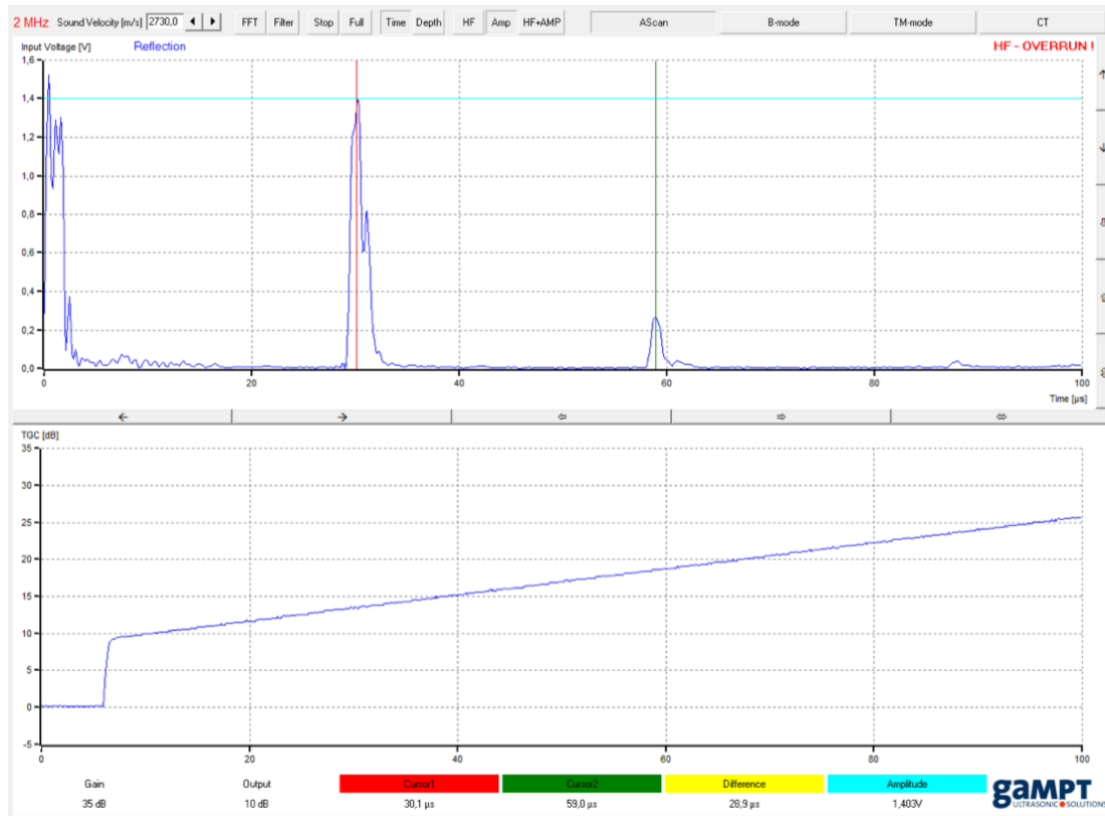


Abbildung 1: Darstellung des Messprogramms für den ersten Zylinder.

In der Abbildung 1 ist das Messprogramm dargestellt. Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in dem Acrylzylinder werden die Pulse verwendet, die durch den roten und blauen Cursor markiert sind. Die Amplituden werden auch an diesen Stellen bestimmt. Nun wird die bestimmte Schallgeschwindigkeit von $c = 2723,18 \text{ m/s}$ in das Messprogramm eingetragen und es wird eine Tiefenmessung durchgeführt. Diese ergibt:

$$L = 3,92 \text{ cm.}$$

Das ist eine Abweichung von 0,38%.

4.2 Bestimmung der Dämpfung

Nun wird die Dämpfung bestimmt. Die Messwerte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Messwerte der Amplituden von verschiedenen Acrylzylindern.

1. Amplitude / V	2. Amplitude / V	Länge / cm
1,538	1,040	8,020
1,538	0,418	10,250
1,538	1,150	6,130
1,538	0,338	12,025
1,538	1,361	3,100
1,538	1,346	3,935

Dazu wird die Gleichung 1 umgeformt zu:

$$\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = -\alpha x.$$

Nun lässt sich mit dieser Formel eine lineare Ausgleichsrechnung durchführen. In Abbildung 2 sind die Messerte und die Ausgleichsrechnung gezeigt.

