

Versuch US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Stefanie Hilgers
Stefanie.Hilgers@tu-dortmund.de

Lara Nollen
Lara.Nollen@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.06.2018

Abgabe: 19.06.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Zielsetzung	3
1.2	Theorie	3
1.3	Piezokristalle	4
1.4	Laufzeitmessungen	4
1.4.1	Durchschallungs-Verfahren	4
1.4.2	Impuls-Echo-Verfahren	5
1.5	Vorbereitung	5
2	Durchführung	6
2.1	Geräteeinstellung	6
2.2	Impuls-Echo-Verfahren: Bestimmung der Dämpfung	6
2.3	Impuls-Echo-Verfahren: Schallgeschwindigkeitsbestimmung	6
2.4	Durchschallungsverfahren: Schallgeschwindigkeitsbestimmung	6
2.5	Impuls-Echo-Verfahren: Analyse und Cepstrum	7
2.6	Impuls-Echo-Verfahren: Untersuchung des Augenmodells	7
3	Auswertung	7
3.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit	7
3.2	Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren	8
3.3	Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren	10
3.4	Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Durchschallungsverfahren	11
3.5	Spektrale Analyse und Cepstrum	11
3.6	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	12
4	Diskussion	14
	Literatur	15

1 Theorie

1.1 Zielsetzung

Mit dem Impuls-Echo-Verfahren soll die Dämpfung und die Schallgeschwindigkeit in Acryl, sowie Abmessungen im Auge bestimmt werden. Mit dem Durchschallungs-Verfahren wird ebenfalls die Schallgeschwindigkeit in Acryl gemessen. Außerdem wird das Spektrum sowie das Cepstrum der Ultraschallsonde ermittelt.

1.2 Theorie

Ultraschall wird häufig in der Medizin für biometrische Messungen, als auch in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung angewendet.

Als Ultraschallwellen werden Schallwellen mit einer Frequenz von ca. 20 kHz bis 1 GHz bezeichnet. Sie liegen oberhalb der menschlichen Hörschwelle, der menschliche Hörbereich liegt zwischen 16 Hz und 20 kHz. Schallwellen unterhalb der Hörschwelle werden als Infraschall bezeichnet, Schallwellen mit Frequenzen über 1 GHz werden Hyperschall genannt. Schallwellen breiten sich durch Druckschwankungen fort und beschreiben eine longitudinale Welle mit

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

Dabei wird die akustische Impedanz (oder Schallkennwiderstand) als $Z = c \cdot \rho$ definiert. Dabei ist c die Schallgeschwindigkeit im Material und ρ die Dichte des Materials. In vielen Bereichen wie zum Beispiel bei der Reflexion und Brechung verhalten sich Schallwellen wie elektromagnetische Wellen, eine Ausnahme bildet die Schallgeschwindigkeit. Sie ist aufgrund von Dichte- und Druckschwankungen materialabhängig. So hängt die Schallgeschwindigkeit in einer Flüssigkeit von ihrer Dichte ρ und der Kompressibilität κ ab:

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

In Gasen und Flüssigkeiten breitet sich Schall immer als Longitudinalwelle aus. In Festkörpern sind aufgrund der Schubspannungen neben longitudinalen Wellen auch transversale Wellen möglich. Hier ist die Schallgeschwindigkeit von dem Elastizitätsmodul E abhängig:

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

Dabei ist zu beachten, dass sich longitudinale und transversale Geschwindigkeit unterscheiden. Grundsätzlich gilt: In Festkörpern ist die Schallgeschwindigkeit richtungsabhängig. Die Intensität einer Schallwelle nimmt exponentiell mit der Strecke ab, da ein Teil der Energie durch Absorption verloren geht. Diese Abnahme ist von dem Absorptionskoeffizienten α abhängig:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha x). \quad (4)$$

Luft absorbiert den Schall sehr gut, hat also einen hohen Absorptionskoeffizienten α . Deshalb wird zwischen Schallgeber und Probe ein Kontaktmittel verwendet (z.B. Wasser/Gel).

Trifft eine Schallwelle auf eine Oberfläche wird ein Teil der Welle reflektiert, der Reflexionskoeffizient R lässt sich mit Hilfe der akustischen Impedanz Z der beiden angrenzenden Materialien berechnen:

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

Der transmittierte Anteil T lässt sich über $T = 1 - R$ berechnen.

