

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DORTMUND

PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM

US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik

Elçin Akay, elcin.akay@tu-dortmund.de

Robin Hegering, robin.hegering@tu-dortmund.de

DURCHFÜHRUNG AM 04.06.2019

ABGABE AM 11.06.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	5
3.1	Versuchsaufbau	5
3.2	Versuchsdurchführung	5
4	Auswertung	7
4.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels Impuls-Echo-Verfahrens	7
4.2	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels Durchschallungs-Verfahrens	8
4.3	Bestimmung der Dämpfung von Acryl für Ultraschallwellen	10
4.4	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	10
5	Diskussion	11
	Literatur	12

1 Zielsetzung

Im folgenden Versuch sollen grundlegende Eigenschaften und Definitionen der Ultraschall-echographie erlernt und angewandt werden. Die Ultraschalltechnik stellt heutzutage ein wichtiges Element der Therapie und Diagnostik in der Medizin dar.

2 Theorie

Unter einer Frequenz von 16 Hz liegt der Infraschall. Die Aufnahme der Frequenzen bei Menschen liegt in einem Bereich zwischen 16 Hz bis 20 kHz. Der Bereich des Ultraschalls befindet sich oberhalb dieser Hörschwelle, also ab 20 kHz bis einem GHz. Ab einem Wert von einem GHz ist von Hyperschall die Rede. Allgemein stellt Schall eine longitudinale Welle dar, welche mittels Durchschwankungen weitergeleitet werden kann. Beschrieben wird dies durch die Formel

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

Hierbei stellt Z den Faktor dar, welche die akustische Impedanz angibt. Diese wird berechnet mit Hilfe der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium c_{med} und ergibt

$$Z = c_{\text{med}} \cdot \rho.$$

Anders als bei elektromagnetische Wellen ist die Phasengeschwindigkeit bei Schallwellen materialabhängig. Dies liegt an der Änderung von Druck p und Dichte ρ .

So ist es wichtig zwischen unterschiedlichen Eigenschaften zu unterscheiden. In Gasen und Flüssigkeiten werden lediglich Longitudinalwellen beobachtet, sodass sich für die Schallgeschwindigkeit folgender Zusammenhang ergibt

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

Die Kompressibilität des genutzten Mediums wird als κ bezeichnet.

Bei Festkörpern treten zusätzlich zu den Longitudinalwellen noch Transversalwellen auf, und sorgen dafür, dass die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern allgemein richtungsabhängig ist. Es ergibt sich der Zusammenhang

$$c_{\text{festk}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

wobei E das Elastizitätsmodul beschreibt. Es muss jedoch drauf geachtet werden, dass die Schallgeschwindigkeit für Transversalwellen und für Longitudinalwellen unterschiedlich aussieht.

Werden Schallwellen in einem Medium betrachtet, so ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der Energie durch Absorption verloren geht. So wird die Intensität I der Welle als eine Funktion des Ortes x und des Absorptionskoeffizienten α dargestellt

$$I(x) = I_0 \cdot \exp -\alpha x. \quad (1)$$

Da Luft einen sehr hohen Absorptionskoeffizienten besitzt, wird ein Kontaktmittel verwendet. Dieses besteht meist aus bidestilliertem Wasser oder einem Hydrogel.

Ein Teil der Versuchsreihe basiert auf reflektierten und transmittierten Wellen. So kann der Reflexionskoeffizient R beschrieben werden durch

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

und beschreibt das Verhältnis der einfallenden und der reflektierten Intensität. Der transmittierte Anteil T folgt aus der Relation $T = 1 - R$. Um Ultraschall zu erzeugen wird in dieser Messreihe der piezo-elektrische Effekt genutzt. Piezo-elektrische Kristalle werden in Schwingung versetzt, wenn eine entsprechende Anregung eines äußeren elektrischen Feldes zur Hilfe gezogen wird. Die Amplitude der entstehenden Welle und die daraus resultierende Energiedichte wird maximiert, wenn zwischen Anregerfrequenz und Eigenfrequenz des Kristalls Resonanz entsteht. Ergänzend dazu können Piezokristalle durch Schwallwellen angeregt werden. Dies ist der Grund, wieso sie als Empfänger genutzt werden können. Dazu wird Quarz bevorzugt, da dieser eine gleichbleibende physikalische Eigenschaft besitzt. Jedoch ist der Piezo-Effekt hier sehr gering.