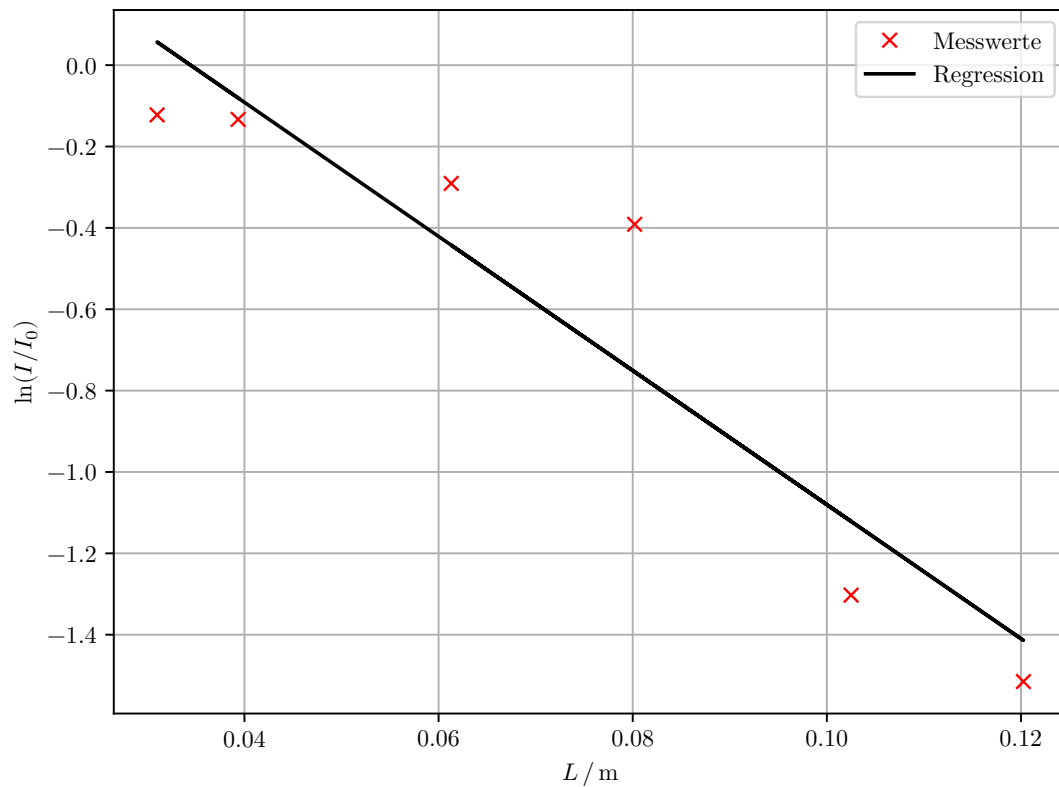


Abbildung 2: Messwerte und lineare Ausgleichsrechnung der Dämpfung.

Die Ausgleichsrechnung wird mit Python 3.6 durchgeführt. Es ergibt sich für die Parameter der Geraden:

- $\alpha = (16,48 \pm 3,07)/\text{m}$
- $b = 0,57 \pm 0,24$

Dabei ist b der Achsenabschnitt.

4.3 Schallgeschwindigkeit Impuls-Echo-Verfahren

In diesen Abschnitt wird die Schallgeschwindigkeit von verschiedenen Acrylzyclindern bestimmt. Dabei werden zunächst die Zylinder vermessen und daraufhin wird die Laufzeit gemessen. Mit der Gleichung 2 kann aus den Werten die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Messwerte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Darstellung der Laufzeiten und Schallgeschwindigkeiten verschiedener Acryl-zyclinder.

