

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Umut Aydinli
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 14.06.2022

Abgabe: 21.06.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Vorbereitungsaufgabe	4
4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	5
4.1 Programm und Geräteeinstellung	5
4.1.1 Teil 1	5
4.1.2 Teil 2	5
4.1.3 Teil 3	6
4.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und Dämpfung mit dem Impuls- Echo-Verfahren	6
4.3 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungs-Verfahren	6
4.4 Abbildung des Spektrums und des Cepstrum	6
4.5 Untersuchung eines Augenmodels	6
5 Auswertung	7
5.1 Geräteeinstellungen	7
5.2 Impuls-Echo-Verfahren	8
5.3 Dämpfung	10
5.4 Durchschallungs-Verfahren	10
5.5 Spektrale Analyse und Cepstrum	11
5.6 Abmessung des Auges	12
6 Diskussion	13
7 Anhang	15
Literatur	16

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen, die grundlegenden Eigenschaften der Ultraschallwellen kennengelernt und die Dicken von verschiedenen Objekten durch das Impuls-Echo-, sowie Durchschallungs-Verfahren bestimmt werden.

2 Theorie

Ultraschallwellen, sind longitudinale Wellen, haben eine Frequenz von 20 kHz bis 1GHz und werden in der Medizin für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung verwendet.

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

Die Ultraschallwelle bewegt sich durch Druckschwankungen fort, wobei $Z = c \cdot \rho$ die akustische Impedanz ist. Diese setzt sich aus der Schallgeschwindigkeit c und der Dichte ρ zusammen. Der Unterschied zwischen einer Ultraschallwelle und einer elektromagnetischen Welle liegt bei der Phasengeschwindigkeit, aufgrund der materialabhängigkeit die durch Druck bzw. Dichteänderung verändert wird. Die Schallwellen breiten sich als Longitudinalwelle in Flüssigkeit und Gasen aus wobei die Geschwindigkeit, in Flüssigkeit, dieser von der Kompressibilität sowie Dichte abhängt

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

Bei Festkörpern breitet sich die Welle als Longitudinalwelle oder Transversalwelle aus, mit dem Elastizitätsmodul E , was für die Kompressibilität $\frac{1}{\kappa}$ ersetzt wird

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

Die Schallgeschwindigkeit der beiden Wellenarten unterscheidet sich voneinander, wobei die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern Richtungsabhängig. Bei der Schallausbreitung wird ein Teil der Energie absorbiert und die Intensität I_0 fällt nach der Strecke x exponentiell ab.

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

ist hierbei der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude.

Bei dem Auftreffen einer Schallwelle auf eine Grenzfläche wird ein Teil reflektiert und der Reflektionskoeffizient R setzt sich aus der akustischen Impedanz des auftreffmaterials zusammen.

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

Die Transmission T lässt sich durch $T = 1 - R$ berechnen.

Um Ultraschall zu erzeugen gibt es verschiedene Methoden. Eine davon ist durch die Anwendung des reziproken piezo-elektrischen Effekt. Dabei wird ein Kristall in ein Wechselfeld gebracht, welches den Kristall zum schwingen bringt, was wiederum die Ultraschallwellen erzeugt. Wenn die Eigenfrequenz mit der Anregungsfrequenz übereinstimmt können große Schwingungsamplituden erzeugt werden. Die daraus resultierenden Schallenergien sind extrem hoch und können genutzt werden. Der Piezokristall kann nicht nur als Erzeuger sondern auch als Empfänger für Ultraschallwellen genutzt werden. Ultraschallwellen werden in der Medizin dafür verwendet, Informationen über den durchstrahlten Körper zu erhalten. Die Laufzeitmessung ist ein häufig verwendetes Messverfahren, wobei kurzzeitige Impulse in Richtung Empfänger ausgesendet werden, womit die Strecke zum Empfänger bestimmt werden kann.