Durch die Laufzeitmessung werden in der Medizin Informationen über den Aufbau eines Stoffes gewonnen. Das Prinzip dieses Ultraschalls wird durch zwei verschiedene Methoden ausgeführt. Allgemein basiert die Messung darauf, dass ein Ultraschallsignal losgesendet wird. So kann Laufzeit auf einer definierten Messstrecke mittels eines Empfängers gemessen werden.

Bei der ersten Methode wird das Durchschallungs-Verfahren 1 betrachtet. Hier wird durch einen Ultraschallsender ein Signal durch einen Stoff gesendet und kann auf der anderen Seite von einem Empfänger aufgenommen werden. Nun können die Amplituden der losgesendeten und empfangenen Wellen verglichen, und es kann die Aussage darüber getroffen werden, ob die Probe eine Fehlstelle beinhaltet. Es ist jedoch nicht möglich, den Ort der Fehlstelle anzugeben.

Die zweite Methode nennt sich das Impuls-Echo-Verfahren 2. Hier kann der Ultraschallsender auch als Empfänger genutzt werden. Der Schallkopf kann sowohl Schallwellen aussenden als auch reflektierte Signale wahrnehmen. Es wird die Amplitude des Echos genutzt um seine Größe zu bestimmen. So kann mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit und der Laufzeit die Lage der Fehlstelle bestimmt werden, zu

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

Es gibt für die beiden Verfahren unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten. Den A-Scan, den B-Scan und den TM-Scan. Bei dem A-Scan, auch Amplituden Scan genannt, wird die Amplitude der registrierte Welle auf dem Bildschirm dargestellt. Beim Brightness-Scan, auch B-Scan, wird hingegen die aufgenommene Amplitude in eine Helligkeitsstufe umgewandelt. Dadurch können viele punktuelle Messungen in ein zwei Dimensionales Bild umgewandelt werden. Bei dem Time Scan, auch TM-Scan, wird eine hohe Impulswiederholungsfrequenz genutzt. Dadurch können Bewegungen im Gewebe durch unterschiedliche Impulsechos registriert werden, und können so zeitlich dargestellt werden. Genutzt wird diese Methode häufig in Kombination mit dem B-Scan.

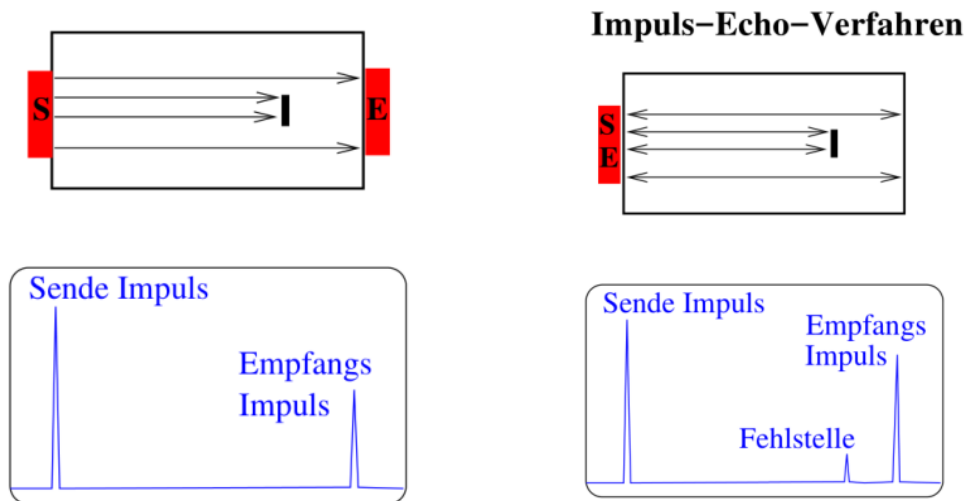


Abbildung 1: Das Durchschall-Verfahren

Abbildung 2: Das Impuls-Echo-Verfahren

Abbildung 3: Die zwei Messmethoden der Ultraschalltechnik beim Versuch US1 [2] .

