

US1

Grundlagen der Ultraschalluntersuchung

David Rolf

david.rolf@tu-dortmund.de

Jonah Blank

jonah.blank@tu-dortmund.de

Durchführung: 24.04.2018

Abgabe: 08.05.2018

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Ausbreitung von Schall im Medium	3
2.2 Reflexion, Transmission und Absorption von Schall	3
2.3 Erzeugung von Ultraschall und Anwendung	4
3 Aufbau	4
4 Durchführung	5
4.1 Vorbereitung	5
4.2 Messung der Dämpfung mittels Impuls-Echo-Verfahren	5
4.3 Messung zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Medium	5
4.4 Spektrale Analyse und Cepstrum	6
4.5 Untersuchung eines Augenmodels	6
5 Auswertung	6
5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren	6
5.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Durchschallungs-Verfahren	7
5.3 Bestimmung der Dämpfungskonstanten mit Impuls-Echo-Verfahren	8
5.4 Untersuchung des Cepstrums/Spektrums	10
5.5 Untersuchung der Abstände in einem Augenmodell	12
6 Diskussion	14
Literatur	15

1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs ist es mittels Durchschallungs- und Impuls-Echo-Verfahren die Schallgeschwindigkeit und die Dämpfungskonstante in einem Probekörper zu bestimmen. Des Weiteren soll ein Augenmodell vermessen werden.

2 Theorie

2.1 Ausbreitung von Schall im Medium

Als Ultraschall wird der Schall im Frequenzbereich von $2 \cdot 10^4$ Hz bis 10^9 Hz bezeichnet. In Gasen und Flüssigkeiten pflanzen sich Schallwellen longitudinal durch Druckschwankungen fort, welche als

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

geschrieben werden können. Dabei wird $Z = c\rho$, mit der Schallgeschwindigkeit im Medium c und der Dichte ρ des Mediums, akustische Impedanz genannt, die dazu führt, dass die Ausbreitung des Schalls abhängig vom Medium ist. Die Schallgeschwindigkeit hängt ebenfalls von der Dichte ab und wird bei Flüssigkeiten mit der Kompressibilität κ berechnet über

$$c_{\text{Fl}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa\rho}}. \quad (1)$$

In Festkörpern hingegen können auf Grund von Schubspannungen auch transversale Wellen auftreten, weshalb c hier über den Elastizitätsmodul definiert ist:

$$c_{\text{Fe}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

2.2 Reflexion, Transmission und Absorption von Schall

Die Intensität einer Schallwelle nimmt exponentiell mit dem Abstand ab:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (3)$$

Der Absorptionskoeffizient α ist dabei vom Medium abhängig. Beim Übergang von einem Medium in ein anderes wird der Teil

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (4)$$

der einfallenden Intensität reflektiert. Der Rest, also

$$T = 1 - R, \quad (5)$$

wird transmittiert. T und R werden dabei Transmissions- und Reflexionskoeffizient genannt.

2.3 Erzeugung von Ultraschall und Anwendung

Erzeugt wird Ultraschall durch Einbringen eines piezoelektrischen Kristalls in ein wechselstrombetriebenes E-Feld. Ein Einstellen auf die Resonanzfrequenz führt zu großen Schwingungsamplituden. Verwendung finden Ultraschall-Untersuchungen in der Medizin um Informationen über das Körperinnere zu erhalten ohne ihn zu beschädigen.

Dabei ist die eine Verfahrensweise die Durchschallungs-Methode bei der Sender und Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten der Probe liegen. Der Sender erzeugt einen kurzen Schallimpuls, der vom Empfänger erhalten wird. Sind Fehlstellen im Körper enthalten, so ist die Intensität des empfangenen Impulses geringer. Eine genaue Lokalisation und Beschaffenheitsanalyse der Fehlstellen ist jedoch nicht möglich.