1.3 Piezokristalle

Ultraschallwellen werden häufig durch den reziproken piezo-elektrischen Effekt erzeugt. Dazu wird ein piezoelektrischer Kristall in einem elektrischen Wechselfeld zu Schwingungen angeregt, wodurch Ultraschallwellen ausgesendet werden. Dazu muss eine polare Achse des Kristalls in Richtung des elektrischen Feldes zeigen. Wird die Resonanzfrequenz erreicht, wenn Anregungsfrequenz und Eigenfrequenz übereinstimmen, können sehr hohe Schallamplituden und Schallenergiedichten erreicht werden.

Um die Ultraschallwellen zu detektieren können ebenfalls Piezokristalle verwendet werden. Dann regen die eintreffenden Schallwellen den Kristall zu Schwingungen an.

Am häufigsten werden Quarze als Piezokristalle verwendet, sie haben nur einen schwachen piezoelektrischen Effekt, doch verfügen über gleichbleibende physikalische Eigenschaften.

1.4 Laufzeitmessungen

1.4.1 Durchschallungs-Verfahren

Für dieses Verfahren wird ein Ultraschallsender und -empfänger benötigt, wie in Abbildung 1 zu sehen.

Durchschallungs-Verfahren

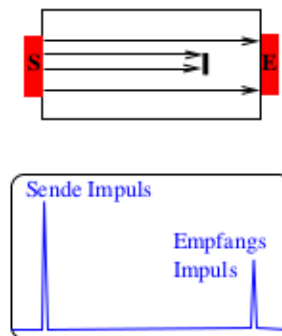


Abbildung 1: Das Durchschallungsverfahren.

[3]

Der Sender sendet einen kurzzeitigen Schallimpuls aus, dieser wird am anderen Ende der Probe durch den Empfänger aufgefangen. Falls sich Fehler oder Unebenheiten in der Probe befinden, wird nur eine abgeschwächte Intensität am Empfänger gemessen. Es ist keine Aussage über die Lage der Fehlerstelle möglich.

1.4.2 Impuls-Echo-Verfahren

Bei diesem Verfahren, welches in Abbildung 2 dargestellt ist, fungiert der Ultraschallsender auch als Empfänger.

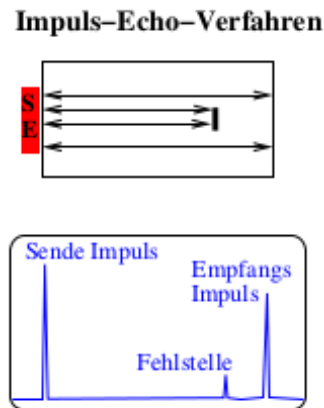


Abbildung 2: Das Impuls-Echo-Verfahren
[3]

Der ausgesendete Impuls wird an einer Grenzfläche reflektiert und nach seiner Rückkehr vom Empfänger registriert. Ist die Schallgeschwindigkeit konstant kann über die Laufzeit t die Lage der Fehlerstelle über

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

bestimmt werden. Sind Fehlerstellen vorhanden, dann kann die Höhe des Echos Informationen über die Größe der Fehlerstelle liefern.

1.5 Vorbereitung

Zur Vorbereitung auf den Versuch wurden materialspezifische Werte recherchiert, diese sind in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1: Werte für die Schallgeschwindigkeit und die akustische Impedanz.

	Luft	dest. Wsser	Blut	Knochen	Acryl
Schallgeschwindigkeit c in m/s	330	1480	1570	3500	2730
akustische Impedanz in $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$	43	$1,49 \cdot 10^5$	$1,66 \cdot 10^5$	$6,12 \cdot 10^5$	3,2
[4], [5], [2], [1]					

2 Durchführung

Für die Durchführung stehen mehrere Acrylzyylinder in verschiedenen Größen zur Verfügung, außerdem zwei Ultraschallsonden und ein Computer mit entsprechendem Messprogramm. Die Acrylzyylinder werden alle mit einer Schieblehre ausgemessen.

