

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 07.06.2022

Abgabe: 14.06.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
4 Auswertung	5
4.1 Auswertung der Schallgeschwindigkeit mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens	7
4.2 Auswertung der Schallgeschwindigkeit mithilfe des Durchschallungs-Verfahrens	7
4.3 Auswertung der Dämpfung mithilfe der Impuls-Echo-Methode	8
4.4 Biometrische Auswertung eines Augenmodells	9
5 Diskussion	10
Literatur	11

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die grundlegenden Eigenschaften der Ultraschallechographie untersucht und angewendet werden.

2 Theorie

Menschen können in einem Frequenzintervall von ca. 16 Hz bis 20 kHz hören. Der Frequenzbereich darüber bis 1 GHz wird als Ultraschall und der jenseits von 1 GHz als Hyperschall bezeichnet. Frequenzen unterhalb des für Menschen hörbaren Bereichs werden Infraschall genannt.

Zur Erzeugung des Schalls wird sich der reziproke piezo-elektrische-Effekt zu Nutzen gemacht. Hierfür wird ein geeigneter piezo-elektrischer Kristall in einem elektrischen Wechselfeld zu Schwingungen angeregt, wobei dieser Ultraschallwellen abstrahlt. Der Kristall kann ebenso genutzt werden, um Schallwellen zu empfangen, da diese ihn wiederum zu Schwingungen anregen.

Bei Schallwellen handelt es sich in Gasen und Flüssigkeiten um longitudinale Wellen, die sich in Form von Druckschwankungen fortbewegt. Eine Schallwelle mit Ausbreitung in x-Richtung lässt sich durch

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

beschreiben. Dabei ist p_0 der Normaldruck, v_0 die Schallschnelle, und $Z = \rho c$ die Akustische Impedanz mit der Schallgeschwindigkeit c und der Dichte ρ des durchschallenden Materials. Die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten lässt sich in Abhängigkeit ihrer Kompressibilität κ und ihrer Dichte ρ durch

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

ausdrücken.

In Festkörpern können Schallwellen aufgrund von Schubspannungen auch als Transversalwellen auftreten. In diesem Fall wird κ durch den Zusammenhang zum Elastizitätsmodul E ersetzt. Es folgt also

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

Ein gewisser Teil der Energie des Schalls geht bei der Ausbreitung durch Absorption verloren. Für seine Intensität gilt dabei

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

wobei α der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude und I_0 die Intensität des ausgehenden Schallimpulses ist.

Wenn eine Schallwelle auf eine Grenzfläche trifft, wird ein Teil von ihr reflektiert. Um welchen Anteil von der ursprünglichen Welle es sich bei der reflektierten Welle handelt, ist durch den Reflexionskoeffizienten R bestimmt. Ein Ausdruck für eben diesen ist gegeben durch

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

Hierbei sind Z_1 und Z_2 die jeweiligen akustischen Impedanzen der beiden Materialien. Für den Transmissionskoeffizienten, der den transmittierten Anteil der Welle angibt, gilt somit offensichtlich

$$T = 1 - R. \quad (6)$$

In dem Versuch werden zwei Verfahren der Ultraschalltechnik angewendet.

Beim ersten handelt es sich um das Durchschallungsverfahren. Hierbei werden sowohl ein Sender, als auch ein Empfänger verwendet. Diese werden an unterschiedliche Seiten der Probe angelegt. Es wird anschließend ein Schallimpuls durch die Probe gesendet. Anhand des Intensitätsabfalls kann dann bestimmt werden, ob die Probe eine Fehlstelle enthält. Dabei kann die Position dieser jedoch nicht bestimmt werden.

Das zweite Verfahren ist das Impuls-Echo-Verfahren. Hierbei wird nur ein Sender verwendet, der ebenfalls als Empfänger fungiert. Der ausgesendete Schallimpuls wird dabei an einer Grenzfläche reflektiert und kann so wieder vom Empfänger aufgenommen werden. Die Höhe des Echos kann dabei zur Bestimmung der Größe einer Fehlstelle verwendet werden. Bei bekannter Geschwindigkeit des Schalls im Medium kann durch

$$s = \frac{ct}{2} \quad (7)$$

die Position der Fehlstelle über die Laufzeit t des Echos bestimmt werden.

3 Durchführung

Es werden für diesen Versuch Ultraschallsonden mit einer Frequenz von 2 MHz verwendet. Diese sind über einen Verstärker an einen Computer angeschlossen. Auf dem Computer werden die Messwerte mit Hilfe des Programms EchoView graphisch dargestellt und abgespeichert. Die Sonden werden vor jedem Kontakt mit Proben mit Ultraschall Gel bestrichen.

