

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Theodor Zies

theodor.zies@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 05.04.2022

Abgabe: 12.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Ultraschall	3
2.2. Messverfahren	3
3. Durchführung	4
3.1. Verifizierung des Messverfahrens	4
3.2. Vermessung von Acrylzylindern	4
3.3. Vermessung eines Augenmodells	4
4. Auswertung	5
4.1. Verifizierung des Messverfahrens	5
4.2. Messung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren	6
4.3. Messung der Schallgeschwindigkeit mit Durchschallungs-Verfahren	8
4.4. Messung der Dämpfung mit Impuls-Echo-Verfahren	9
4.5. Vermessung des Augenmodells	11
5. Diskussion	12
Literatur	12
A. Anhang	14
A.1. Originaldaten	14

1. Zielsetzung

Ziel des Versuches ist, die Grundlagen der Ultraschalltechnik zu verstehen und anzuwenden. Dafür wird die Schallgeschwindigkeit in Acryl sowie die Schalldämpfung untersucht, außerdem wird ein Augenmodell mithilfe der Ultraschalltechnik vermessen.

2. Theorie

2.1. Ultraschall

Bei Schall handelt es sich allgemein um eine longitudinale Welle, welche sich aufgrund von Druckschwankungen in einem Medium fortbewegt. Das menschliche Gehör kann diese in einem Frequenzbereich von ca. 16 Hz bis 20 kHz wahrnehmen. Schallwellen mit höheren Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 GHz werden als Ultraschall bezeichnet.

Die Ultraschallwellen breiten sich mit einer vom Medium abhängigen Schallgeschwindigkeit c aus. Weiterhin ist die akustische Impedanz (auch Schallkennwiderstand) $Z = \rho \cdot c$ von Interesse, sie hängt von der Schallgeschwindigkeit sowie von der Dichte des Mediums ab. Während der Ausbreitung verlieren die Schallwellen aufgrund von Absorption an Energie, ihre Intensität nimmt ab. Es besteht ein exponentieller Zusammenhang zwischen der Intensität und der zurückgelegten Strecke:

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

Aufgrund der hohen Absorption von Luft wird zwischen Schallgeber und Material ein Kontaktmittel verwendet.

Zur Erzeugung von Ultraschall wird unter anderem der sogenannte reziproke piezoelektrische Effekt verwendet. Piezo-elektrische Kristalle schwingen in elektrischen Wechselfeldern und strahlen dabei Ultraschallwellen ab. Derselbe Effekt funktioniert umgekehrt, somit kann ein solcher Kristall auch als Empfänger verwendet werden, der abhängig von der Schallintensität ein elektrisches Signal abgibt.

2.2. Messverfahren

Um Informationen über das zu untersuchende Material mithilfe von Ultraschall zu gewinnen, werden unter anderem Laufzeitmessungen durchgeführt. Dabei gibt es zwei wesentliche Verfahren.

Beim *Durchschallungs-Verfahren* wird mit einem Sender ein kurzzeitiger Schallimpuls in die Probe gegeben. Am anderen Ende der Probe wird das Signal dann wieder empfangen, aus der Laufzeit lässt sich die Länge berechnen:

$$s = c \cdot t \quad (2)$$

Die andere Möglichkeit nennt sich *Impuls-Echo-Verfahren*. Hier wird der Sender gleichzeitig als Empfänger verwendet. Der gesendete Impuls reflektiert am Ende der Probe und wird so wieder empfangen. Für die Längenberechnung zählt hier daher nur die halbe Zeit:

$$s = \frac{1}{2} c \cdot t \quad (3)$$

3. Durchführung

Für diesen Versuch werden Ultraschallsonden mit einer Frequenz von 2 MHz verwendet, die über einen Verstärker an einen Computer angeschlossen werden. Am Computer werden mithilfe einer Software die Daten aufgenommen und graphisch dargestellt. Die Sender bzw. Empfänger, sowie die Testkörper untereinander, werden bei jeder Messung mit bidestillierten Wasser oder speziellem Gel gekoppelt.

3.1. Verifizierung des Messverfahrens

Zur Überprüfung des Messverfahrens sowie der Geräte und Software wird eine Acrylplatte verwendet. Die Dicke der Acrylplatte wird gemessen und zu 10 mm bestimmt. Es wird ein Scan mithilfe des *Impuls-Echo-Verfahren* durchgeführt und das Ergebnis graphisch festgehalten. Aus diesen Daten kann die Schallgeschwindigkeit und somit wiederum die Dicke der Acrylplatte bestimmt werden. Dieses experimentelle Ergebnis wird in 4.1 ausgewertet und mit den theoretischen Werten verglichen.