Die zweite Möglichkeit ist das Impuls-Echo-Verfahren. Hier ist der Sender auch gleichzeitig der Empfänger. Hier wird der Impuls ausgesendet, am Ende des Körpers reflektiert und nach dem zweiten Durchlaufen des Körpers wieder empfangen. Hierbei lassen sich Lage und Größe einer Fehlstelle über

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

bestimmen, wobei c die Schallgeschwindigkeit und t die Laufzeit des Impulses ist. Dieses Verfahren ist in verschiedenen Modi möglich. Bei einem A-Scan ist der Sender fest und es wird die Intensität des Echos gegen die Zeit oder bei bekannter Schallgeschwindigkeit im Probenmedium gegen die Eindringtiefe aufgetragen. Bei einem B-Scan wird der Sender über die Probe bewegt und die Echointensität über verschiedene Helligkeits- oder Farbstufen dargestellt, sodass eine zweidimensionale Darstellung entsteht.

3 Aufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Ultraschallechoskop, zwei Ultraschallsonden die mit 2 MHz betrieben werden und einem Computer zu Aufnahme und Analyse der Messdaten. Als Proben dienen verschieden lange Acrylzylinder und verschieden dicke Acrylplatten. Als Kopplungsmittel dienen destilliertes Wasser und Koppelgel. Am Ultraschallechoskop kann die Messmethode auf Durchschallungs- oder Impuls-Echo-Verfahren gestellt werden. Zur Auswertung der Messdaten am Computer wird die Software A-Scan verwendet. Für den letzten Versuchsteil wird ein Augenmodell wie in Abbildung 1 verwendet.

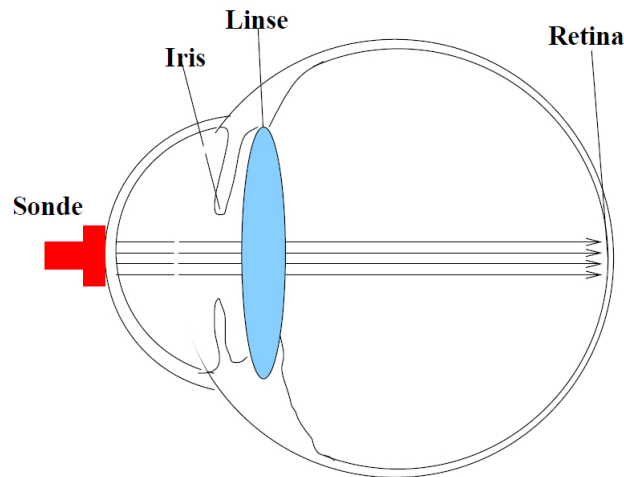


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Augenmodells [1]

4 Durchführung

Als Koppelungsmittel wird bei allen Versuchen mit dem Impuls-Echo-Verfahren bidestilliertes Wasser verwendet. Bei der Durchschallungs-Methode wird Koppelgel verwendet.

4.1 Vorbereitung

Es werden die Höhen der vorliegenden Acrylzyylinder mit einer Schieblehre vermessen. Die Schallgeschwindigkeit c in Acryl wird ins Messprogramm eingetragen und für einen Zylinder wird eine Tiefenmessung durchgeführt. Das Ergebnis wird mit der Messung verglichen.

4.2 Messung der Dämpfung mittels Impuls-Echo-Verfahren

Eine 2 MHz-Sonde wird oben an einen Acrylinder gekoppelt und mit einem Echoskop im *REFLEC*.-Modus verbunden, welches die auszuwertenden Daten an einen angeschlossenen Computer übermittelt. Im Auswertungsprogramm wird die Differenz zwischen den Amplituden des gesendeten und des reflektierten Impulses gemessen. Die Messung wird für sechs weitere Zylinder wiederholt.

4.3 Messung zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Medium

Die Schallgeschwindigkeit wird mit dem Impuls-Echo- und dem Durchschallungs-Verfahren bestimmt und die Ergebnisse werden verglichen. Bei dem Impuls-Echo-Verfahren wird eine 2 MHz-Sonde oben an einen Zylinder gekoppelt und mit einem Echoskop im *REFLEC*.-Modus verbunden. Es wird ein A-Scan durchgeführt und im Auswertungsprogramm die Zeitdifferenz zwischen dem Sende- und Echoimpuls gemessen. Die Messung wird für sieben weitere Acrylzyylinder wiederholt.