2.1 Geräteeinstellung

Zunächst wird an ein beliebiger Acrylzyylinder die Sonde angelegt, dabei wird Wasser als Kontaktmittel verwendet. Nun werden die erhaltenen Impulse auf dem Computerbildschirm sichtbar gemacht und die dazugehörige Spannung V sowie die Laufzeiten t zweier reflektierter Impulse. Außerdem wird der Zylinder mit einer Schieblehre vermessen. Nachdem das Echoskop so eingestellt wurde, dass der zweite reflektiert Impuls zwischen 1 und 1,2 V liegt wird die Graphik gespeichert.

2.2 Impuls-Echo-Verfahren: Bestimmung der Dämpfung

Nun wird erneut die Sonde an den Acrylzyylinder angelegt, Wasser dient als Kontaktmittel. Aus dem auf dem Bildschirm angezeigten Diagramm wird die Amplitude des ausgesendeten und reflektierten Impulses gemessen. Für sechs weitere Zylinder wird diese Messung wiederholt.

2.3 Impuls-Echo-Verfahren: Schallgeschwindigkeitsbestimmung

Nachdem die Sonde wieder mit Wasser an den Acrylzyylinder angekoppelt wurde, wird aus dem Diagramm die Laufzeit des Echos abgelesen. Für sieben weitere Zylinder wird äquivalent vorgegangen. (Die Zylinder werden dafür aufeinander gestapelt.)

2.4 Durchschallungsverfahren: Schallgeschwindigkeitsbestimmung

Für diese Messung wird der Zylinder waagrecht in die Halterung eingespannt, die beiden Sonden werden ebenfalls in die Halterungen eingespannt und von beiden Seiten an den Boden/Deckel des Zylinders herangeführt. Es werden für alle Zylinder die Laufzeiten t , die der Schall zum Durchlaufe des Zylinders benötigt, gemessen. Sie werden aus dem Diagramm am Bildschirm abgelesen.

2.5 Impuls-Echo-Verfahren: Analyse und Cepstrum

Ein 40 mm hoher Zylinder wird auf zwei Acrylscheiben gestellt. An den Zylinder wird die Sonde angekoppelt und die Verstärkung wird so eingestellt, dass 3 Mehrfachreflexionen zu sehen sind. Das so erhaltene Diagramm wird gespeichert. Durch Wählen der entsprechenden Funktionen des Analyseprogramms wird das Spektrum sowie das Cepstrum der Sonde dargestellt und gespeichert.

2.6 Impuls-Echo-Verfahren: Untersuchung des Augenmodells

Um die Abstände im Auge anhand eines Modells zu bestimmen, wird Gel auf die Ultraschallsonde gegeben und nun vorsichtig auf die Hornhaut des Auges gesetzt. Im Abbildung 3 ist Skizze des menschlichen Auges zu sehen. Die Sonde wird leicht bewegt, bis ein Echo, dass durch die Rückwand der Retina erzeugt wird zu sehen ist.

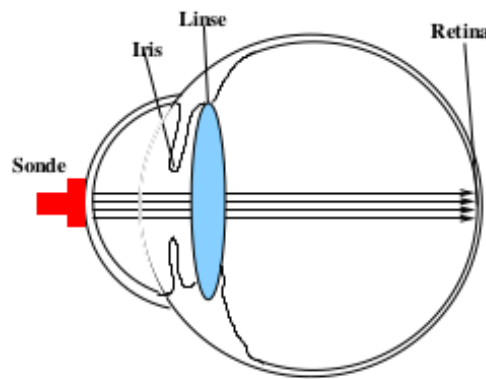


Abbildung 3: Skizze des menschlichen Auges.
[3]

3 Auswertung

3.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Die Messwerte zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl sind in Tabelle 2 abzulesen.

Tabelle 2: Messwerte und Ergebniss der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Länge l des Zylinders [mm]	U_1 [V]	t_1 [μ s]	U_2 [V]	t_2 [μ s]	Δt [μ s]	c [m/s]
31,0	1,335	24,0	1,096	46,9	22,9	2707,42

Hieraus ergibt sich durch die Gleichung

$$c = 2 \frac{1}{\Delta t} \quad (7)$$

eine Schallgeschwindigkeit von 2707,42 m/s. Die zugehörige Graphik ist in Abbildung 4 zu sehen.