3.2. Vermessung von Acrylzyclindern

Hier beginnt die Durchführung des eigentlichen Versuches, mit dem Ziel, die Geschwindigkeit sowie die Dämpfung von Schallwellen in Acryl zu bestimmen. Verwendet werden 4 Zylinder aus Acryl, deren Länge zuerst gemessen wird.

Zylinder 1: $l_1 = 40,4 \text{ mm}$

Zylinder 2: $l_2 = 61,5 \text{ mm}$

Zylinder 3: $l_3 = 80,5 \text{ mm}$

Zylinder 4: $l_4 = 120,5 \text{ mm}$

Als erstes wird eine Sonde oben auf einem Zylinder platziert und die Laufzeit des Pulses mithilfe des *Impuls-Echo-Verfahren* gemessen. Dieses Vorgehen wird 6 mal wiederholt, dabei werden auch Zylinder kombiniert, um unterschiedliche Längen zu erhalten.

Danach wird wieder die Laufzeit gemessen, allerdings nach dem *Durchschallungs-Verfahren* und für jediglich die vier einzelnen Zylinder.

Mithilfe der gewonnenen Daten wird in der Auswertung für beide Verfahren ein experimenteller Wert der Schallgeschwindigkeit bestimmt.

Zuletzt wird wieder die Messreihe des *Durchschallungs-Verfahren* durchgeführt, diesmal werden anstatt der Laufzeiten die Amplituden vor und nach der Reflektion am unteren Ende des Zylinders aufgenommen. Aus deren Verhältnis wird in der Auswertung die Dämpfung der Schallwellen in Acryl berechnet.

3.3. Vermessung eines Augenmodells

Abschließend soll das Modell eines menschlichen Auges mithilfe des *Impuls-Echo-Verfahren* vermessen werden. Die Ultraschallsonde wird mithilfe des Gels an der Iris an das Auge

gekoppelt und das Signal graphisch festgehalten. Die Auswertung der Daten liefert dann Werte für die Abstände der verschiedenen Bestandteile im Auge.

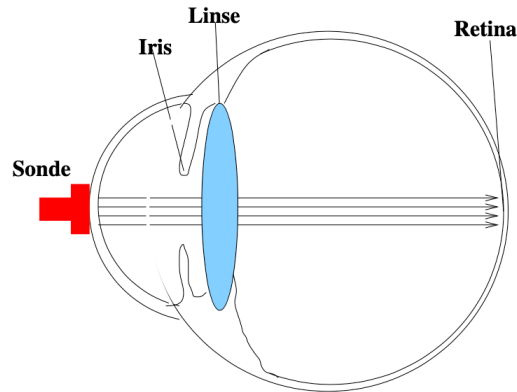


Abbildung 1: Schema des menschlichen Auges.[4]

4. Auswertung

4.1. Verifizierung des Messverfahrens

In Abbildung 2 ist das Ergebnis des Testscans dargestellt. Daraus wird die doppelte Laufzeit der Ultraschallwelle zu $\Delta \tilde{t} = 8 \mu\text{s}$ bestimmt. Hierfür wurde der zweite Peak (mit gelber Linie markiert) verwendet, da dieser dem einfach reflektierten Puls entspricht.