Im Durchschallungs-Verfahren wird ein Zylinder horizontal in eine Halterung gelegt und an beiden Stirnseiten werden 2 MHz-Sonden gekoppelt. Sie werden an das Echoskop im *TRANS*-Modus angeschlossen und es wird im Auswertungsprogramm die Zeitdifferenz der Impulse gemessen. Die Messung wird für vier weitere Zylinder wiederholt.

4.4 Spektrale Analyse und Cepstrum

Zwei Acrylscheiben und ein $4 \cdot 10^{-2}$ m langer Acrylzylinder werden gekoppelt. Oben an den Zylinder wird eine 2 MHz-Sonde gekoppelt. Die Verstärkung am Echoskop im *REFLEC*-Modus wird so eingestellt, dass im Auswertungsprogramm drei Mehrfachreflexionen zu sehen sind. Die zeitlichen Abstände zwischen den Echos werden ermittelt. Mit der FFT-Funktion wird das Spektrum und das Cepstrum der Sonde aufgezeichnet.

4.5 Untersuchung eines Augenmodells

Eine 2 MHz-Sonde wird an die Hornhaut eines Augenmodells so gekoppelt, dass eine Reflexion an der Retina zu sehen ist. Mit einem A-Scan werden die Echos an Hornhaut, Iris, Linse und Retina aufgenommen und die Entfernungen bestimmt

5 Auswertung

Die Graphen werden sowohl mit Matplotlib [2] als auch NumPy [5] erstellt. Die Fehlerrechnung wird mithilfe von Uncertainties [4] durchgeführt. Mit der Tiefenmessung wird der Zylinder der Länge $l = 120,5 \cdot 10^{-3}$ m vermessen. Mit der Schallgeschwindigkeit in Acryl von $c_{\text{Acryl}} = 2730$ m/s [6] ergibt sich für die Länge: $l_{\text{Tiefenmessung}} = 120,04 \cdot 10^{-3}$ m.

5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren

Tabelle 1: Die gemessenen Zeiten t_1 und t_2 am Anfang des Zylinders, sowie die Zeitdifferenzen Δt_{mess} und Δt_{eff} für die Acryl-Zylinder der Länge l bei dem Impuls-Echo-Verfahren.

$t_1/10^{-6}\text{s}$	$t_2/10^{-6}\text{s}$	$\Delta t_{\text{mess}}/10^{-6}\text{s}$	$\Delta t_{\text{eff}}/10^{-6}\text{s}$	$l/10^{-2}\text{m}$
0,3	89,3	89,0	44,50	12,05
0,3	82,9	82,6	41,30	11,15
0,3	76,4	76,1	38,05	10,21
0,3	60,3	60,0	30,00	8,04
0,3	53,0	52,7	26,35	7,08
0,3	46,0	45,7	22,85	6,05
0,3	29,5	29,2	14,60	3,97
0,3	23,6	23,3	11,65	3,11

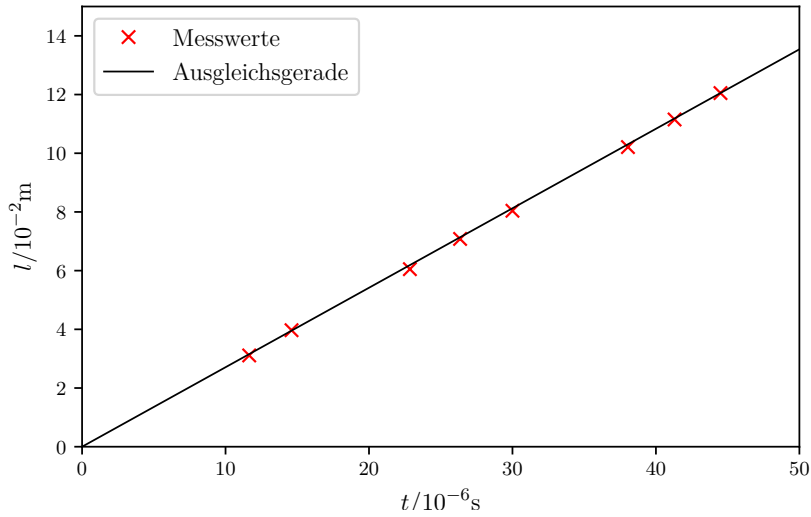
In der Abbildung 2 sind die Messwertepaare aus Tabelle 1 mit Δt_{eff} aufgetragen und durch einen linearen Fit der Form $l = c_1 t + l_{0,1}$ genähert:

$$c_1 = (2708 \pm 17) \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$l_{0,1} = (-6 \pm 5) \cdot 10^{-4} \text{ m}.$$

Dabei ist c die Schallgeschwindigkeit in Acryl und l_0 ist die Dicke der Anpassungsschicht. Δt_{eff} ist die Zeispanne, die der Schall für das einmalige Durchlaufen des Acrylzyinders benötigt. Sie beträgt dementsprechend die Hälfte von Δt_{mess} , da der Acrylzyinder beim Impuls-Echo-Verfahren zwei mal vom Schall durchlaufen wird.

Abbildung 2: Die bei einer Laufzeit t zurückgelegte Strecke l des Schalls im Zylinder bei dem Impuls-Echo-Verfahren aufgetragen gegen die Laufzeit t .



5.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Durchschallungs-Verfahren

Tabelle 2: Die gemessenen Zeitdifferenzen $\Delta t_{\text{Durchschallung}}$ für die Acryl-Zylinder der Länge l bei dem Durchschallungs-Verfahren.

$\Delta t_{\text{Durchschallung}}/\text{s}$	$l/10^{-2}\text{m}$
45,0	12,05
39,8	11,15
32,0	10,21
24,6	8,04
15,3	7,08

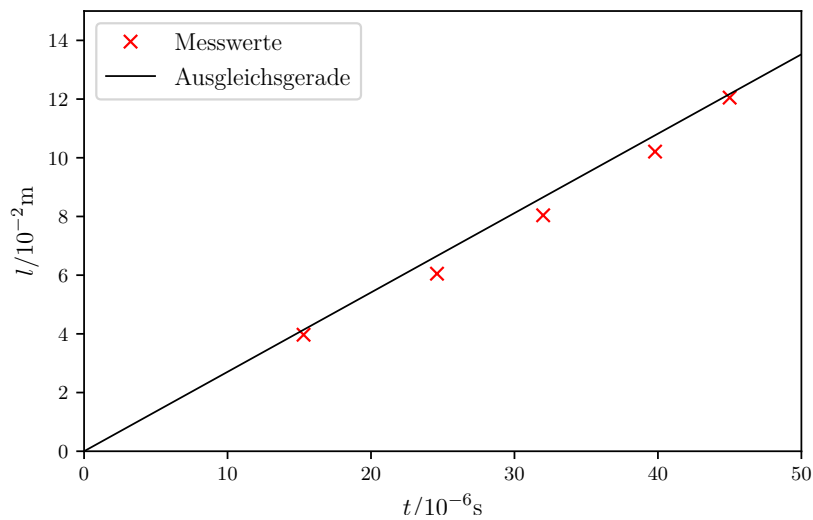
In der Abbildung 3 sind die Messwertepaare aus Tabelle 2 aufgetragen und durch einen linearen Fit der Form $l = c_2 t + l_{0,2}$ genähert:

$$c_2 = (2700 \pm 120) \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$l_{0,2} = (-4 \pm 4) \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

Dabei ist c die Schallgeschwindigkeit in Acryl und l_0 ist die Dicke der Anpassungsschicht.

Abbildung 3: Die bei einer Laufzeit t zurückgelegte Strecke l des Schalls im Zylinder bei dem Durchschallungs-Verfahren aufgetragen gegen die Laufzeit t .