Das Durchschallungs-Verfahren ist eines der zwei Methoden die bei diesem Verfahren angewandt wird. Bei diesem Verfahren werden kurzzeitige Schallimpulse ausgesendet, welche auf der anderen Seite wieder von einem Ultraschallempfänger aufgefangen wird. Falls eine Fehlstelle auf diesem Weg vorhanden ist, wird eine abgeschwächtere Intensität gemessen. Jedoch kann nicht gesagt werden wo sich diese befindet. Bei dem Impuls-Echo-Verfahren ist die Sonde Ultraschallsender sowie empfänger. Reflektiert wird die Ultraschallwelle hierbei an der Grenzfläche des durchstrahlten Objekts. Bei vorhandenen Fehlstellen gibt die Größe des Signals Rückschlüsse zu der Größe der Fehlstelle. Über die Laufzeit kann die Lage der Fehlstelle ermittelt werden.

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

Die Laufzeit kann in einem A-Scan, B-Scan oder TM-Scan als Diagramm dargestellt werden.

3 Vorbereitungsaufgabe

Bei der ersten Vorbereitungsaufgabe sollen die Literaturwerte der Schallgeschwindigkeit, sowie der akustischen Impedanz, für verschiedenen Medien recherchiert werden.

Tabelle 1: Die einzelnen Werte zu der ersten Vorbereitungsaufgabe

	$c / \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$Z = c \cdot \rho / 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$
Luft	331 [2]	$43 \cdot 10^{-5}$ [2]
destilliertes Wasser	1492 [2]	1,48 [2]
Blut	1530 [2]	1,63 [2]
Knochen	3600 [2]	1,70 [2]
Acryl	2730 [3]	

Bei der zweiten Vorbereitungsaufgabe sollen die Wellenlängen und die Periode einer 2 MHz Schwingung in Acryl berechnet werden. Dies geschieht wie folgt

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2 \cdot 10^6} \frac{1}{\text{s}},$$
$$\lambda = \frac{c_{\text{Acryl}}}{f} = 1,365 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die benötigten Materialien für den Versuch setzen sich zusammen aus einem Echoskop, mit zwei 2 MHz Sonden, einem Rechner mit dem Programm Echoview, vier verschiedenen großen Acrylzyklindern, zwei verschiedenen dicken Acrylplatten, Kontaktgel, bidestilliertes Wasser, einer Schieblehre, Halterungen für die Ultraschallsonden und Küchentücher. Der Grundaufbau besteht aus dem Echoskop welches mit dem Rechner verbunden ist. Auf diesem Rechner wird das Programm Echoview gestartet und verwendet.

4.1 Programm und Geräteeinstellung

4.1.1 Teil 1

Der Grundaufbau wird mit einer der beiden Sonden verwendet und eine des beiden Acrylplatten untersucht. Die Acrylplatte wird horizontal auf ein Küchentuch gelegt und mit bidestilliertem Wasser angefeuchtet. Danach wird die Sonde auf die Acrylplatte gelegt und mit dem Programm Echoview ein A-Scan durchgeführt. Wichtig hierbei ist das die Verstärkung so eingestellt wird, dass mindestens vier Reflexe gut sichtbar sind. Aufgenommen werden für alle Reflexe die Laufzeiten sowie die Amplitude. Als letztes wird die dicke der Acrylplatte mit einer Schieblehre vermessen und mithilfe der Laufzeiten die Schallgeschwindigkeit ausgerechnet.

4.1.2 Teil 2

In dem zweiten Teils kann zwischen drei möglichen Programmeinstellungen gewechselt werden, AM, HF und AM + Hf. Verwendet wird für diesen Teil die Einstellung AM +

HF, sowie die zuvor errechnete Schallgeschwindigkeit. Der Versuchsaufbau bleibt identisch mit dem vom Versuchsteil 1. Im folgenden werden für fünf Schwingungen die Periode gemessen und dadurch die gemittelte Frequenz, sowie die gemittelte Wellenlänge berechnet und mit den Theoriewerten verglichen.

4.1.3 Teil 3

Der Aufbau wird nicht verändert. Als letztes wird eine Tiefenmessung durchgeführt wodurch die Dicke der Acrylplatte bestimmt werden soll. Diese wird verglichen mit der zuvor gemessenen Dicke.

4.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Der Grundaufbau wird erneut verwendet. Einer der vier Acrylzyylinder wird auf ein Küchenrollentuch gestellt und mit bidestiliertem Wasser wird eine Sonde an die Glatte Oberfläche gekoppelt. Gemessen wird die Laufzeit und Amplitude der Welle. Dies wird für alle vier Zylinder wiederholt.