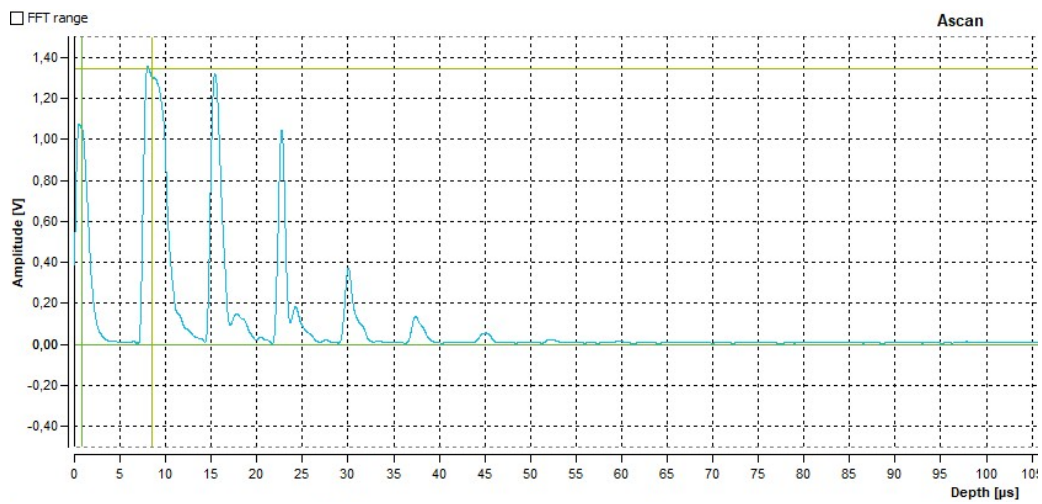


Abbildung 2: Ausgabe der Vermessung der 10 mm Acrylplatte.

Mit (3) wird somit die Schallgeschwindigkeit in Acryl zu $c_{\text{exp}} = 2500 \text{ m/s}$ berechnet.

Verglichen mit dem theoretische Wert von $c_{\text{theorie}} = 2730 \text{ m/s}$ [1] ist zwar eine Abweichung festzustellen, aber prinzipiell konnte die Schallgeschwindigkeit korrekt nachvollzogen werden. Die Dicke der Platte lässt sich nun bestimmen, indem die berechnete Schallgeschwindigkeit im Programm eingetragen wird. Der Tiefenscan in Abbildung 3 ergibt eine Dicke von ca. 12 mm (mit gelber Linie markiert), die mit der tatsächlichen Dicke unter Berücksichtigung von Ableseungenauigkeiten vereinbar ist.

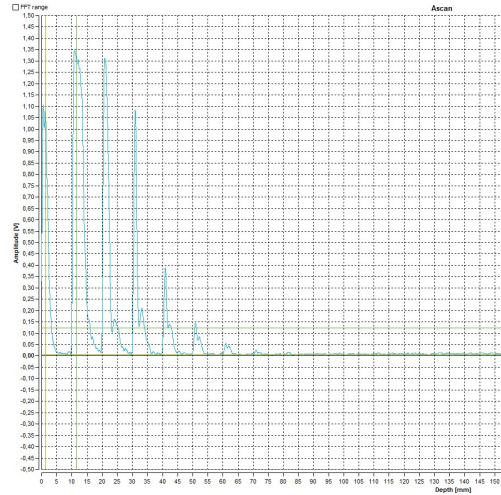


Abbildung 3: Ausgabe des Tiefenscan der Acrylplatte.

Zusammenfassend konnte somit das Verfahren der Ultraschallvermessung als korrekt bestätigt werden, da sowohl die Schallgeschwindigkeit als auch die Plattendicke mithilfe der Laufzeit des Ultraschallwelle berechnet werden konnten.

4.2. Messung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren

Für diesen Teil des Versuches werden Zylinder übereinandergestellt und mit bidestilliertem Wasser gekoppelt, um so mehrere verschiedene Längen zu erreichen. Die Laufzeiten der Schallwellen werden abhängig von der Länge der Zylinder in Tabelle 1 aufgeführt und in Abbildung 4 graphisch dargestellt.

Nach (2) sollte ein linearer Zusammenhang vorliegen. Mithilfe der *python*-Erweiterung *scipy*[3] wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt¹, welche für die Geradengleichung

$$l(\Delta t) = m \cdot \Delta t + b$$

¹Anm: Der grau hinterlegte Messwert wurde nicht bei der linearen Regression betrachtet, da hier sehr wahrscheinlich ein falscher Peak abgelesen wurde.

folgende Parameter liefert:

$$m_{\text{IE}} = (313 \pm 21) \cdot 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

$$b_{\text{IE}} = (0,4 \pm 2,1) \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Daraus lässt sich schließen, dass die Schallgeschwindigkeit in Acryl hier zu

$$c_{\text{IE}} = \frac{1}{m} = (3,19 \pm 0,22) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

bestimmt wird. Der Parameter b spiegelt hier die Dicke der Anpassungsschicht wider.