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsaufbau

Grundlegend besteht der Aufbau aus einem Echoskop, zwei Ultraschallsonden, eines PCs zur Auswertung der Daten sowie verschieden lange Acrylzyylinder. Um das Echoskop zu nutzen, wird der Impuls-Betrieb genutzt. Es gibt zwei Scan-Einstellungen, zwischen denen durch den Kippschalter gewechselt werden kann. So wird dieser dann auf REFLEC oder auf TRANS umgelegt. Für den Versuch werden die Ultraschallsonden mit 2 MHz genutzt. Deren Empfangsleistung liegt zwischen 0 dB und 35 dB. Mit Hilfe des Messprogramms Echo-View werden sowohl A-Scan, FFT Spektrum, Cepstrum und die Verstärkung der TGC betrachtet. Es wird der Cursor genutzt um die Differenz zwischen zwei Positionen auf der X-Achse zu bestimmen. Zusätzlich geben die Cursor das Intervall an, welches für das Frequenzspektrums und das Cepstrum verwendet werden. Eine Funktion der Zeit $t / \mu s$ als auch eine Funktion der Eindringtiefe x / mm können bei dem A-Scan betrachtet werden. Mithilfe der Freeze- und Start-Taste kann die durchgehende Aktualisierung des A-Scan-Bildes zudem angehalten und wieder gestartet werden. Mit der Time Gain Control kann die Verstärkung über die Parameter Treshhold, Wide, Slope und Start eingestellt werden. Die erstellte Grafik wird auf einem USB-Stick gespeichert.

3.2 Versuchsdurchführung

Für die Messreihe werden bereits im Vorhinein Schallgeschwindigkeiten verschiedener Medien recherchiert, unter anderem die von Acryl. Nun wird die Schallgeschwindigkeit für Acryl in das Programm eingegeben. Durch das Impuls-Echo-Verfahren wird die

Tiefenmessung überprüft. Nachdem die Längen aller Acrylzyylinder vermessen wurden, werden nun die Laufzeiten dieser Zylinder aufgenommen. Dazu wird ein vermessener Zylinder auf ein Papiertuch gestellt und durch bidestilliertes Wasser an eine 2 MHz Sonde gekoppelt. Nun wird ein A-Scan ausgeführt. Durch die Cursor kann die zeitliche Distanz zwischen dem ausgesandten und dem reflektiertem Signal vermessen. Außerdem werden die Amplituden der verschiedenen Peaks gemessen und notiert. Daraus wird später die Dämpfung bestimmt. Um keine Fälschungen in der Messreihe zu haben, wird die Verstärkung bei diesem Versuch ausgeschaltet. Die Messung wird anschließend für fünf weitere Zylinder wiederholt. Die nächste Versuchsreihe beschäftigt sich mit der Durchlaufzeit. Dort wird ein Zylinder auf eine Schiene gelegt, und an beiden Enden mit Hydrogel an eine Ultraschallsonde gekoppelt. Es wird die Durchschallmethode gemessen, und auf dem A-Scan wird die Laufzeit abgelesen. Diese ergibt sich analog durch den zeitlichen Abstand zwischen den Peaks. Im weiteren Verlauf des Versuches werden zwei Acrylzyylinder gestapelt, um die Mehrfachreflexion mittels des Impuls-Echo-Verfahren deutlich erkennen zu können. Dazu wird die Verstärkung solange erhöht, bis mindestens drei Reflexionen erkennbar sind. Wieder wird durch den Cursor der zeitliche Abstand zwischen den Peaks gemessen.

Im letzten Teil des Experimentes wird das Auge, welches in Abbildung 4 dargestellt ist, untersucht. Dafür wird erneut das Impuls-Echo-Verfahren genutzt. Die 2 MHz Sonde wird mit dem Hydrogel an das Auge gekoppelt und so lange leicht verschoben, bis auf dem A-Scan-Bild mehrere Peaks erkennbar sind. Anschließend werden die zeitlichen Abstände mittels der Cursor vermessen und notiert.