4.3 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungs-Verfahren

Der Grundaufbau wird erneut verwendet. Einer der vier Acrylzyylinder wird in eine Halterung gesetzt, sodass der Zylinder horizontal positioniert ist. Beide Sonden werden hierbei verwendet, da eine als Sender und die andere als Empfänger dient. Beide Sonden werden in eine Halterung gesetzt und mit Koppelgel an die glatten Oberflächen gekoppelt. Gemessen werden erneut die Laufzeiten für alle vier Zylinder.

4.4 Abbildung des Spektrums und des Cepstrum

Der Grundaufbau wird erneut verwendet. Es werden beide Acrylplatten und ein ca. 40 mm hoher Acrylzyylinder aufeinander gestellt. Wichtig hierbei ist, dass die einzelnen Acrylelemente mit bidestiliertem gekoppelt werden. Eine der beiden Sonden wird mit bidestiliertem Wasser auf der glatten Zylinderoberfläche gekoppelt. Der Zylinder dient dabei als Vorlaufstrecke, damit die Mehrfachechos besser von dem Initialecho getrennt werden können. Die Verstärkung wird so eingestellt, dass möglichst drei Mehrfachreflexionen zusehen sind. Als letztes wird das Programm so eingestellt, dass ein Spektrum und ein Cepstrum zu sehen ist. Dies wird als Bild exportiert und interpretiert.

4.5 Untersuchung eines Augenmodells

Bei der Untersuchung des Augenmodells wird eine der Grundaufbau verwendet. Diese wird mit dem zu untersuchendem Augenmodell erweitert. Es wird eine 2 MHz Sonde mit Koppelgel auf die Hornhaut gekoppelt. Die Ultraschallsonde wird mit leichtem Druck an die Hornhaut gedrückt und der Winkel, in dem die Sonde gehalten wird, solange

verändert bis Echo an der Rückwand der Retina zusehen ist. Bestimmt werden die Laufzeiten der einzelnen Schichten und die Graphik wird exportiert.

5 Auswertung

5.1 Geräteeinstellungen

Durchgeführt wurde ein A-Scan mittels des Impuls-Echo-Verfahrens der Acrylplatte. Als Koppelmittel wurde bidestiliertes Wasser benutzt. Aufgenommen wurden die Laufzeiten und die Amplituden, zu sehen in der Tabelle 2. Die Acrylplatte hat eine Dicke von $s = 10$ mm. Die Schallgeschwindigkeit berechnet sich durch die Formel (6).

Tabelle 2: Laufzeiten und Amplituden

Laufzeiten t / μs	Amplituden t / μs
7	0,5
7	0,5
7	0,6
8	0,5
7	0,6

Aus den Laufzeiten, mit $\bar{T} = (7,2 \pm 0,2) \mu\text{s}$, folgt für die Schallgeschwindigkeit

$$c_{\text{exp}} = (2777,7 \pm 158,8) \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Aus den Amplituden und somit der Frequenz leitet sich die Wellenlänge her, mit

$$\bar{T} = (0,54 \pm 0,04) \mu\text{s},$$

$$f = \frac{1}{T} = (1,85 \pm 0,13) \cdot 10^6 \text{ Hz}, \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{c_{\text{exp}}}{f} = (1,50 \pm 0,18) \cdot 10^{-3} \text{ m}. \quad (8)$$