Tabelle 1: Daten c -Bestimmung mit Impuls-Echo-Verfahren.

l / mm	$\Delta \tilde{t} / \mu\text{s}$	$\Delta t / \mu\text{s}$
40,4	30	15,0
61,5	46	23,0
80,5	60	30,0
120,5	88	44,0
101,9	75	37,5
160,9	104	52,0
142,0	75	37,5

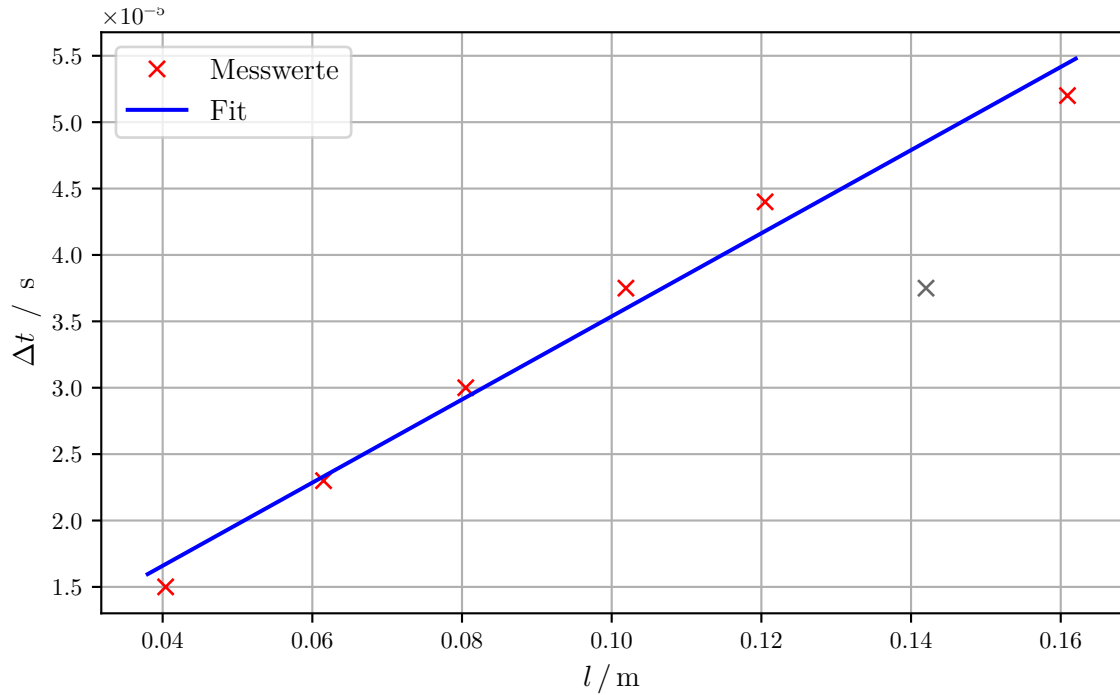


Abbildung 4: Graphische Darstellung der Messwertpaare aus Tabelle 1 mit Ausgleichsgerade.

4.3. Messung der Schallgeschwindigkeit mit Durchschallungs-Verfahren

Die Auswertung der Messwerte erfolgt analog zu 4.2. Hier liefert die lineare Ausgleichsrechnung die Werte

$$m_D = (361 \pm 5) \cdot 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

$$b_D = (1 \pm 5) \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

Daraus folgt für die Schallgeschwindigkeit

$$c_D = (2,77 \pm 0,04) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Tabelle 2: Daten c -Bestimmung mit Durchschallungs-Verfahren.