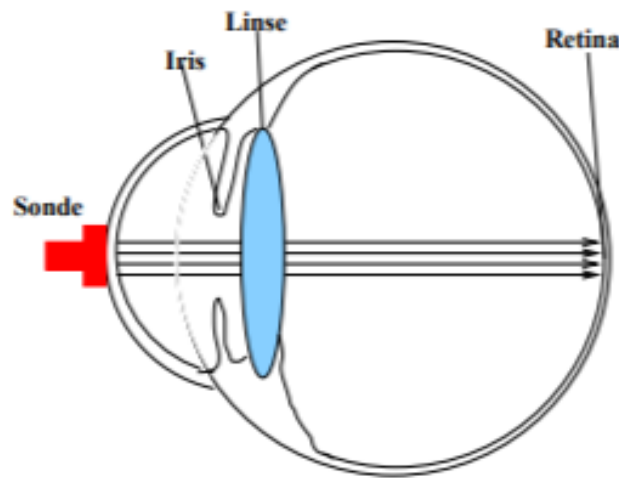


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des zu untersuchenden Augenmodells [2].

4 Auswertung

Vor Beginn der Messreihen werden zunächst die zu verwendenden Acrylzyylinder mithilfe einer Schieblehre ausgemessen. Die festgestellten Längen sind in Tabelle 1 dargestellt. Im

Tabelle 1: Längen der verwendeten Acrylzyylinder.

Nummer	Länge l / mm
1	31,1
2	40,5
3	80,6
4	102,1
5	121,7

Anschluss wird nun die Schallgeschwindigkeit für Acryl sowohl über das Impuls-Echo-Verfahren als auch über das Durchschallungsverfahren bestimmt. Außerdem wird die Dämpfung von Ultraschallwellen durch Acryl bestimmt. Abschließend wird ein Augenmodell mit einer Ultraschallsonde untersucht, um die Augenabstände zu bestimmen.

4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels Impuls-Echo-Verfahrens

Um die Schallgeschwindigkeit mit dem Impuls-Echo-Verfahren zu bestimmen, werden die in Tabelle 2 dargestellten Messwerte aufgenommen. Die letzten beiden Messwerte ergeben sich dabei durch einen A-Scan der der gestapelten Zylinder 2 und 3 bzw. 1 und 2. Anhand dieser Daten wird eine lineare Ausgleichsrechnung mit Python durchgeführt.

Tabelle 2: Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren aufgenommene Messwerte.

Nummer	Ausgesendeter Impuls U_A / V	Startzeit t_0 / μ s	Reflektierter Impuls U_R / V	Laufzeit t_R / μ s
1	1,29	6,0	1,36	23,7
2	1,30	6,5	1,33	30,5
3	1,27	5,6	1,32	59,8
4	1,29	6,0	1,18	76,9
5	1,29	6,0	0,33	89,1
2+3	1,29	6,0	0,07	79,5
1+2	1,29	6,0	1,32	47,1

Die Theoriekurve ergibt sich analog zu Gleichung (2) und wird um einen Term für die sogenannte Anpassungsschicht d der Sonden ergänzt zu

$$2l = c_{\text{Acryl}} \cdot t + d, \quad (3)$$

wobei l die Strecke innerhalb der Zylinder, t die Laufzeit und c_{Acryl} die zu bestimmende Schallgeschwindigkeit in Acryl darstellen. Die Parameter errechnen sich zu

$$c_{\text{Acryl, IE}} = (2828, 24 \pm 254, 17) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{IE}} = (15, 21 \pm 14, 52) \text{ mm}.$$

Die Messwerte sowie die Ergebnisse der Ausgleichsrechnung sind in Abbildung 5 graphisch dargestellt.