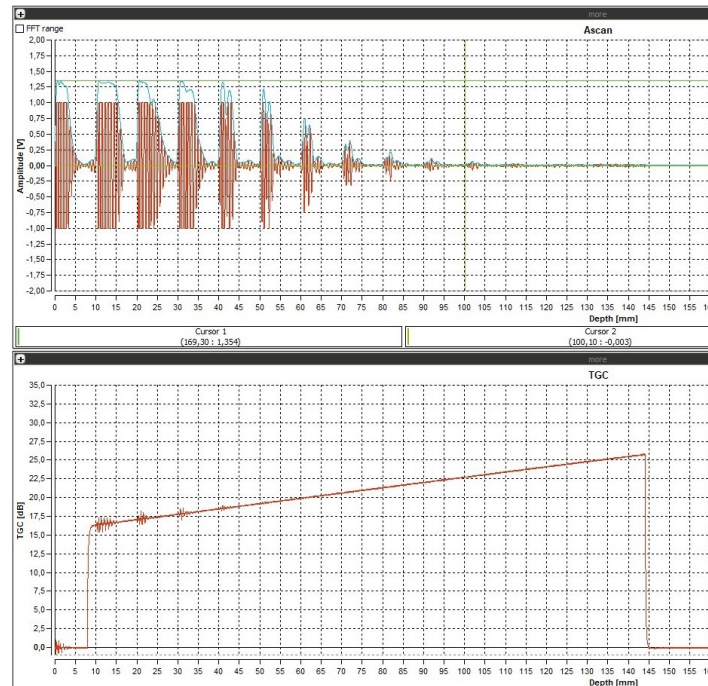


Abbildung 1: Impuls-Echo-Verfahren.

Die Einstellungen wie AM, HF und AM + HF verdeutlichen die Einhüllende sowie die Amplituden. Um die Amplituden zu untersuchen, ist es nötig, an jedem Tal die Grafik zu vergrößern.

5.2 Impuls-Echo-Verfahren

Für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit wurden folgende Abmessungen der Zylinder festgestellt

$$\begin{aligned}
 \text{ganz kleiner Zylinder } l_{\text{gk}} &= 40,0175 \text{ mm}, \\
 \text{kleiner Zylinder } l_{\text{k}} &= 61,25 \text{ mm}, \\
 \text{großer Zylinder } l_{\text{g}} &= 80,25 \text{ mm}, \\
 \text{ganz großer Zylinder } l_{\text{gg}} &= 120,25 \text{ mm}.
 \end{aligned}$$

In der Tabelle 3 sind für verschieden lange Zylinder mit dem A-Scan gemessenen Laufzeiten und Amplituden des ersten, welches als Theoriewert angenommen wird und zweiten Pulses aufgelistet.

Tabelle 3: Laufzeiten und Amplituden für das Impuls-Echo-Verfahren.

Länge der Zylinder l / mm	t / μ s	U / V	t / μ s	U / V
40,175	0	1,35	30	1,17
61,25	0	1,33	46	0,56
80,25	0	1,32	60	1,08
120,25	0	1,33	89	0,18

Die Schallgeschwindigkeit kann nicht mit der Gleichung erfüllt werden, da systematische Fehler vorhanden sind. Deshalb wird eine Lineare Regression, mit der Funktion

$$y = A x + B$$

durchgeführt. Die Steigung entspricht der Schallgeschwindigkeit, der y-Achsenabschnitt der doppelten Dicke der Anpassungsschicht und deren Nullstelle der doppelten Laufzeit durch die Anpassungsschicht.

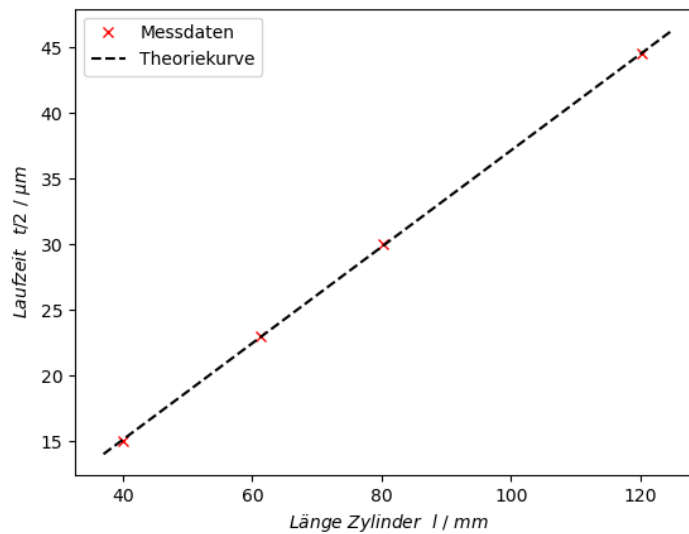


Abbildung 2: Lineare Regression beim Impuls-Echo-Verfahren.