l / mm	$\Delta t / \mu\text{s}$
40,4	15
61,5	23
80,5	30
120,5	44

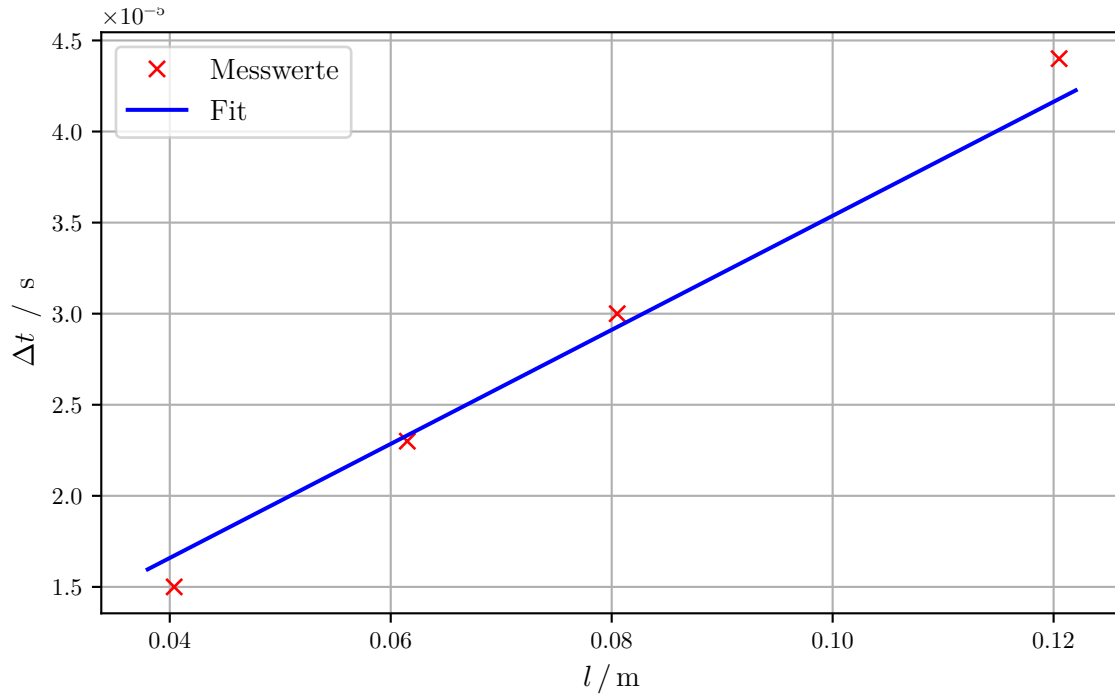


Abbildung 5: Graphische Darstellung der Messwertpaare aus Tabelle 2 mit Ausgleichsgerade.

4.4. Messung der Dämpfung mit Impuls-Echo-Verfahren

Für die Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten α wird das Verhältnis der Amplituden der ausgesendeten und der einfallenden Ultraschallwelle gebildet. Dieses Verhältnis wird logarithmisch gegenüber der doppelten Länge der Acrylzylinder aufgetragen und es wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt.²

$$m_{\text{Daempfung}} = (-13,8 \pm 1,3) \frac{1}{\text{m}}$$

$$b_{\text{Daempfung}} = (0,9 \pm 1,3) \text{ m}$$

Nach (1) liegt ein exponentieller Zusammenhang zwischen Signalstärke und zurückgelegter Strecke vor. Folglich liefert die Steigung der linearen Regressiongeraden den Dämpfungskoeffizienten α .

$$\alpha = (13,8 \pm 1,3) \frac{1}{\text{m}} \quad (4)$$

²Anm: Die grau hinterlegten Messwerte wurden für die Ausgleichsrechnung nicht berücksichtigt, da hier davon auszugehen ist, dass Kopplung zweier Zylinder nicht ausreichend gut war. Dies hatte vermutlich zur Folge, dass der Peak der eigentlichen Reflexion am Ende des Zylinders im Hintergrundrauschen untergegangen ist.

Tabelle 3: Daten Dämpfungsbestimmung mit Impuls-Echo-Verfahren.

l / mm	$A_{\text{out}} / \text{V}$	A_{in} / V
40,4	0,84	0,63
61,5	1,00	0,50
80,5	1,16	0,41
120,5	1,22	0,11
101,9	1,23	0,17
160,9	1,23	0,32
142,0	1,23	0,30