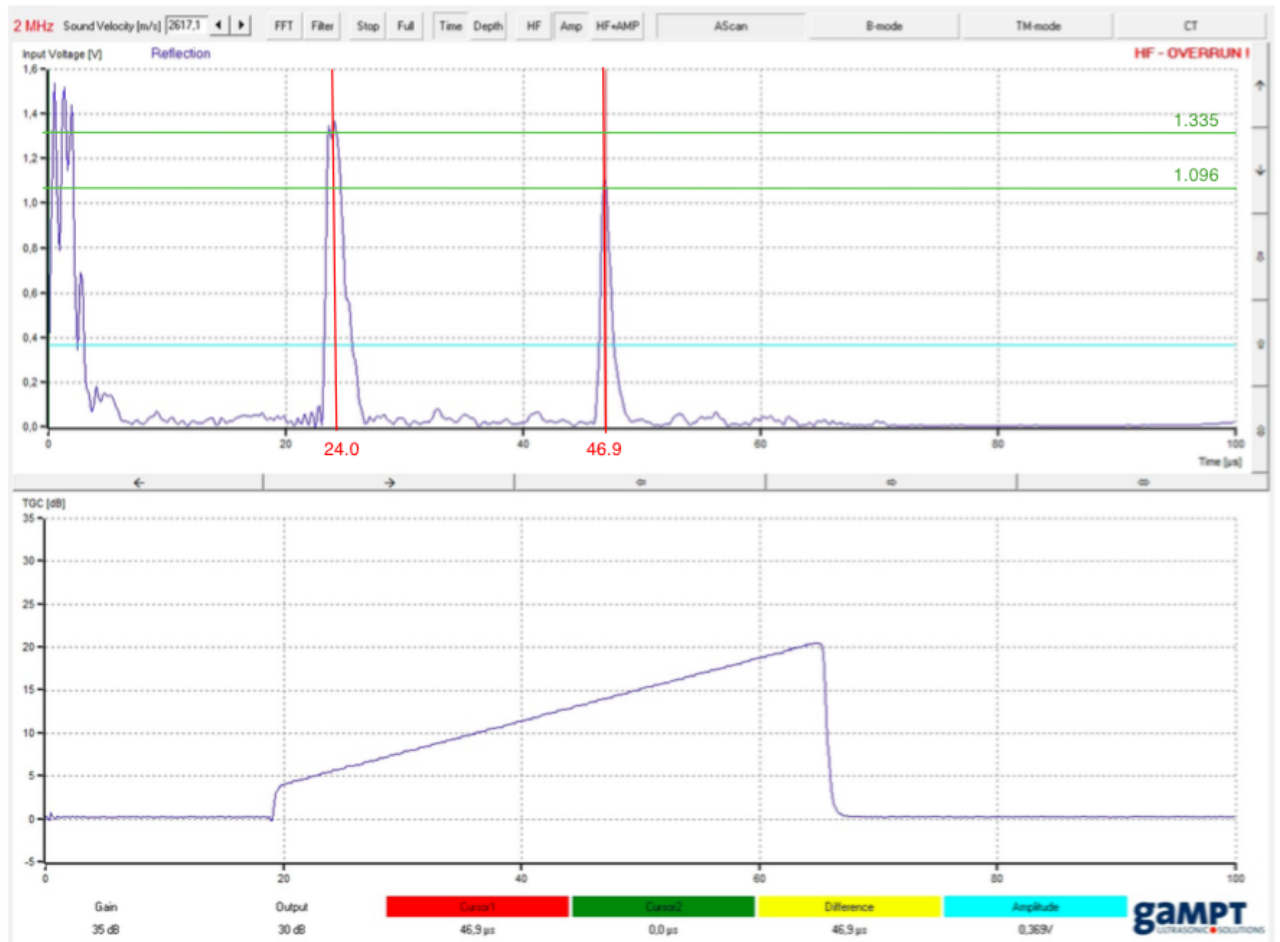


Abbildung 4: Graphik zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit.