Die Regression liefert die Werte

$$\begin{aligned}\text{Steigung } A_{\text{Echo}} &= (2723,45 \pm 17,06) \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\ y - \text{Achsenabschnitt } B_{\text{Echo}} &= (0,11 \pm 0,05) \text{ cm}, \\ d_{\text{Echo}} &= 0,055 \text{ cm}, \\ t_{\text{Anpassung, Echo}} &= 0,022 \mu\text{s}.\end{aligned}$$

5.3 Dämpfung

Um die Dämpfung zu berechnen wird die Gleichung (4) umgestellt zu

$$\alpha = -\frac{\ln\left(\frac{U(x)}{U_0}\right)}{X_1}. \quad (9)$$

Dabei ist $U(x)$ die Amplitude an der Stelle $x_1 > 0$ und U_0 die Amplitude an der Stelle $x = 0$. Angenommen wird der ganz kleine Zylinder mit den Messwerten

$$\begin{aligned}l_{\text{gk}} &= 40,0175 \text{ mm} = x_1, \\ U_0 &= 1,35 \text{ V an der Stelle } x = 0, \\ U(x) &= 1,17 \text{ V}.\end{aligned}$$

Im Mittel ergibt sich die Dämpfungskonstante zu

$$\alpha = (3,57 \pm 0,26) \frac{1}{\text{m}}.$$

5.4 Durchschallungs-Verfahren

Die Schallgeschwindigkeit wird eben sowie in Kapitel 5.2 Impuls-Echo-Verfahren bestimmt, nur mit der Ausnahme, dass der Faktor $\frac{1}{2}$ wegfällt, da der Schall den Zylinder nur einmal durchläuft. Die Laufzeiten befinden sich in Tabelle 4. Erneut wird eine Lineare Regression durchgeführt.

Tabelle 4: Laufzeiten und Amplituden beim Durchschallungs-Verfahren

Länge der Zylinder l / mm	t / μs	U / V	t / μs	U / V
40,175	0	1,33	15	0,72
61,25	0	1,33	23	0,47
80,25	0	1,33	31	0,29
120,25	0	1,34	45	0,03

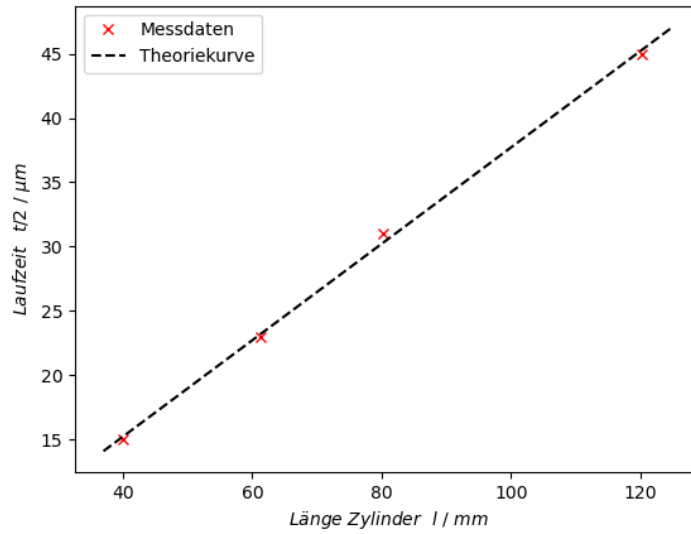


Abbildung 3: Lineare Regression beim Durchschallungs-Verfahren.

Die Parameter lauten

$$\begin{aligned}
 A_{\text{Durchschallung}} &= (2663,21 \pm 68,87) \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\
 B_{\text{Durchschallung}} &= (0,051 \pm 0,002) \text{ cm}, \\
 d_{\text{Durchschallung}} &= 0,0255 \text{ cm}, \\
 t_{\text{Durchschallung}} &= 0,01 \mu\text{s}.
 \end{aligned}$$

5.5 Spektrale Analyse und Cepstrum

Zwei Acrylscheiben und ein 40 mm langer Zylinder werden aufeinander gelegt und mittels Wasser gekoppelt. Es werden Mehrfachimpulse im Impuls-Echo-Verfahren aufgenommen und mit Hilfe der FFT Funktion ein Spektrum und das Cepstrum der Sonde erzeugt. Aus dem Cepstrum der Ultraschallsonde, siehe Abbildung 4, lassen sich drei Reflexionen erkennen, aus deren Laufzeiten berechnet sich die Dicke der Platten, mittels der Formel (6).

Tabelle 5: Berechnete Dicke der Scheiben.