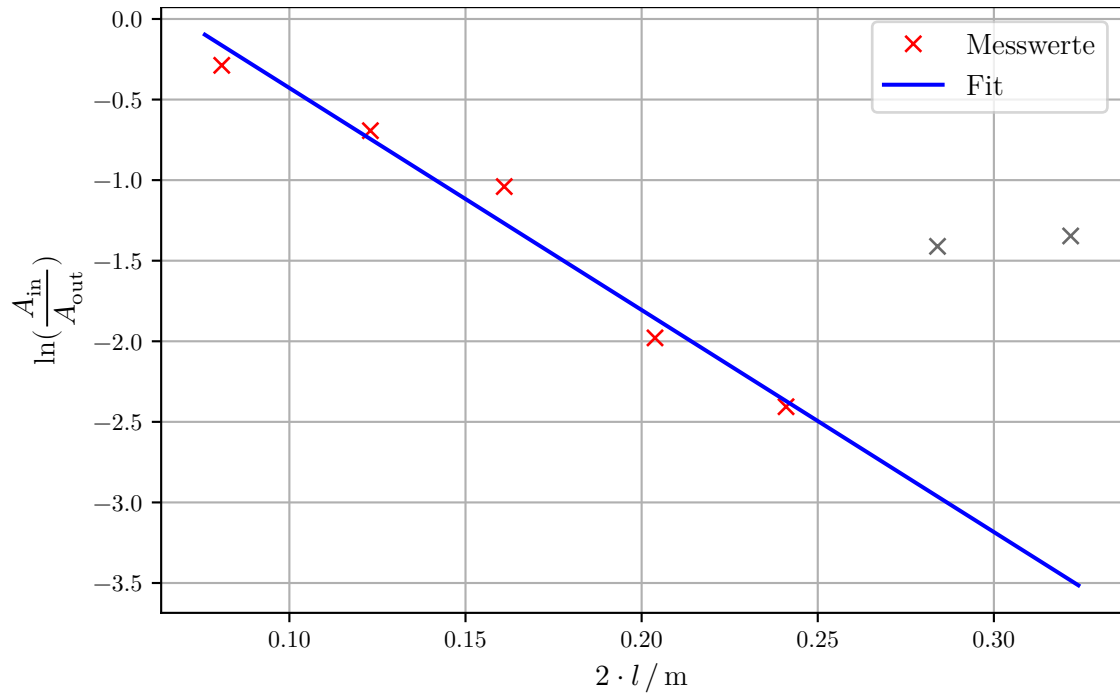


Abbildung 6: Logarithmische Darstellung des Amplitudenverhältnisses aus Tabelle 3 mit Ausgleichsgerade.

4.5. Vermessung des Augenmodells

Die Ultraschalluntersuchung des Augenmodells zeigt wesentliche Peaks bei den Laufzeiten

$$\Delta \tilde{t}_1 = 10,8 \mu\text{s}$$

$$\Delta \tilde{t}_2 = 16,4 \mu\text{s}$$

$$\Delta \tilde{t}_3 = 22,9 \mu\text{s}$$

$$\Delta \tilde{t}_4 = 71,4 \mu\text{s}.$$

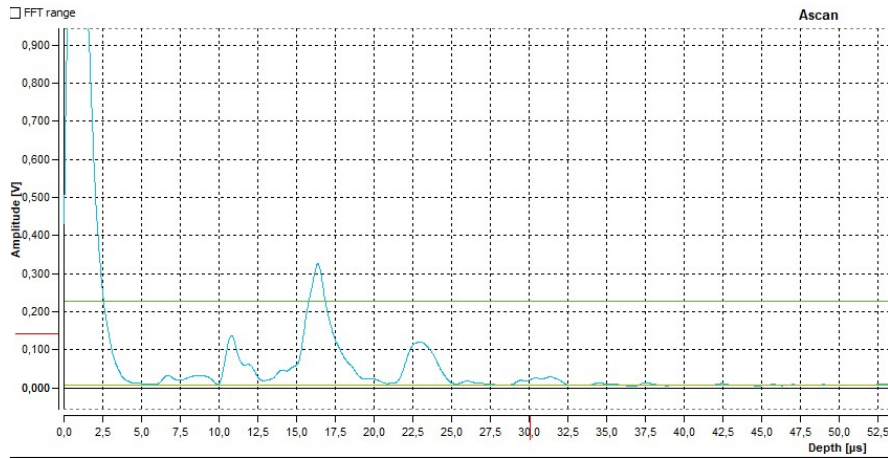


Abbildung 7: Ausgabe der Vermessung des Augenmodells.

Da das Augenmodell aus verschiedenen Materialien besteht müssen für die Berechnung der Abmessungen die verschiedenen Schallgeschwindigkeiten ([2], [4]) berücksichtigt werden. Dabei wird die Schallgeschwindigkeit in der vorderen sowie der hinteren Augenkammer mit der von Wasser angenähert.

$$c_{\text{Augenkammer}} = 1483 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{Linse}} = 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{Glaskörper}} = 1410 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Mithilfe von (3) und der Abbildung 1 folgt für die Abmessungen des Augenmodells:

Tabelle 4: Abmessungen des Augenmodells.