Zunächst wird mit einer Schieblehre die Dicke einer Acrylplatte ausgemessen. Anschließend wird ein Scan mittels des Impuls-Echo-Verfahrens durchgeführt. Aus den gemessenen Daten kann so die Schallgeschwindigkeit bestimmt und die gemessene Dicke der Platte verifiziert werden.

Im zweiten Teil der Messungen soll erneut die Geschwindigkeit von Schall zusammen mit

der Dämpfung in Acryl bestimmt werden. Hierfür werden vier Acryl-Zylinder verschiedener Längen verwendet. Die Längen werden zunächst erneut mit Hilfe der Schieblehre gemessen. Anschließend werden sieben Scans mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens durchgeführt. Dafür werden auch Messungen mit mehreren Zylinder gestapelt aufgenommen. Dabei wird auch auf sämtlich Kontaktflächen zweier Zylinder jeweils Ultraschall-Gel aufgetragen. Aus den somit gemessenen Laufzeiten kann im Anschluss die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. Es wird ebenfalls eine Messung mit den vier Zylindern nach dem Durchschallungsverfahren durchgeführt.

Die Bestimmung der Dämpfung erfolgt durch eine erneute Messung nach dem Impuls-Echo-Verfahren. Die Messungen erfolgen für Zylinder sechs verschiedener Längen. Hierfür werden nun jeweils die Amplituden des ausgehenden und reflektierten Pulses gemessen. Die Dämpfung ergibt sich dann aus deren Verhältnis.

Im letzten Teil des Versuches soll erneut das Impuls-Echo-Verfahren angewendet werden, um ein Modell eines menschlichen Auges zu untersuchen. Hierzu werden Ultraschallsonde und Modell mit reichlich Ultraschall-Gel bedeckt. Die Sonde wird dann in unterschiedlichen Einfallswinkeln an das Auge gehalten, bis ein geeignetes Echo von der Rückwand der Retina zu sehen ist. Aus den gemessenen Peaks können anschließend die Abmaße des Modells bestimmt werden.

4 Auswertung

In dem zur Messung verwendeten Programm kann zwischen den verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten AM, HF und AM + HF gewählt werden. Dabei steht AM für Amplitude und HF für die Einhüllende der Amplitude. Wird die Einstellung AM + HF gewählt, so wird sowohl die Amplitude in rot, als auch die Einhüllende in blau eingezeichnet. Diese Einstellung wurde in den folgenden Grafiken gewählt.

Im folgenden werden die grundlegenden Eigenschaften des Ultraschalles, die in dem Versuch untersucht wurden, ausgewertet. Zunächst wurden die verwendeten Acrylplatten mit einer Schieblehre abgemessen, um die Werte später mit denen des Ultraschallgerätes vergleichen zu können. Die gemessenen Werte der Plattendicke lauten wie folgt,

$$\begin{aligned}P_1 &= 10 \text{ mm}, \\P_2 &= 6 \text{ mm}.\end{aligned}$$

Die in Abbildung 1 aufgenommene Grafik zeigt die vier Reflexe, die mit dem Puls-Echo-Verfahren aufgenommen wurden. Die Amplituden und Laufzeiten, die sich aus diesen Reflexen ergeben sind in Tabelle 1 eingetragen. Die Mittelwerte der Laufzeiten und der Amplituden sind ebenfalls in der Tabelle eingetragen.

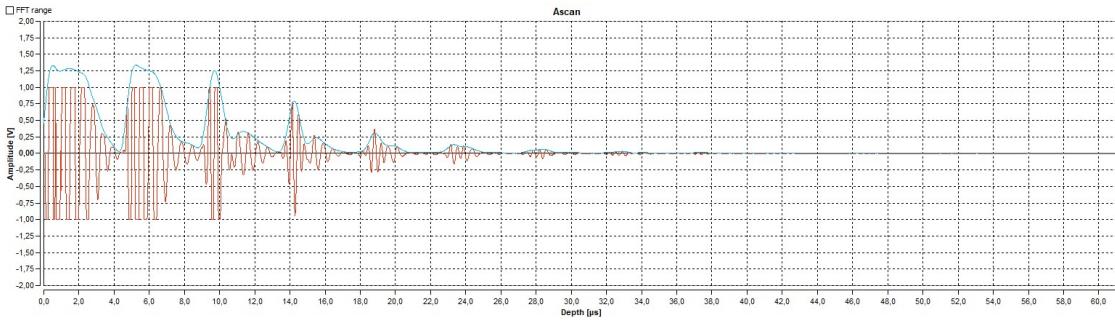


Abbildung 1: Aufgenommene Grafik zu den vier Reflexen.