5.3 Bestimmung der Dämpfungskonstanten mit Impuls-Echo-Verfahren

Tabelle 3: Die gemessene Spannungsdifferenz ΔU zur ursprünglichen Spannung für die Acryl-Zylinder der Länge l bei dem Impuls-Echo-Verfahren.

$l / 10^{-2} \text{ m}$	$\Delta U / \text{V}$
12,05	1,391
10,21	1,336
8,06	0,312
8,04	0,363
6,05	0,156
3,97	0,131
3,11	0,095

In der Abbildung 4 ist der Logarithmus von der ursprünglichen Spannung U gegen die zurückgelegte Strecke l des Schalls im Zylinder mit den Werten aus Tabelle 3 aufgetragen und wird durch einen linearen Fit der Form $\ln(U) = -\frac{\alpha}{2}x + \ln(U_0)$ genähert:

$$\alpha = (61 \pm 17) \frac{1}{\text{m}},$$

$$\ln(U_0) = (1,8 \pm 0,7).$$

Dabei ist α die Dämpfung. Die Ausgleichsformel ergibt sich aus Formel (3), unter Berücksichtigung, dass $I \propto U^2$ gilt. Aufgrund der schlechten Messwerte werden zwei weitere Näherungen derselben Form durchgeführt, einmal ohne die beiden letzten Werte (Interpretation1 in Abbildung 4) und einmal ohne die vier mittleren Werte (Interpretation2 in Abbildung 4). Diese liefern die Werte

$$\alpha_{I1} = (8 \pm 2) \frac{1}{\text{m}},$$

$$\ln(U_{0,I1}) = (0,47 \pm 0,05),$$

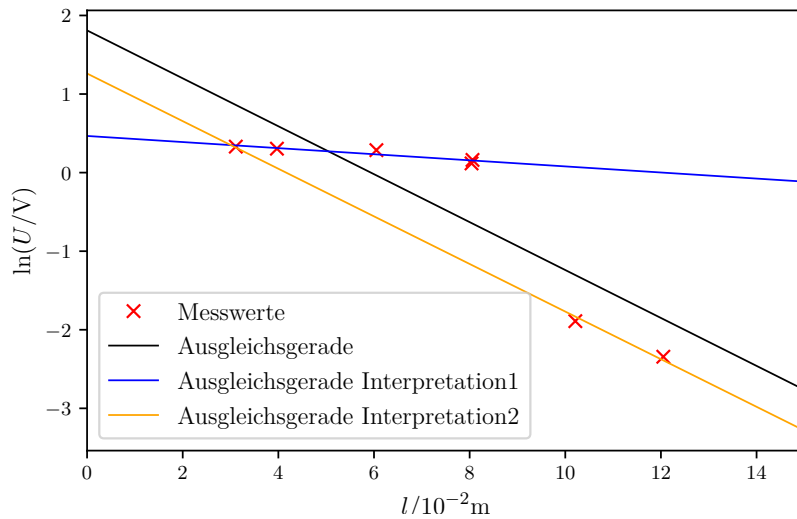
für die erste Interpretation und

$$\alpha_{I2} = (61 \pm 2) \frac{1}{\text{m}},$$

$$\ln(U_{0,I2}) = (1,3 \pm 0,1),$$

für die zweite Interpretation.

Abbildung 4: Der Logarithmus von den beim Impuls-Echo-Verfahren bestimmten Spannungen U aufgetragen gegen die im Zylinder nach der Zeit t zurückgelegte Strecke l des Schalls.



5.4 Untersuchung des Cepstrums/Spektrums

Tabelle 4: Die gemessene Länge/Dicke d_{mess} des Acrylzylinders und der Acrylplatten, sowie die gemessene Zeit im Spektrum bei dem Impuls-Echo-Verfahren.