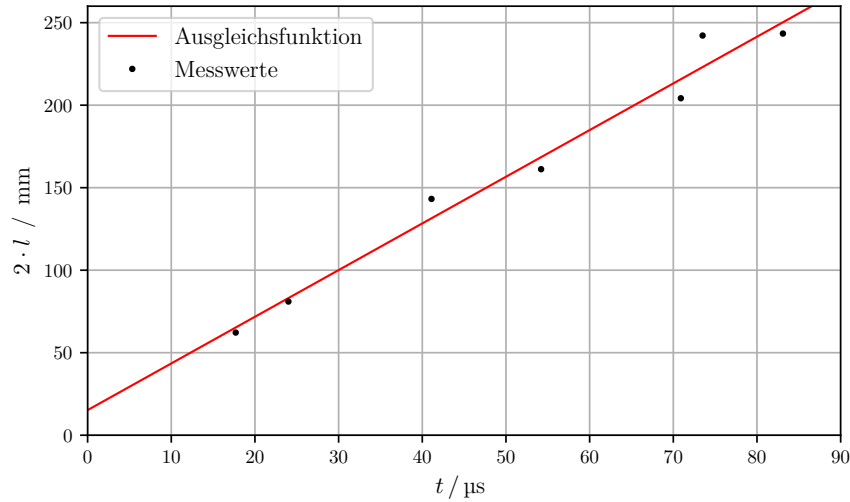


Abbildung 5: Graphische Darstellung der Zylinderlängen gegen die ermittelten Laufzeiten und Ergebnisse der Ausgleichsrechnung beim Impuls-Echo-Verfahren.

4.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels Durchschallungs-Verfahrens

Außerdem wird die Schallgeschwindigkeit in Acryl mithilfe des Durchschallungsverfahrens bestimmt. Die dazu aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 3 dargestellt. Erneut wird eine Ausgleichsrechnung mit Python durchgeführt. Die Theoriekurve ist analog zur zuvor verwendeten Gleichung (3), wobei allerdings der Faktor zwei vor l wegfällt, da die Zylinder nur einmal durchlaufen werden. Die Parameter ergeben sich zu

$$c_{\text{Acryl, D}} = (2727, 39 \pm 82, 22) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{D}} = (-2, 75 \pm 2, 57) \text{ mm}$$

Die Messwerte sowie die Ergebnisse der Ausgleichsrechnung sind in Abbildung 6 graphisch dargestellt.

Tabelle 3: Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Durchschallungs-Verfahren aufgenommene Messwerte.

Nummer	Ausgesendeter Impuls U_A / V	Startzeit $t_0 / \mu\text{s}$	Empfangener Impuls U_E / V	Laufzeit $t_E / \mu\text{s}$
1	0,79	0,3	1,35	12,8
2	0,79	0,3	1,36	15,8
3	0,79	0,3	1,35	31,2
4	0,79	0,3	1,34	39,2
5	0,79	0,3	1,34	45,4

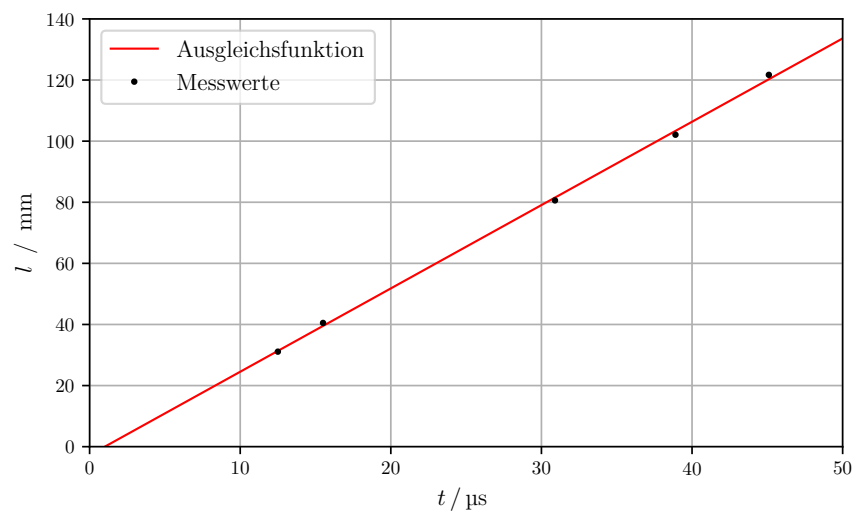


Abbildung 6: Graphische Darstellung der Zylinderlängen gegen die ermittelten Laufzeiten und Ergebnisse der Ausgleichsrechnung beim Durchschallungsverfahren.