	$t / \mu\text{s}$	d / mm
Scheibe oben	4,16	5,77
Scheibe unten	7,44	10,33
Zusammen	11,6	16,11

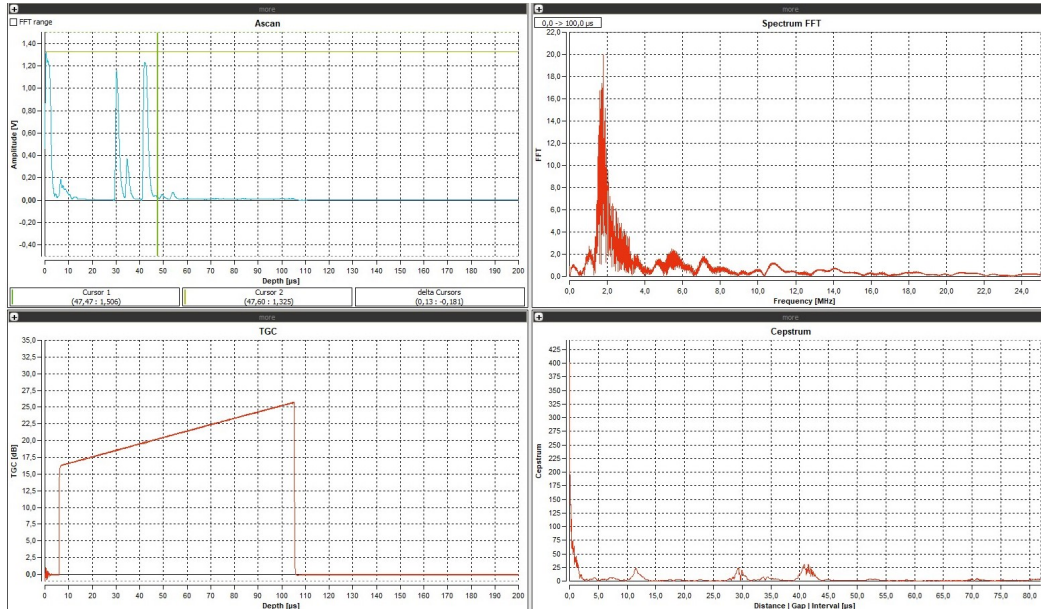


Abbildung 4: Spektrum der Ultraschallsonde.

5.6 Abmessung des Auges

Im richtigen Einschallwinkel lassen sich vier Reflexionen im Auge messen, siehe Abbildung 5, die die Grenzfläche der verschiedenen Augenbestandteile auftreten. Die Messwerte sind in der Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Laufzeiten der Echos im Auge.

$t_1(\text{Hornhaut} - \text{Iris}) / \mu\text{s}$	$t_2(\text{Iris} - \text{Linse}) / \mu\text{s}$	$t_3(\text{Linse} - \text{Linse}) / \mu\text{s}$	$t_4(\text{Linse} - \text{Retina}) / \mu\text{s}$
7	9	11	14

Es ist zu beachten, dass die Schallgeschwindigkeit in der Linse $c_L = 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und in der Glaskörperflüssigkeit $c_K = 1410 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt, sowie die Abstände voneinander abgezogen werden.

Tabelle 7: Die Abmessungen des Augenmodells.

Hornhaut - Iris / mm	Iris - Linse / mm	Linse - Linse / mm	Linse - Retina / mm
4,6	2,2	6,95	16,82

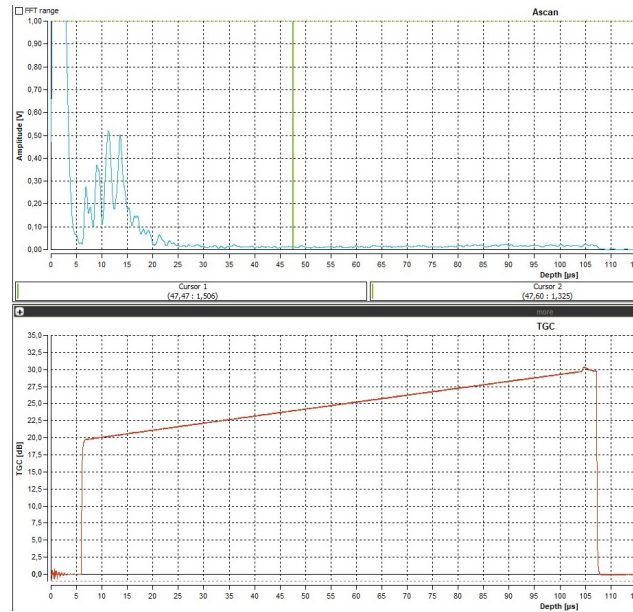


Abbildung 5: Biometrische Untersuchung eines Augenmodells.