L / cm	$\Delta t / \text{s}$	$c / \frac{\text{m}}{\text{s}}$
3,100	23,0	2695,65
3,935	28,9	2723,18
6,130	45,5	2694,51
8,020	59,2	2709,46
10,250	75,9	2700,92
11,955	87,9	2720,14
12,025	88,3	2723,67

Aus den Schallgeschindigkeiten wird nun mit den folgenden Formeln der Mittelwert und die Standartabweichung bestimmt:

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i \quad (3)$$

$$\Delta \bar{c} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{1-N} \sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c})^2} \quad (4)$$

Damit ergibt sich die Schallgeschwindigkeit von Acryl zu:

$$\bar{c}_e = (2709,65 \pm 4,86) \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

4.4 Schallgeschwindigkeit Durchschallungs-Verfahren

Als nächstes wird mit dem Durchschallungs-Verfahren die Schallgeschwindigkeit der Acrylzylinder bestimmt. Dabei wird wieder mit der Gleichung 2 die Schallgeschwindigkeit bestimmt, es ist diesmal nur nicht nötig die Laufzeit zu halbieren, da die der Ultraschall den Zylinder nur einmal durchläuft. Die Messwerte sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Laufzeiten und Schallgeschwindigkeiten bei dem Durchschallungs-Verfahren.

L / cm	$\Delta t / s$	$c / m/s$
3,100	11,55	2683,98
3,935	14,85	2649,83
6,130	22,75	2694,51
8,020	29,50	2718,64
10,250	38,80	2641,75
12,025	45,00	2672,22

Es wird wieder der Mittelwert und die Standardabweichung mit den Gleichungen 3 und 4 bestimmt. Damit ergibt sich die Schallgeschwindigkeit zu:

$$\overline{c_d} = (2676,82 \pm 11,68) \frac{m}{s}.$$

Damit ergibt sich eine Abweichung von 1.21% zu dem Impuls-Echo-Verfahren. Diese Abweichung liegt im Toleranzbereich.

4.5 Spektrale Analyse und Cepstrum

In diesem Teil wird ein Spektrum von Mehrfachreflexionen aufgenommen. Das aufgenommene Spektrum mit dem zugehörigen Cepstrum sind in Abbildung 3 dargestellt.