Tabelle 1: Auswertung der aufgenommenen Grafik zu den vier Reflexen.

Reflex R_i	Laufzeit / μs	Amplitude / V
R_1	4,0	1,30
R_2	4,9	1,30
R_3	4,8	1,25
R_4	3,2	0,80
\bar{R}	4.2 ± 0.7	1.16 ± 0.21

Die theoretische Periodenlänge ergibt sich über die eingestellte Frequenz von 2 MHz zu

$$T = \frac{1}{2 \text{ MHz}} = 0,5 \mu\text{s}.$$

Die Schwingungsperioden sind aus Abbildung 2 ausgewertet worden und ihre Ergebnisse sind aus Tabelle 2 zusammen mit dem Mittelwert der Schwingungen \bar{S}_i abzulesen.

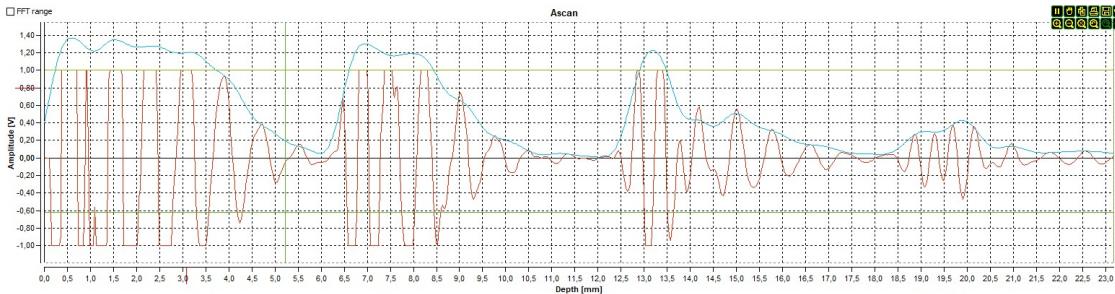


Abbildung 2: Aufgenommene Grafik zur Auswertung der Schwingungsperioden.

Mithilfe des Ultraschallgerätes wird die Dicke der Acrylplatte bestimmt. Die dazu angefertigte Grafik ist in Abbildung 3 dargestellt. Der erste Peak ist die reflektierte Intensität an der Wasseroberfläche der Acrylplatte und deshalb für die Auswertung der Plattendicke überflüssig. Die Länge des zweiten Peaks beschreibt die Dicke des Acryls. Es wird eine Tiefe von $D = 6 \text{ mm}$ bestimmt.

Tabelle 2: Auswertung der aufgenommenen Grafik zu den Schwingungsperioden.

Schwingung S_i	Periodenlänge / μs
S_1	0,50
S_2	0,54
S_3	0,58
S_4	0,54
S_5	0,57
\bar{S}_i	$0,546 \pm 0,028$

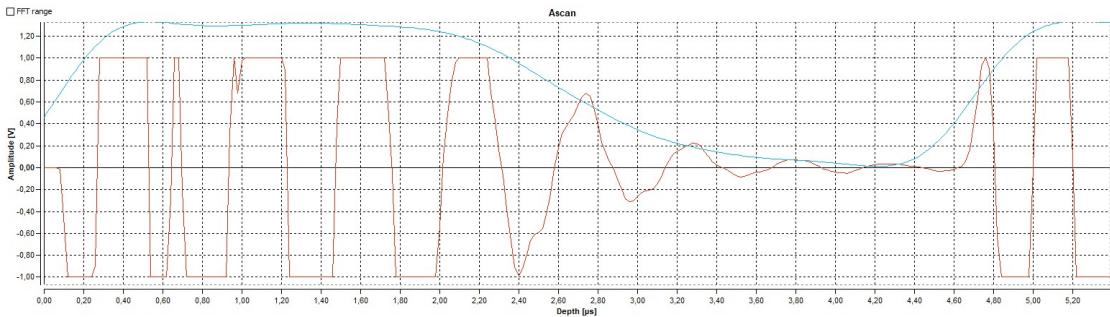


Abbildung 3: Aufgenommene Grafik zur Auswertung der Dicke der Acrylplatte.