Abstand	c	d / cm
Hornhaut - Iris	$c_{\text{Augenkammer}}$	0,80
Iris - Anfang Linse	$c_{\text{Augenkammer}}$	0,42
Anfang Linse - Ende Linse	c_{Linse}	1,65
Ende Linse - Retina	$c_{\text{Glaskörper}}$	2,17

5. Diskussion

Die theoretische Schallgeschwindigkeit in Acryl von rund $c = 2730 \text{ m/s}$ [1] wird mit gewissen Abweichungen auch in diesem Versuch bestätigt.

Tabelle 5: Vergleich theoretische und experimentelle Schallgeschwindigkeit.

Messmethode	$c / \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Relative Abweichung
Impuls-Echo-Verfahren	3190 ± 220	16,85 %
Durchschallungs-Verfahren	2770 ± 40	1,47 %

Der experimentelle Wert des Impuls-Echo-Verfahrens lässt sich trotz der großen Messunsicherheit nicht mit dem theoretischen Wert bestätigen. Ein möglicher Grund hierfür ist die mangelhafte Kopplung zweier Zylinder oder nicht betrachtete Unsicherheiten bei dem Ablesen der Messungen.

Im Gegensatz dazu liegt der theoretische Wert des Durchschallungsverfahrens im Fehlerbereich des experimentell ermittelten Wertes. Bei diesem Verfahren werden die Zylinder nur einzeln gemessen und nicht untereinander nochmals gekoppelt.

Für den Dämpfungskoeffizienten wird der Wert $\alpha = (13,8 \pm 1,3) 1/\text{m}$ bestimmt. Bei der Bestimmung dieses Wertes werden die Acrylzylinder ebenfalls gekoppelt. Folglich ist dieser Wert vermutlich fehlerbehaftet, ein theoretischer Wert zum Vergleich ist nicht gegeben.

Die Werte der Augenvermessung lassen sich nicht exakt überprüfen, scheinen aber im Sachzusammenhang realistisch.

Literatur

- [1] Olympus Corporation. *Schallgeschwindigkeit im Material*. 2022. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/> (besucht am 07.04.2022).
- [2] Horst Czichos und Manfred Hennecke. *HÜTTE - Das Ingenieurwissen*. Springer, 2008. ISBN: 9783540718512.

- [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] *Versuch US1: Einführung in die Ultraschalltechnik*. TU Dortmund, Fakultät Physik.

A. Anhang

A.1. Originaldaten

US1 - Grundlagen der Ultraschalltechnik

	d in mm	h in mm	b in mm
1 kleinster Zylinder	40,0	40,0	/
2 kleiner Zylinder	40,5	80,5	/
3 großer Zylinder	40,1	80,5	/
4 größter Zylinder	40,0	120,5	/
dünne Acrylplatte	00,0	4,4	8,2
dicke Acrylplatte	10,0	4	8,5

Bei AM \rightarrow Amplitude
HM \rightarrow Frequenzen

Maximale Dicke Platte

Reihe	Amplitude in V	Tiefe in μ s	Amplitude in V
1		0,5	1,08
2		8,0	1,36 $\rightarrow c = 2.900 \frac{m}{s}$
3		15,0	1,32
4		25,0	1,00
5		30,0	0,35

Senke schließt mit 2 MHz

Periodendauer Schwingung: ~~0,9~~ $0,9 \mu s \rightarrow f = 2 MHz \quad \lambda = 1,25 \mu m$

nach an Theorie, c etwas anders

bei Abbildung: Dicke Acrylplatte: $\approx 10 mm$

c-Bestimmung mit I-E-Verfahren

Zylinder	Laufzeit in μs	Laufzeit in μs
1	30	104
2	46	104
3	60	104
4	88	75
1 & 2	75	
(1 & 3)	89	

C-Messung D-Verfahren

Zylinder	Zeit in μs
1	15
2	23
3	30
4	44

Dämpfung-Bestimmung I-E-Verfahren

Zylinder	Amplitude aus mV	Amplitude in mV	Output dB	Gain dB
1	0,94	0,93		
1	0,84	0,63	10	0
2	1,0	0,5	20	0
3	1,16	0,41	25	0
4	1,22	0,11	30	0
1 & 2	1,23	0,17	30	0
1 & 4	1,23	0,32	30	0
2 & 3	1,23	0,30	30	0

Augenmodell

Peaks	Zeit in μs
1	10,8
2	16,4
3	22,9
(4)	77,4)

D. Oskun