3.2 Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Die gemessenen Daten zur Bestimmung der Dämpfung befinden sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Messwerte zur Bestimmung der Dämpfung

Zylinder	$U_0[\text{V}]$	$U_{\text{Puls1}}[\text{V}]$	$l [\text{mm}]$
1	1,523	1,303	31,0
2	1,501	1,329	40,0
3	1,527	0,761	61,0
1+2	1,521	0,234	71,0
4	1,531	0,284	80,0
5	1,522	0,075	101,0
6	1,522	0,050	120,0

Durch Umstellung der Gleichung 4 ergibt sich die Gleichung

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = x \cdot \alpha, \quad (8)$$

sodass sich die Dämpfungskonstante durch eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$y = a \cdot x + b \quad (9)$$

mit den Wertepaaren aus $\ln(\frac{I}{I_0})$ und $2 \cdot l$ ergibt. Die Werte sind zusammen mit der Ausgleichsgrade in Abbildung 5 dargestellt.

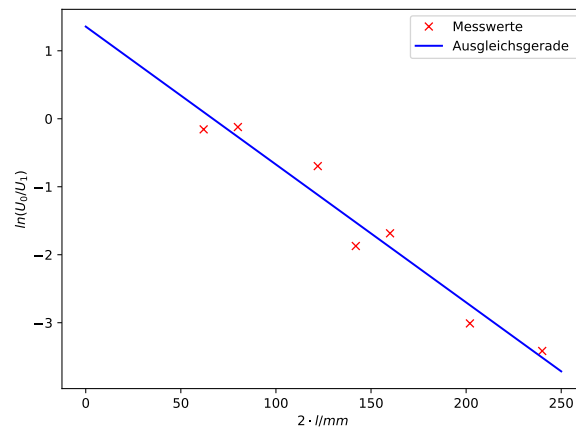


Abbildung 5: Wertepaare und Ausgleichsgrade

Hieraus ergeben sich die Parameter:

$$a = 0,020 \pm 0,002 \frac{1}{\text{mm}}$$
$$b = 1,4 \pm 0,3$$

Die zu bestimmende Dämpfungskonstante ergibt sich somit insgesamt zu

$$\alpha = 0,020 \pm 0,002 \frac{1}{\text{mm}}.$$

3.3 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Die gemessenen Wertepaare sind, zusammen mit den daraus errechneten Schallgeschwindigkeiten, in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Messwerte und daraus errechnete Schallgeschwindigkeit

Zylinder	$t[\mu s]$	$l[mm]$	$c[m/s]$
1	23,8	31,0	2605,04
2	30,1	40,0	2657,81
3	46,2	61,0	2640,69
1+2	53,0	71,0	2679,25
4	60,0	80,0	2666,67
1+3	69,2	92,0	2658,96
5	76,5	101,0	2640,52
1+4	82,7	111,0	2684,40
6	88,8	120,0	2702,70

Aufgrund der Anpassungsschicht weisen die Schallgeschwindigkeiten einen systematischen Fehler auf, welcher sich durch eine lineare Ausgleichsrechnung durch Gleichung 9 bestimmen lässt, wobei für die x-Werte die Länge der Zylinder verwendet werden und für die y-Werte die Durchlaufzeit. Die Wertepaare sind zusammen mit der Ausgleichsgeraden in Abbildung 6 dargestellt.

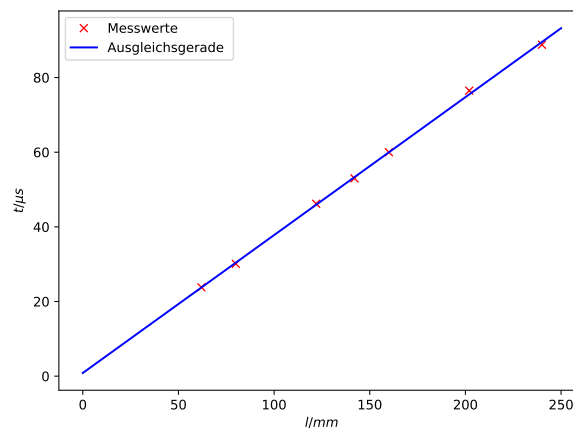


Abbildung 6: Wertepaare und Ausgleichsgrade

Hieraus ergeben sich die Parameter:

$$a = 0,370 \pm 0,004 \frac{\mu s}{mm}$$

$$b = 0,85 \pm 0,6 \mu s$$

Der y-Achsenabschnitt gibt hierbei die Zeit zum zweimaligen Durchlaufen der Anpassungsschicht an. Durch Division mit 2 und Multiplikation mit der Schallgeschwindigkeit $c_w = 1480 \text{ m/s}$ in destilliertem Wasser lässt sich somit die Dicke der Anpassungsschicht bestimmen, wodurch sich insgesamt die Werte

$$t_a = (0,43 \pm 0,03) \mu\text{s}$$

$$l_a = (0,64 \pm 0,04) \text{ mm}$$

ergeben.