4.1 Auswertung der Schallgeschwindigkeit mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens

Mithilfe eines Amplitudenscans soll nun die Laufzeit des Echos in einem Acrylzylinder ausgewertet werden. Die Laufzeiten sind in Tabelle 3 mit einem Mittelwert eingetragen. Es wurden dabei die vier verschiedenen Zylinder ausgemessen, die in dem Versuch zur Verfügung standen. Der Grund, weshalb keine Messwerte genommen wurde als die Zylinder aufeinander gestapelt waren, wird in Abschnitt 5 erklärt. Die mit der Schieblehre ausgemessenen Längen und Durchmesser sind ebenfalls eingetragen, um sie miteinander vergleichen zu können. Außerdem sind die berechneten Schallgeschwindigkeiten ν in Tabelle 3 eingetragen. Die Schallgeschwindigkeiten berechnen sich aus

$$s = \frac{1}{2}\nu t \Leftrightarrow \nu = \frac{2s}{t}. \quad (8)$$

Der Mittelwert der Schallgeschwindigkeiten ergibt sich somit zu

$$\bar{\nu}_1 = (1,84 \pm 0,24) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

4.2 Auswertung der Schallgeschwindigkeit mithilfe des Durchschallungs-Verfahrens

Die Schallgeschwindigkeiten sollen nun noch einmal mithilfe des Durchschallungsverfahrens bestimmt werden. Die mithilfe des Amplitudenscans bestimmten Laufzeiten und

Tabelle 3: Auswertung der aufgenommenen Grafik zu den Schwingungsperioden.

Zylinder Z_i	Länge / mm	Laufzeiten / μs	Durchmesser / mm	ν_1 / m/s^2
Z_1	40,4	18,32	40,0	2205,24
Z_2	61,5	34,43	40,0	1786,23
Z_3	80,5	43,96	40,5	1831,21
Z_4	120,5	79,12	40,0	1523,01

zugehörigen Schallgeschwindigkeiten der jeweiligen Zylinder sind in Tabelle 4 eingetragen.

Tabelle 4: Auswertung der aufgenommenen Laufzeiten.

Zylinder Z_i	Laufzeiten / μs	ν_2 / m/s^2
Z_1	30,04	2689,75
Z_2	43,96	2797,99
Z_3	59,34	2713,18
Z_4	88,28	2729,95

Ein Mittelwert für die Schallgeschwindigkeit beim Durchschallungs-Verfahren erfolgt somit zu

$$\bar{\nu}_2 = (2,73 \pm 0,04) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

4.3 Auswertung der Dämpfung mithilfe der Impuls-Echo-Methode

Es wird nun mithilfe der Impuls-Echo-Methode und einem A-Scan die Dämpfung des Acrylzyinders ausgewertet. Es werden dabei die Amplituden der reflektierten Impulse gemessen und ausgewertet. Weil die Amplituden mit Verstärkungen versehen sind, müssen sie erst korrigiert werden. Dazu wird die unverstärkte Amplitude V_1 mit dem folgenden Faktor multipliziert, um die tatsächliche Amplitude V_2 zu erhalten,

$$Q\text{dB} = 10 \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \text{dB},$$

$$\Leftrightarrow V_2 = V_1 \exp \left(\frac{Q}{10} \right).$$

Die Daten sind in Tabelle 5 eingetragen und in Abbildung 4 grafisch ausgewertet. Mithilfe der Python-Erweiterungen numpy [1], matplotlib [2] und scipy [3] wird eine lineare Ausgleichsgerade der Form

$$y = m \cdot x + b,$$

in die Grafik 4 eingebaut. Die Parameter ergeben sich zu

$$m = 0,0348 \pm 0,0072 \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right], \quad b = -0,4139 \pm 0,59 [\text{V}].$$

Tabelle 5: Auswertung der aufgenommenen Laufzeiten.