$d_{\text{mess}}/10^{-2}\text{m}$	$\Delta t_{\text{mess}}/10^{-6}\text{s}$	$\Delta t_{\text{eff}}/10^{-6}\text{s}$	$d_{\text{exp}}/10^{-2}\text{m}$
3,97	29,2	14,60	3,99
0,60	4,5	2,25	0,61
0,98	7,2	3,60	0,98

Bei der Fourier transformierten ist ein Maximum bei 2,27 MHz zu erkennen. Die Laufzeiten des Schalls in den Acrylplatten lassen sich aus dem Cepstrum zu $\Delta t_1 = 4,4 \cdot 10^{-6}\text{s}$ und $\Delta t_2 = 7,2 \cdot 10^{-6}\text{s}$ bestimmen. Die Laufzeit für beide Platten zusammen beträgt $\Delta t_{1+2} = 11,6 \cdot 10^{-6}\text{s}$. Mit der bekannten Schallgeschwindigkeit in Acryl von $c_{\text{Acryl}} = 2730\text{m/s}$ [6] ergeben sich somit für die Dicken der Platten:

$$D_{1,1} = 0,60 \cdot 10^{-2}\text{m},$$

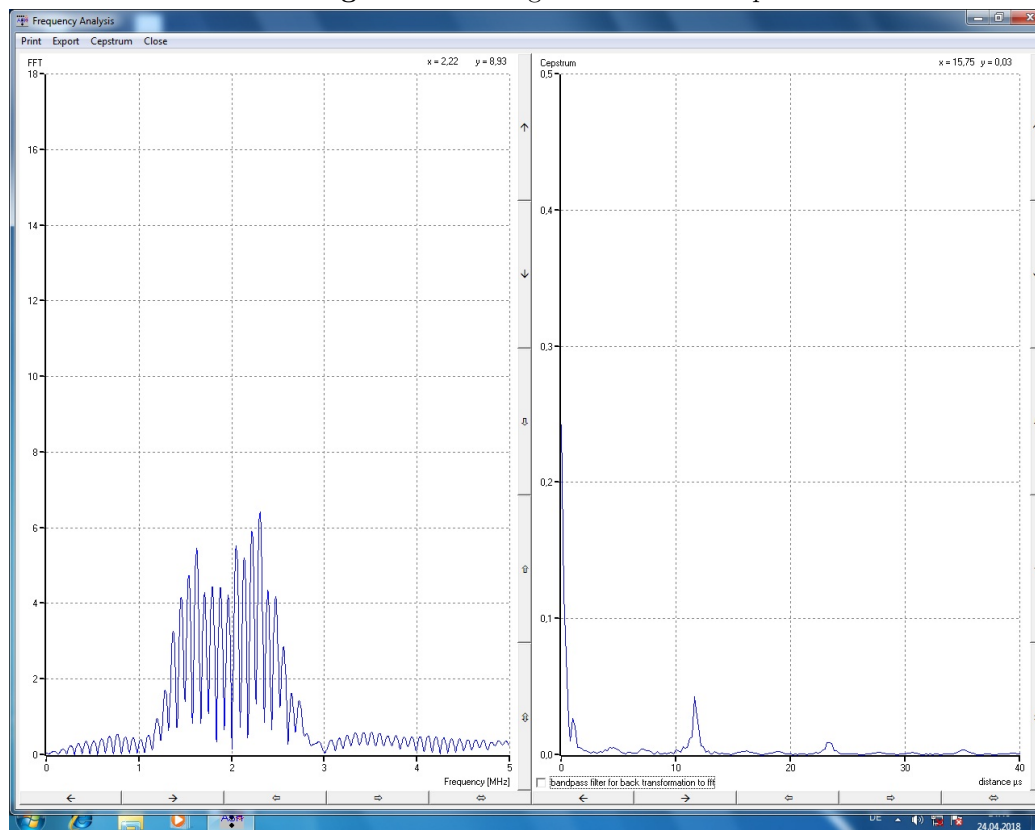
$$D_{1,2} = 0,98 \cdot 10^{-2}\text{m}.$$

Mit den Werten aus Tabelle 4 ergeben sich die Dicken der Platten bestimmt aus dem Spektrum:

$$D_{2,1} = 0,61 \cdot 10^{-2}\text{m},$$

$$D_{2,2} = 0,98 \cdot 10^{-2}\text{m}.$$

Abbildung 5: Die Messergebnisse für das Cepstrum.