6 Diskussion

Die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit mit der Geräteeinstellung, des Impuls-Echo-Verfahren sowie des Durchschallungs-Verfahrens weisen folgende Abweichungen auf.

	Abweichung zu $c_{\text{acryl}} = 2730 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [2] in %
$c_{\text{exp}} = 2777,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	1,74
$A_{\text{Echo}} = 2723 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	0,25
$A_{\text{Durch.}} = 2663 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	2,45

Die Abweichungen sind sehr gering somit erweist sich die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Impuls-Echo-Verfahren am profitabelsten.

Die Dicke der Scheiben haben eine Abweichung von

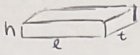
	Scheibe _{Lit.} (o.) in %	Scheibe _{Lit.} (u.) in %
Scheibe (o.)	3,8	-
Scheibe (u.)	-	3,3

Für das Abmessen der Auge lassen sich Referenzwerk finden, die ungefähr den berechneten Abständen entsprechen. Dennoch weisen bei der Versuchsreihe gewisse Ungenauigkeiten bzw. Abweichungen auf. Die Fehlerquellen liegen zum einen bei der begrenzten Ablesemöglichkeit oder die falsche Untersuchungen an den Grafiken. Die Ultraschallsonden sind ebenso nicht präzise bei der Messung und können mit einer begrenzten Genauigkeit die Amplituden und Laufzeiten messen.

Nichtsdestotrotz eignet sich das Verfahren zur Untersuchung von Materialien mit verschiedenen Ultraschallmessmethoden.

7 Anhang

USA



Abmessungen: Block 1 (Dick) $h = 10 \text{ mm}$
 $l = 80,15 \text{ mm}$
 $t = 40,3 \text{ mm}$

Block 2 (Dünn) $h = 6 \text{ mm}$
 $l = 80,15 \text{ mm}$
 $t = 40,3 \text{ mm}$

Zylinder $g_k \quad l = 40,0175 \text{ mm}$
 $k \quad l = 61,25 \text{ mm}$
 $g \quad l = 80,25 \text{ mm}$
 $g_g \quad l = 120,25 \text{ mm}$ } Dicke $d = 40,05 \text{ mm}$

A1 Geräteinst.

Blau (Einwickelnde) Amplitude (Diff der. HP)

$t / \mu s$	$t / \mu s$
7	0,5
7	0,5
7	0,6
8	0,5
7	0,6

A2 Impuls - Dampf ⁽¹⁴⁾

g_k E
 $0 \mu s / 1,35 V$ $30 \mu s / 1,17 V$

klein
 $T(\text{theoric})$ $E(\text{exp.})$
 $0 \mu s / 1,33 V$ $46 \mu s / 0,56 V$

groß
 T E
 $0 \mu s / 1,32 V$ $60 \mu s / 1,08 V$

g.g
 T E
 $0 \mu s / 1,33 V$ $89 \mu s / 0,18 V$

A3 Durchsch.

g_k	k	g	g_g
0 / 1,33	0 / 1,33	0 / 1,33	0 / 1,34
31 / 0,72	47 / 0,47	63 / 0,29	90 / 0,03
15	23	31	45

A4 Analyse

$t / \mu s$
4,16
7,44
11,6

A5 Auge

1 / 1,29	7 / 0,27	9 / 0,37	11 / 0,51	14 / 0,5
----------	----------	----------	-----------	----------

$\mu s / V$

Literatur

- [1] TU Dortmund. 2022. URL: https://qnap.e3.physik.tu-dortmund.de/suter/Vorlesung/MedizinphysikII_15/14_Ultraschall.pdf (besucht am 14.06.2022).
- [2] TU Dortmund. *US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. 2022. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977198/mod_resource/content/3/US1.pdf (besucht am 14.06.2022).
- [3] Evident. *Schallgeschwindigkeit im Material*. 2022. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/> (besucht am 14.06.2022).