Zylinder Z_i	Amplitude / V
Z_1	0,78
Z_2	2.11
Z_3	21.63
Z_4	3.72

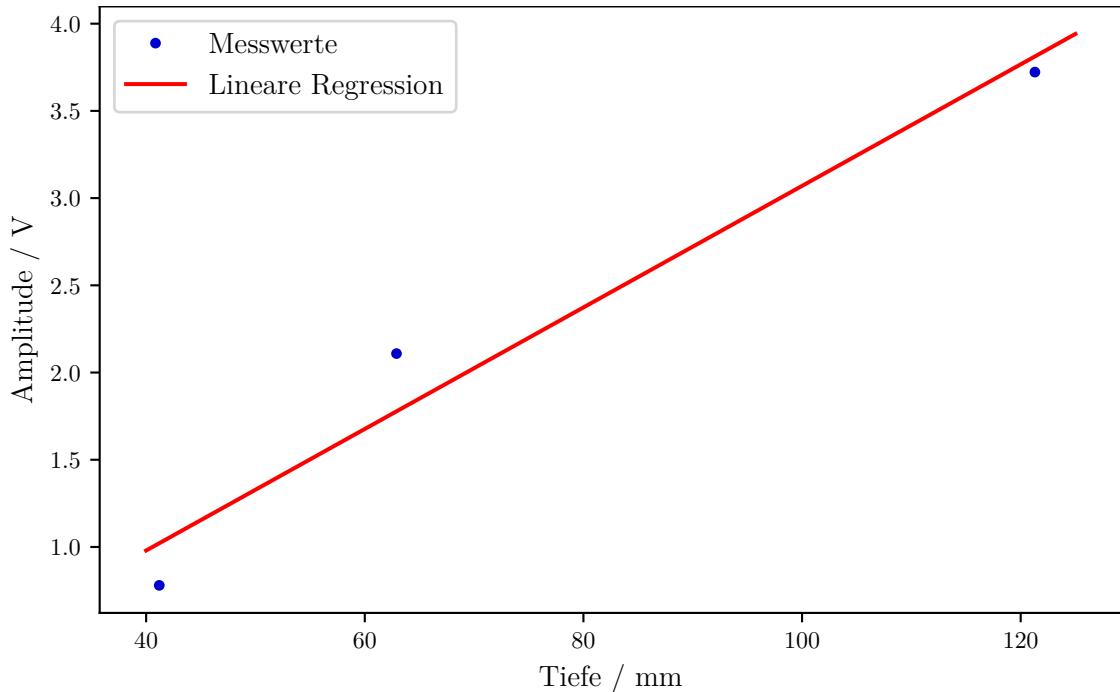


Abbildung 4: Grafische Auswertung der Amplituden mithilfe einer linearen Regression.

4.4 Biometrische Auswertung eines Augenmodells

Im folgenden werden die Abstände der Augapfelbestandteile eines Modellauges mithilfe von Ultraschall bestimmt. Dazu wird mit einem A-Scan und der Impuls-Echo Methode der in Abbildung 5 dargestellte Verlauf erstellt.

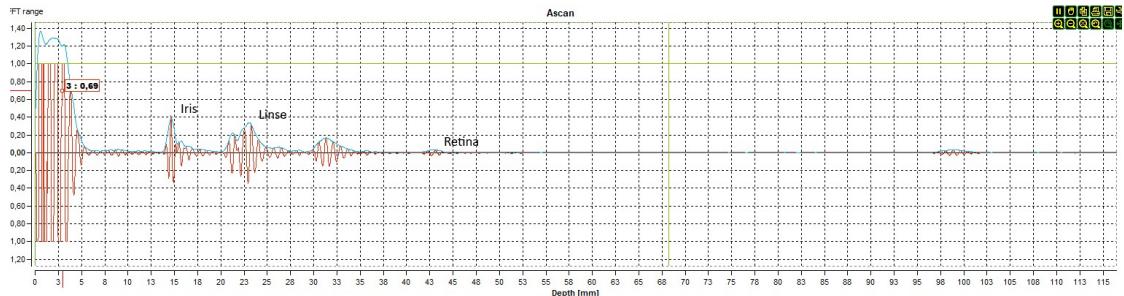


Abbildung 5: Grafische Darstellung der Messwerte eines Augapfelmodells.

Die Peaks stellen die verschiedenen Bestandteile des Auges dar und lauten wie folgt,

$$s_{\text{Iris}} = 14,9 \text{ mm},$$

$$s_{\text{Linse}} = 23,5 \text{ mm},$$

$$s_{\text{Retina}} = 43,7 \text{ mm}.$$

Der dritte Peak ist die Reflexion der Linse, die wieder an der Ultraschallsonde des Gerätes detektiert wird.

5 Diskussion

In Abschnitt 4 wurde für die Acrylplatte sowohl mit der Schieblehre, als auch mit der Ultraschallmethode eine Dicke von $D = 6 \text{ mm}$ bestimmt.