5.5 Untersuchung der Abstände in einem Augenmodell

Mit den Werten für die Laufzeiten des Schalls im Auge aus Tabelle 5 lässt sich mit den bekannten Schallgeschwindigkeiten von $c_{\text{GK}} = 1410 \text{ m/s}$ [1] außerhalb der Linse und von $c_{\text{L}} = 2500 \text{ m/s}$ [1] in der Linse die Abstände im Augenmodell mit $s = vt$ berechnen. Dabei muss immer aufgrund der Impuls-Echo-Messung die jeweilige Zeitdifferenz durch zwei geteilt werden. Für den Abstand zwischen der Hornhaut und der Iris ergibt sich:

$$A_1 = 7,33 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Für den Abstand zwischen Iris und Linse ergibt sich:

$$A_2 = 4,09 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Für die Dicke der Linse ergibt sich:

$$A_3 = 8,90 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Für den Abstand zwischen Linse und Retina ergibt sich:

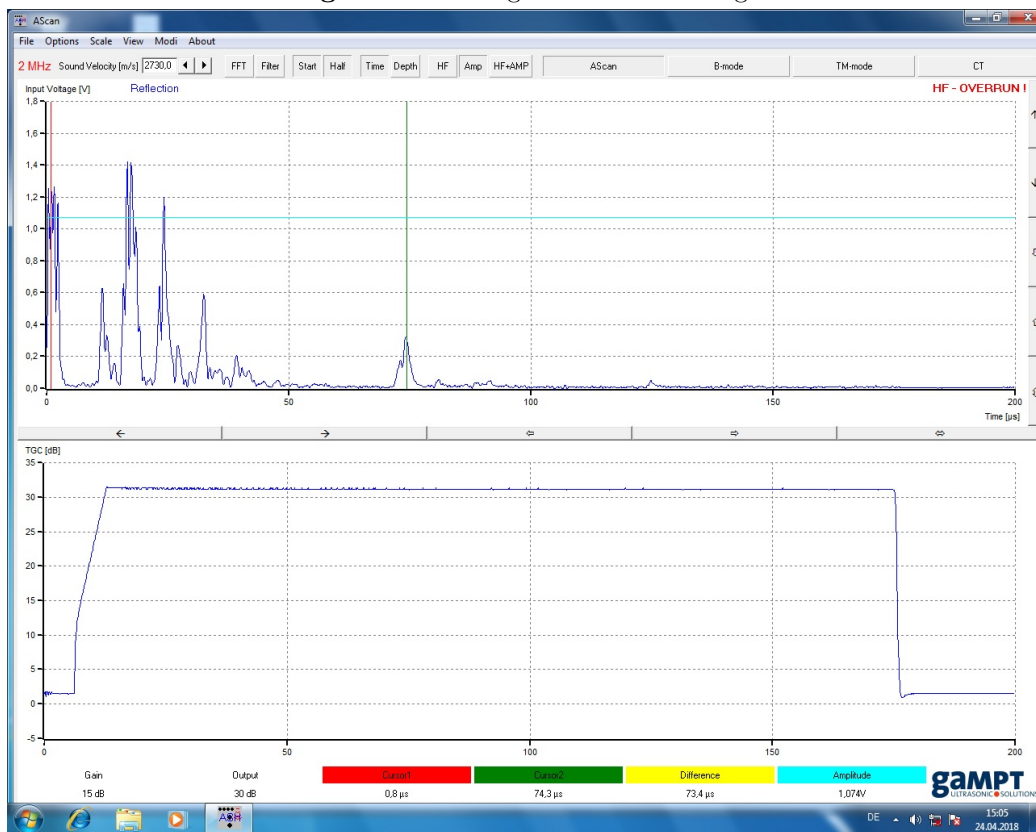
$$A_4 = 35,3 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Bei dem vierten Wert handelt es sich wahrscheinlich um eine Doppelreflexion an der Linse. Das Spektrum der Messung ist in Abbildung 6 zu sehen.