3.4 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Durchschallungsverfahren

Die gemessenen Werte befinden sich zusammen mit den daraus errechneten Schallgeschwindigkeiten in Tabelle 5.

Tabelle 5: Messwerte zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mittels Durchschallungsverfahren

Zylinder	$t[\mu\text{s}]$	Länge [mm]	$c[\text{m/s}]$
1	13,3	31,0	2330,83
2	16,2	40,0	2469,14
3	24,1	61,0	2531,12
4	30,8	80,0	2597,40
5	39,0	101,0	2589,74
6	45,2	120,0	2654,87

3.5 Spektrale Analyse und Cepstrum

In Abbildung 7 sind das Spektrum und Cepstrum der Mehrfachreflexionen dargestellt.

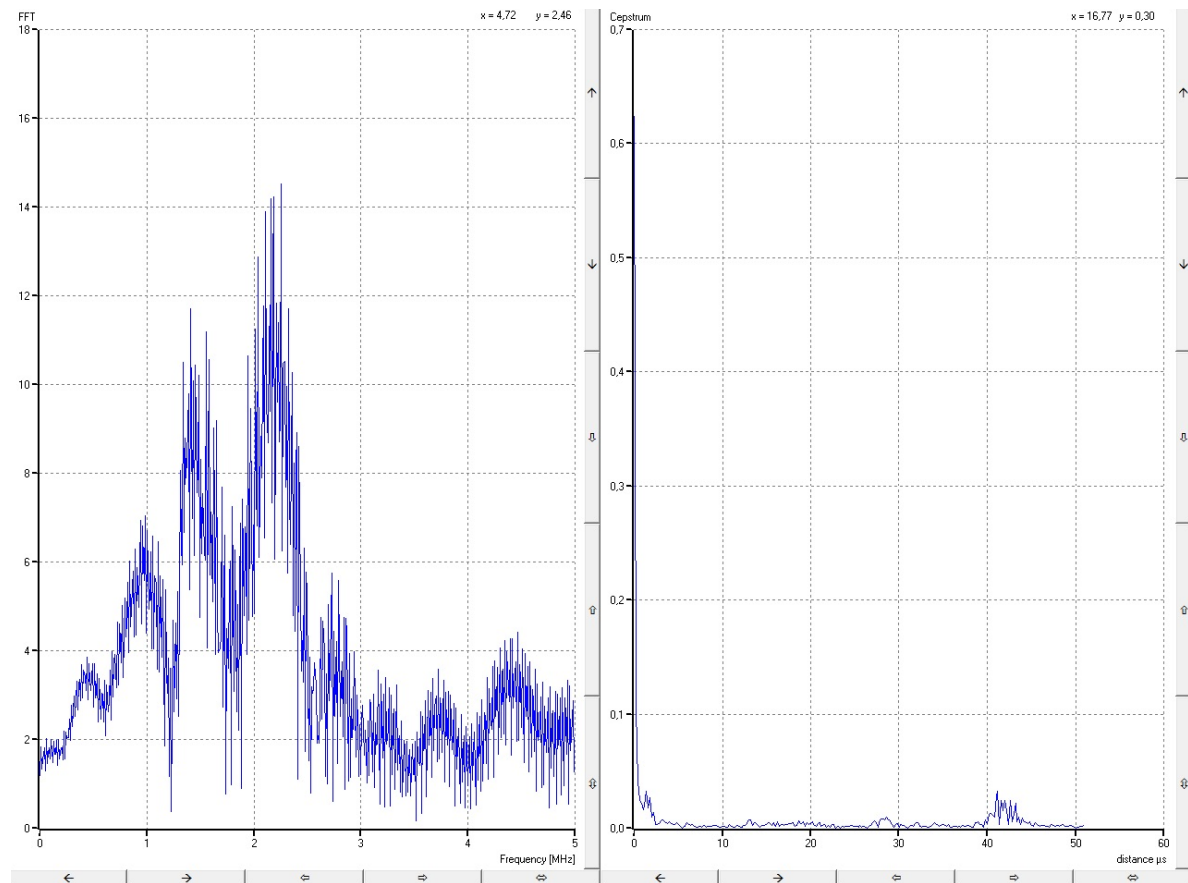


Abbildung 7: Spektrum und Cepstrum der Mehrfachreflexionen

3.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

Die Messung des Augenmodells ist in Abbildung 8 dargestellt.