Bei der Messung der Periodenlängen wurde ein Wert von $T = 0,5 \mu\text{s}$ theoretisch vorausgesagt, was durch die am Ultraschallgerät eingestellte Frequenz erfolgte. Mit dem Ultraschallgerät wurde ein Wert von $T = (0,546 \pm 0,028) \mu\text{s}$ gemessen, was einer Abweichung von $(9 \pm 6) \%$ entspricht. Es ist somit zu sagen, dass die Theorie bestätigt wurde. Die Schallgeschwindigkeit wurde einmal mit dem Impuls-Echo-Verfahren und einmal mit der Durchschallungsmethode bestimmt. Die Ergebnisse und der Theoriewert [4] lauten wie folgt,

$$\begin{aligned} \nu_{\text{Echo}} &= (1,84 \pm 0,24) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \\ \nu_{\text{Durchschall}} &= (2,73 \pm 0,04) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \\ \nu_{\text{Lit}} &= 2750 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \end{aligned}$$

Die gemessene Schallgeschwindigkeit bei der Impuls-Echo-Methode entspricht einer Abweichung von $(33 \pm 9) \%$. Bei der Durchschallungsmethode entspricht der Wert einer Abweichung von $(0,6 \pm 1,5) \%$.

Der Grund für die hohen Abweichungen bei der Impuls-Echo-Methode kann das verwendete Kontaktmittel sein. In dem Versuch wurde destilliertes Wasser verwendet um der Dämpfung des Ultraschalles in Luft vorzubeugen. Mit Koppelgel, das sonst in der Ultraschalltechnik verwendet wird, hätten die Messungen eventuell genauer verlaufen

können.

Somit kann bei der mit der Impuls-Echo-Methode gemessenen Schallgeschwindigkeit nicht davon gesprochen werden, dass die Theorie verifiziert wurde. Die Abweichung ist zu groß. Bei der anderen mit der Durchschallungsmethode gemessenen Schallgeschwindigkeit kann bei dieser geringen Abweichung allerdings die Theorie bestätigt werden.

Zwar kann die Dämpfung nicht mit theoretischen Werten verglichen werden, aber es ist bereits an Abbildung 4 zu sehen, dass die Messung nicht genau sein kann. Es konnten hier nur vier Werte aufgenommen werden, wovon einer signifikante Abweichungen aufwies und somit bei der Auswertung der Dämpfung ausgenommen wurde. Der Grund, weshalb bei dieser Messreihe nur drei Wertepaare aufgenommen werden konnten ist der, das ein Fehler in der Durchführung unterlaufen ist. Bei der Durchführung des Versuches wurden mehrere Zylinder aufeinander gestapelt. Allerdings wurde nur der erste Peak gemessen, der einer Reflexion an der Grenzfläche zwischen den beiden Zylindern entspricht. Anstatt also einen "neuen", längeren Zylinder zu messen, wurde nur der erste Zylinder erneut gemessen. Diese Werte sind demnach für die Auswertung nutzlos.

Die Messreihe des Augapfelfmodells kann ebenfalls nicht mit theoretischen Werten verglichen werden, allerdings liegen alle Werte in einer realistischen Größenordnung.

Literatur

- [1] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] Hydrosight GmbH. *Polycarbonat und Acrylglas: Ein Vergleich*. 2022. URL: <https://www.hydrosight.com/de/polycarbonat-und-acrylglas-vergleich> (besucht am 11.06.2022).

Anhang

V-TLS1	→ in Bildern die Zylinder anders herum def.	
Zylinder 1:	60 mm Durchmesser 120,5 mm Länge	
Zylinder 2:	40 mm \varnothing	80,5 mm Länge
3:	40,5 mm \varnothing	61,5 mm Länge
4:	40 mm \varnothing	40,4 mm Länge
Platte 1:	10 mm 6 mm	Dicke Dicke
Amp → Amplitude	}	
HF → Frequenz	} Frequenz + Einhüllende	
Schwingung #	Periode / μs	
1	0,5 0,5 μs	
2	(2,04 - 1,56) μs	
3	(2,62 - 2,04) μs	
4	(1,27 - 1,23) μs	
5	(2,59 - 2,02) μs	
Aufgabe 3)		
Zylinder	Peak 1/V Peak 2/V	
1 (6+7)	1,33	0,527
2 (1+3)	1,32	0,151
3 (2+2)	1,33	0,215
4 (1+1)	1,34	0,085
Auge)		
Peak		
1:	0,136 0,136 → Die Abstände sind relevant	
2:	75; 0,37	
3:	23; 0,33	
4:	37; 0,16	
5:	43; 0,03 X	
6:	99; 0,03 X	
DOSBox		

Abbildung 6: Originale Messdaten.