Tabelle 5: Die Werte für die Laufzeiten Δt_A des Schalls für die Abstände im Augenmodell.

n	$\Delta t_A / 10^{-6} \text{ s}$
1	10,4
2	5,8
3	7,1
4	50,1

Abbildung 6: Die Messergebnisse für das Augenmodell.



6 Diskussion

Tabelle 6: Die in der Auswertung bestimmten Werte mit den zugehörigen Referenzwerten und Abweichungen.

Wert	gemessen	Referenzwert[6],[3]	Abweichung
$l_{\text{Tiefenmessung}}$	120,04 mm	120,5 mm	−0,4 %
c_1	(2708 ± 17) m/s	2730 m/s	−0,8 %
c_2	(2700 ± 120) m/s	2730 m/s	−1,1 %
α	(61 ± 17) 1/m	(57 ± 2) 1/m	7 %
α_{I1}	(8 ± 2) 1/m	(57 ± 3) 1/m	−86 %
α_{I2}	(61 ± 2) 1/m	(57 ± 2) 1/m	7 %
$D_{1,1}$	6,0 mm	6,0 mm	0 %
$D_{1,2}$	9,8 mm	9,8 mm	0 %
$D_{2,1}$	6,1 mm	6,0 mm	1,7 %
$D_{2,2}$	9,8 mm	9,8 mm	0 %
A_1	7,33 mm	-	-
A_2	4,09 mm	-	-
A_3	8,90 mm	-	-
A_4	35,3 mm	-	-

In Tabelle 6 ist zu erkennen, dass die bestimmten Geschwindigkeiten c_1 und c_2 nah am Literaturwert von 2730 m/s liegen. Dabei ist die Abweichung, sowie der relative Fehler beim Durchschallungs-Verfahren größer als bei dem Impuls-Echo-Verfahren. Dies ist durch die halb so lange Strecke zu erklären, da Abweichungen in der Zeitmessung bei geringerer Zeit eine größere Rolle spielen. Die bei der Tiefenmessung bestimmte Länge des Zylinders stimmt mit der durch die Schieblehre bestimmten Länge überein.

Bei der Bestimmung des Dämpfungskonstanten α sind die schlechten Messwerte auffallend. Diese sind wahrscheinlich durch eine falsche Einstellung des Messgerätes zustande gekommen. In Abbildung 4 sind zwei mögliche Interpretationen der Messergebnisse zu sehen. Werden die Ergebnisse dieser mit dem Literaturwert von (57 ± 3) 1/m verglichen, scheint die zweite Interpretation mit $\alpha_2 = (61 \pm 2)$ 1/m die naheliegende zu sein, obwohl mehr Punkte auf der ersten Ausgleichsgeraden liegen. Dies lässt vermuten, dass die Messung im niedrigen Bereich zu starke Spannungen geliefert hat, was möglicherweise auf eine falsche Einstellung der Verstärkung hindeutet.

Die Messung der Dicken der Acrylplatten ist hingegen sehr genau, da hier die berechneten Werte aus dem Cepstrum und dem Spektrum kaum von den gemessenen Werten mit der Schieblehre abweichen. Dabei werden die Werte für die Zeitdifferenzen für das Cepstrum mit einem Lineal aus Abbildung 5 entnommen. Die Abstände für das Auge scheinen ebenfalls in der richtigen Größenordnung zu liegen, sind jedoch ohne Standardwerte nicht weiter zu überprüfen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *US1 Grundlagen der Ultraschalltechnik*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf> (besucht am 04.05.2018).
- [2] John D. Hunter. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Version 1.5.3. URL: <http://matplotlib.org/> (besucht am 13.11.2017).
- [3] Kaye und Laby. *The speed and attenuation of sound*. URL: http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_4/2_4_1.html (besucht am 04.05.2018).
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.0.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/> (besucht am 13.11.2017).
- [5] Travis E. Oliphant. *NumPy: Python for Scientific Computing*. Version 1.11.1. URL: <http://www.numpy.org/> (besucht am 13.11.2017).
- [6] OLYMPUS. *Material Sound Velocities*. URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/> (besucht am 04.05.2018).