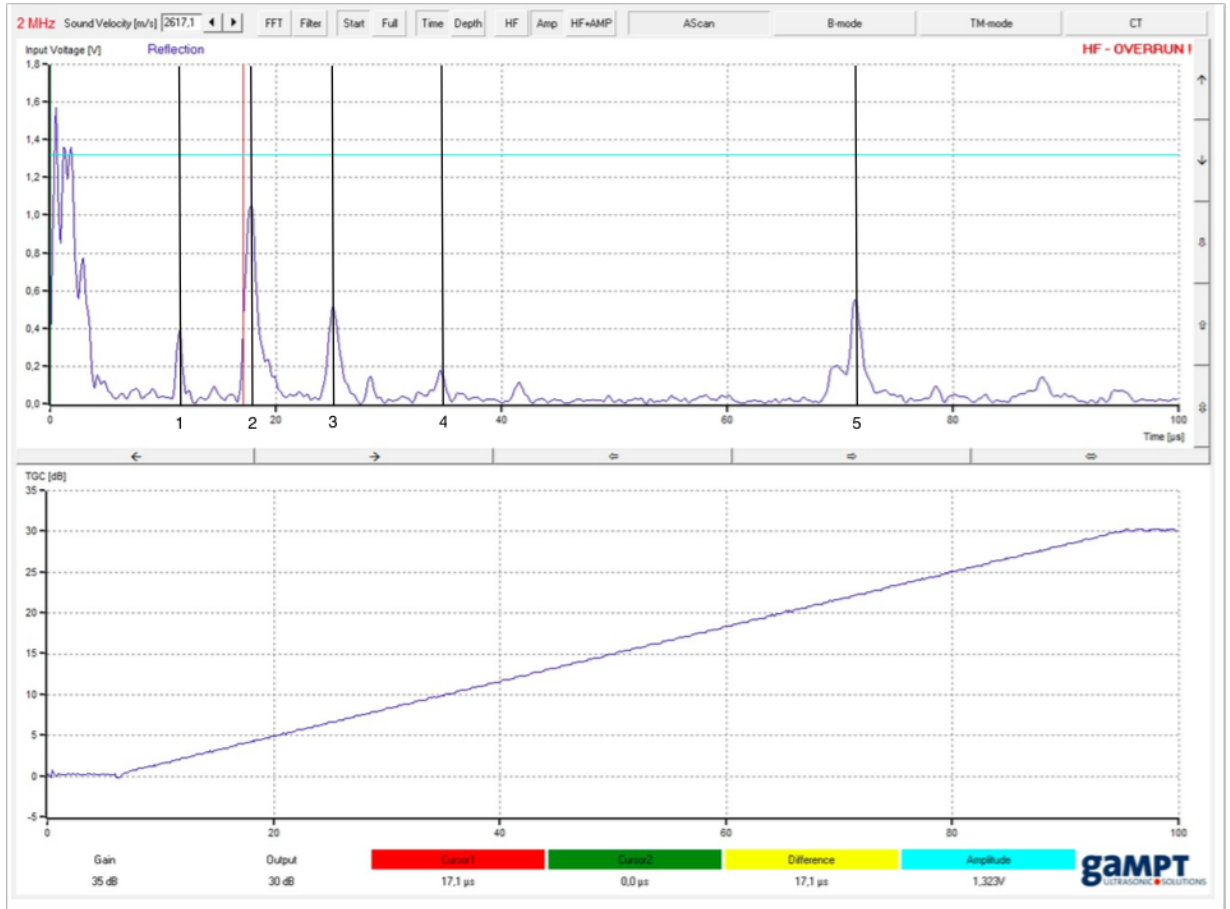


Abbildung 8: Messung des Auges

Die Impulse liegen dabei bei den Zeiten:

Tabelle 6: Messwerte des Augenmodells

Impuls	$t[\mu s]$
1	11,4
2	17,7
3	25,0
4	34,6
5	71,4

Der Impuls 1 kommt hierbei durch die Reflexion am Beginn der Linse zustande, sodass sich dieser Abstand durch die Gleichung

$$s_1 = \frac{1}{2} \cdot c_{GK} \cdot t_1, \quad (10)$$

ergibt, wobei die Schallgeschwindigkeit c_{GK} in der Glaskörperflüssigkeit 1410 m/s beträgt. Dieser Abstand beträgt somit

$$s_1 = 8,037 \text{ mm} .$$

Der zweite Impuls ist bedingt durch Reflexion am Ende der Linse, sodass sich durch die Formel

$$s_2 = \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot (t_2 - t_1) \quad (11)$$

mit der Schallgeschwindigkeit $c_L = 2500 \text{ m/s}$ die Breite der Linse bestimmen lässt. Diese beträgt somit

$$s_2 = 7,875 \text{ mm} .$$

Die nächsten beiden Impulse kommen durch Mehrfachreflexionen zustanden, sodass diese keine weiteren Informationen über das Augenmodell liefern. Der fünfte Impuls entsteht durch Reflexion an der Rückwand des Auges, sodass sich der Abstand vom Ende der Linse bis zum Ende des Auges durch

$$s_3 = \frac{1}{2} \cdot c_{GK} \cdot (t_5 - t_2) \quad (12)$$

zu

$$s_3 = 37,859 \text{ mm}$$

ergibt. Der Gesamtdurchmesser des Auges beträgt somit

$$D = s_1 + s_2 + s_3 = 53,771 \text{ mm} .$$

4 Diskussion

Die errechnete Schallgeschwindigkeit von 2707,42 m/s weist eine relative Abweichung von 0,83 % im Vergleich zum Theoriewert von 2730 m/s aus der Vorbereitung auf, was für eine recht genaue Messung spricht. Diese Abweichung wurde durch die Formel

$$\frac{|\text{Wert}_{\text{Theorie}} - \text{Wert}_{\text{Messung}}|}{\text{Wert}_{\text{Theorie}}}$$

berechnet.

Die Ergebnisse der beiden verschiedenen Schallgeschwindigkeitsbestimmungen befinden sich zusammen mit der relativen Abweichung vom Theoriewert von 2730 m/s in Tabelle 7.

Tabelle 7: Messwerte zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mittels Durchschallungsverfahren

Zylinder	$c_{\text{Impuls-Echo}}$ [m/s]	relative Abweichung in %	c_{Durch} [m/s]	relative Abweichung in %
1	2605,04	4,58	2330,83	14,6
2	2657,82	2,64	2469,14	9,56
3	2640,69	3,27	2531,12	7,28
4	2666,67	2,32	2597,40	4,86
5	2640,52	3,27	2589,74	5,14
6	2702,70	1,00	2654,87	2,75

Die Abweichungen können dadurch erklärt werden, dass die Messung durch die Anpassungsschicht aus destilliertem Wasser leicht verfälscht wird. Die mit dem Durchschallungsverfahren gemessenen Schallgeschwindigkeiten sind stets etwas kleiner als die mit dem Impuls-Echo verfahren gemessenen Schallgeschwindigkeiten und weisen einen größeren relativen Fehler auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei dem Durchschallungsverfahren der Zylinder vom Schall nur einmal durchlaufen wird, anstatt zweimal wie beim Impuls-Echo-Verfahren. Dadurch ist die durchlaufene Strecke und die gemessene Zeit deutlich kürzer und der systematische Fehler durch die Anpassungsschicht fällt stärker ins Gewicht.

Literatur

- [1] *Akustische Impedanz Acryl*. URL: http://www.karldeutsch.de/KD_GENERAL_Tabelle_AcMatSpec_DE_M1.html.
- [2] *Akustische Impedanz von Luft, Wasser, Blut und Knochen*. URL: http://www.uniklinik-duesseldorf.de/fileadmin/Datenpool/einrichtungen/klinik_und_poliklinik_fuer_strahlentherapie_und_radioonkologie_id30/dateien/ultraschall_eine_einfuehrung.pdf.
- [3] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu V US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*.
- [4] *Schallgeschwindigkeit Acryl*. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>.
- [5] *Schallgeschwindigkeit von Luft, Wasser, Blut und Knochen*. URL: <https://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/01/01H139/t4.pdf>.