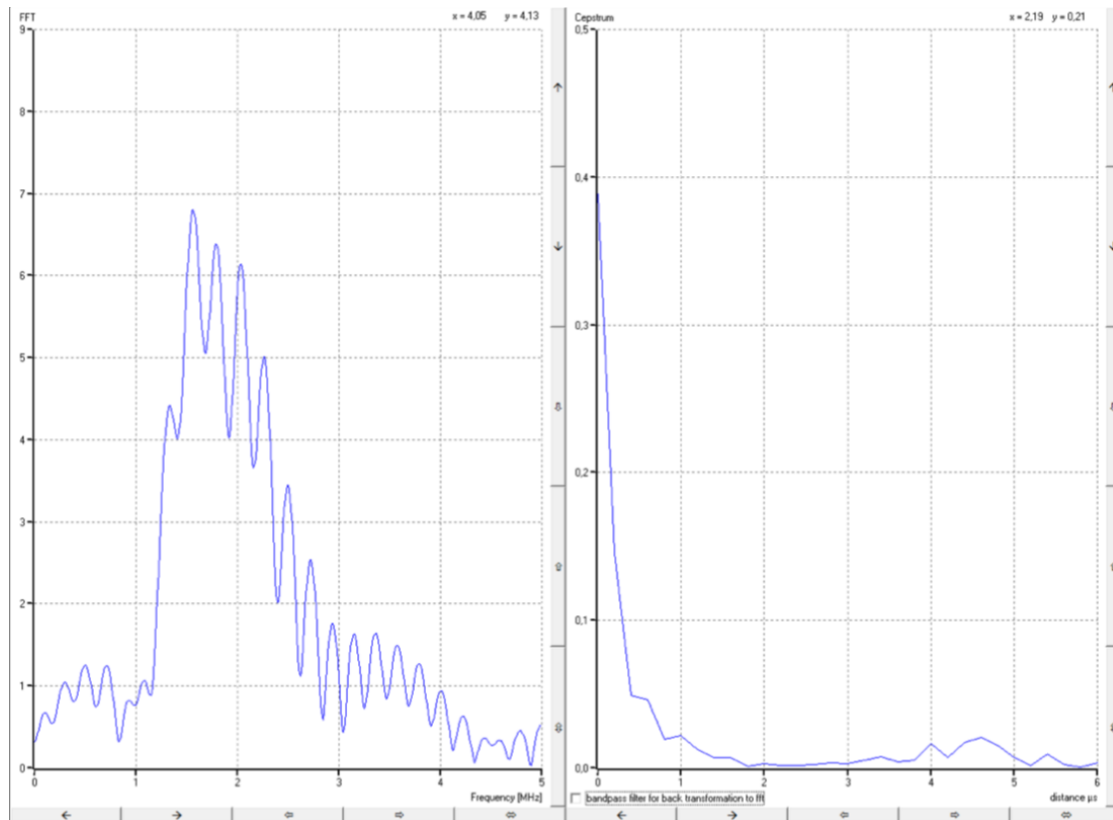


Abbildung 3: Darstellung eines Spektrums (links) und eines Cepstrums (rechts) von Mehrfachechos.

Bei dem FFT und dem Cepstrum wird deutlich, dass sich dem Signal der Sonde die Mehrfachechos überlagern. Aus dem Cepstrum können die doppelten Laufzeiten der Platten abgelesen werden. Diese entsprechen den Peaks in dem Diagramm. Die doppelten Laufzeiten sind damit:

- 1. Platte: $t_1 = 4 \text{ s}$
- 2. Platte: $t_2 = 4,6 \text{ s}$

Mit einer Schallgeschwindigkeit in Acryl von $c = 2730 \text{ m/s}$ ergibt sich eine Dicke von:

- 1. Platte: $s_1 = 5,46 \text{ mm}$
- 2. Platte: $s_2 = 6,28 \text{ mm}$

4.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

Zuletzt werden die Biometrischen Abmessungen eines Augenmodells bestimmt. Dabei lässt sich das Auge in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten einteilen [2]:

- Linse: $c_L = 2500 \text{ m/s}$
- Glaskörper: $c_{GK} = 1410 \text{ m/s}$

Nun wird wieder mit dem Impuls-Echo-Verfahren die Laufzeit bestimmt.

- Linse: $\Delta t_L = 15,5 \text{ s}$
- Glaskörper: $\Delta t_{GK} = 56,6 \text{ s}$

Mit der Gleichung 2 können nun die Abmessungen bestimmt werden:

- Linse: $s_L = 19,58 \text{ mm}$
- Glaskörper: $s_{GK} = 39,90 \text{ mm}$

5 Diskussion

Bei dem ersten Aufgabenteil, der Vorbereitung, ist die Abweichung zwischen der gemessenen Länge und der mit dem Ultraschall bestimmten Länge des Zylinders $0,38\%$. Diese Abweichung liegt im Toleranzbereich.

Bei dem Impuls-Echo-Verfahren ist die bestimmte Schallgeschwindigkeit $c_e = (2709,65 \pm 4,86) \text{ m/s}$.

Mit dem Theoriewert von $c = 2730 \text{ m/s}$ ergibt sich eine Abweichung von $0,75\%$ was auch im Toleranzbereich liegt.

Die mit dem Durchschallungs-Verfahren bestimmte Schallgeschwindigkeit ist $c_d = (2676,82 \pm 11,68) \text{ m/s}$. Dabei ist die Abweichung $1,95\%$.

Auch die Abweichung der beiden Verfahren, die bei $1,21\%$ liegt, ist im Toleranzbereich. Alles in allem liegen alle Messergebnisse im Toleranzbereich, was auf eine gute Messung mit wenig systematischen Fehlern schließen lässt.

Literatur

- [1] Prof. Dr. Heinrich Dirks. *Sonographie*. URL: <http://www.fbmh-h-da.de/~dirks/uploads/Main/Sonographie.pdf> (besucht am 18.05.2018).
- [2] TU Dortmund. *Anleitung zu US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. 2018.
- [3] Quanteronic. *Dichte, Schallgeschwindigkeit transversal und longitudinal, akust.Impedanz*. URL: <http://www.flowanalytic.com/schall.pdf> (besucht am 18.05.2018).