4.3 Bestimmung der Dämpfung von Acryl für Ultraschallwellen

Zur Bestimmung der Dämpfung von Acryl gegenüber Ultraschallwellen werden die ersten fünf in Tabelle 2 dargestellten Messwerte verwendet. Die anderen beiden Messwerte für die gestapelten Zylinder werden hier nicht berücksichtigt. Um eine lineare Ausgleichsrechnung durchführen zu können, wird die Theoriekurve nach Gleichung (1) zu

$$\log \frac{U}{U_0} = -\alpha \cdot 2l$$

aufgestellt, wobei U_0 die ausgesendete und U die reflektierte Amplitude darstellen, $2l$ wiederum die zurückgelegte Strecke innerhalb der Zylinder, also ihre doppelte Länge, bedeutet und α der gesuchte Dämpfungsparameter ist. Die Ausgleichsrechnung ergibt

$$\alpha = (5,665 \pm 5,504) \text{ m}^{-1}.$$

Die graphische Darstellung sowie die berechnete Ausgleichsgerade sind in Abbildung 7 zu finden.

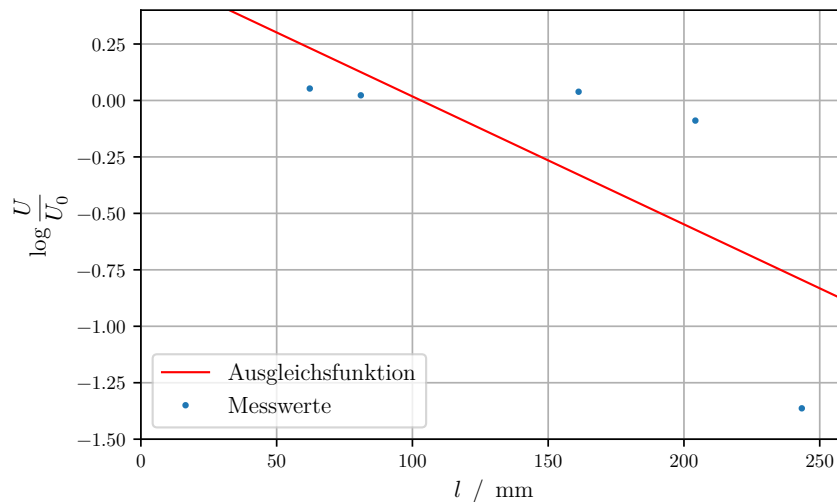


Abbildung 7: Halblogarithmische Darstellung der Amplitudenverhältnisse gegen die zurückgelegte Strecke innerhalb der Acrylzylinder.

4.4 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

Bei der Untersuchung des in Abbildung 4 schematisch dargestellten Augenmodells werden vier Peaks beobachtet. Diese lassen sich der Iris, dem Ein- und Austritt aus der Linse und der Retina zuordnen und sind in Tabelle 4 dargestellt. Zur Berechnung der Abstände muss berücksichtigt werden, dass die Schallgeschwindigkeiten der durchschallten Materialien unterschiedlich sind. Die Schallgeschwindigkeit im Kammerwasser, das in der vorderen

Augenkammer enthalten ist, wird mit der Schallgeschwindigkeit in Wasser angenähert, da es zu 98 % aus Wasser besteht [3]. Die Schallgeschwindigkeit beträgt $c_{\text{Wasser}} = 1484 \text{ m/s}$ [4]. Die Schallgeschwindigkeit innerhalb der Linse beträgt $c_{\text{Linse}} = 2500 \text{ m/s}$ und innerhalb des Glaskörpers $c_{\text{GK}} = 1410 \text{ m/s}$ [2]. Damit ergeben sich über Gleichung (2) die Abstände

Tabelle 4: Bei der biometrischen Untersuchung eines Augenmodells aufgenommene Peaks.

Nummer Peak	Laufzeit $t / \mu\text{s}$	Laufzeitdifferenz $\Delta t / \mu\text{s}$	Amplitude U / V
0	5,8	—	1,26
1	11,4	4,40	1,27
2	16,0	4,60	1,32
3	23,2	7,20	1,26
4	72,8	49,60	1,22

$$\begin{aligned}
 d_{\text{vord. AK}} &= 3,24 \text{ mm} \\
 d_{\text{Linse}} &= 9,00 \text{ mm} \\
 d_{\text{Retina}} &= 34,97 \text{ mm} .
 \end{aligned}$$

5 Diskussion

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse diskutiert und mit Theoriewerten verglichen. Die Abweichungen werden dabei nach

$$x_{\text{proz. Abw.}} = \frac{x_{\text{exp}}}{x_{\text{theo}}} - 1$$

berechnet. Zunächst werden die Bestimmungen der Schallgeschwindigkeiten diskutiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Aus den sehr geringen Abweichungen wird

Tabelle 5: Abweichungen der bestimmten Schallgeschwindigkeiten.

Verfahren	exp. Wert $c_{\text{exp}} / \text{m/s}$	theoret. Wert [1] $c_{\text{theo}} / \text{m/s}$	proz. Abw. %
Impuls-Echo	2828,40	2730	3,60
Durchschallung	2727,39	2730	0,09

deutlich, dass eine Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in einem Material mittels Ultraschall sehr gut gelingt. Besonders bei dem Durchschallungsverfahren ergibt sich eine nahezu verschwindend geringe Abweichung.

Der Absorptionskoeffizient von Acryl ergab sich zu $\alpha_{\text{Acryl, exp}} = (5,665 \pm 5,504) \text{ m}^{-1}$. Dies entspricht einer Abweichung von 90,06 % vom Theoriewert $\alpha_{\text{Acryl, theo}} = 57 \text{ m}^{-1}$. Wie

sich aus Abbildung 7 erkennen lässt, müssen bei der Messung Fehler aufgetreten sein, da die Messwerte keinen linearen Abfall aufweisen und damit nicht der Theorie entsprechen. Bei der Betrachtung der Amplituden lässt sich auch kein konsistenter Verlauf erkennen, sodass davon auszugehen ist, dass deren Messung durch Störeffekte oder Ablesefehler verfälscht worden ist.

Die Ergebnisse der biometrischen Untersuchung des Augenmodells sowie deren Abweichungen sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Messung der Länge der vorderen Augenkammer

Tabelle 6: Ergebnisse und Abweichungen der biometrischen Untersuchung eines Augenmodells.

Struktur	exp. Länge $l_{\text{exp}} / \text{mm}$	theoret. Länge [5] $l_{\text{theo}} / \text{mm}$	proz. Abw. %
vordere Augenkammer	3,24	3,05	6,22
Linse	9,00	4,00	125,00
Retina	34,97	16,40	113,23

scheint aufgrund der geringen Abweichung erfolgreich verlaufen zu sein. Die große Abweichung der anderen beiden Abstände ist vermutlich dadurch zu erklären, dass die falschen Peaks auf dem Bildschirm des Auswertungsprogramms abgelesen worden sind. Diese waren nicht eindeutig zuzuordnen und es waren Nebenmaxima zu erkennen, sodass insbesondere der letzte Peak, der der Retina zugeordnet worden ist, eventuell eine bereits doppelt reflektierte Wellenfront gewesen sein könnte.

Abschließend lässt sich also sagen, dass sich ein Ultraschall-Messaufbau sehr gut zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Materialien verwenden lässt. Zur Auflösung komplexerer Strukturen wie z.B. einem Auge sind allerdings ein sehr präzises Messgerät und ein erfahrener Bediener erforderlich, da ansonsten keine sinnvollen Ergebnisse geliefert werden.

Literatur

- [1] OLYMPUS Corporation. *Schallgeschwindigkeiten im Material*. 5. Juni 2019. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>.
- [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zum Versuch US1*. 4. Juni 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf>.
- [3] Franz Gerrler. *Kammerwasser (Humor aquosus)*. 5. Juni 2019. URL: <https://www.medizin-kompakt.de/kammerwasser>.
- [4] *Schallgeschwindigkeit*. 5. Juni 2019. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schallgeschwindigkeit>.
- [5] Dieter Suter. *Das Auge*. 5. Juni 2019. URL: https://qnap.e3.physik.tu-dortmund.de/suter/Vorlesung/MedizinphysikI_13/9_Auge.pdf.