

US1 Grundlagen der Ultraschalltechnik

Alina Landmann, alina.landmann@tu-dortmund.de
Jannine Salewski, jannine.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.06.2018

Abgabe: 19.06.2018

TU Dortmund - Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
3 Durchführung	4
4 Auswertung	5
4.1 Messung der Schallgeschwindigkeit	5
4.2 Bestimmung der Dämpfung	6
4.3 Messung der Schallgeschwindigkeit mit dem Impuls-Echo-Verfahren	7
4.4 Messung der Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungsverfahren . .	8
4.5 Spektrale Analyse und Cepstrum	8
4.6 Ausmessung des Augenmodels mittels Impuls-Echo-Verfahren	11
5 Diskussion	12
Literatur	13

1 Zielsetzung

Im Versuch werden mit Hilfe zweier grundlegender Funktionsweisen der Ultraschalltechnik, dem Impuls-Echo- und dem Durchschallungsverfahren die Schallgeschwindigkeit in Acryl und einem medizinischen Modell untersucht.

2 Theorie

Als Ultraschall wird Schall mit einer Frequenz von 20 kHz bis 1 GHz beschrieben. Diese Schallfrequenzen kommen in der Medizin in Diagnostik und Therapie zum Einsatz. Schall ist eine longitudinale Welle, die in einem Medium mittels Druckschwankungen weitergeleitet wird:

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

In dieser Gleichung beschreibt Z die akustische Impedanz, welche durch die Dichte ρ und die Schallgeschwindigkeit c im vorliegenden Stoff beschrieben wird:

$$Z = c \cdot \rho$$

Bei Schallwellen ist die Phasengeschwindigkeit auf Grund von Dichte und Druckschwankungen materialabhängig. Sie zeigen also im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen Dispersion. Alle anderen grundlegenden Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen zeigen Schallwellen ebenso. Im Versuch ist lediglich die Schallweiterleitung in Festkörpern von Bedeutung, welche durch folgenden Zusammenhang zwischen E , dem Elastizitätsmodul und der Dichte ρ beschrieben wird:

$$c_{\text{FK}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Hierbei ist zu beachten, dass c_{FK} für transversale und longitudinale Wellen unterschiedlich aussieht. Breiten sich Schallwellen in einem Festkörper aus, so verlieren diese durch Absorption exponentiell an Energie. Somit wird die Intensität einer Welle durch folgenden Zusammenhang beschrieben:

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

In dieser Gleichung beschreibt α den Absorptionskoeffizienten, I_0 die Anfangsintensität und x die zurückgelegte Strecke. Der Absorptionskoeffizient ist für Luft sehr groß, weshalb im Versuch darauf zu achten ist, dass stets ein Kontaktmittel zwischen Ultraschallkopf und zu untersuchendem Körper verwendet wird. Bei dem Kontaktmittel handelt es sich um Hydrogel oder bidestilliertes Wasser. Treffen Schallwellen auf Grenzflächen, so werden sie reflektiert. Die Reflexion kann durch den Reflexionskoeffizienten R beschrieben werden, für dessen Berechnung die Impedanzen der beiden Materialien, die die Grenzfläche bilden, wichtig sind:

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

Der Reflexionskoeffizient gibt das Verhältnis zwischen einlaufender und reflektierter Welle an. Folglich ergibt sich der Transmissionskoeffizient zu $T = 1 - R$. Um Ultraschallwellen zu erzeugen, wird der Piezoelektrische Effekt verwendet, wobei ein piezoelektrischer Kristall (Quarz) mittels eines elektrischen Feldes in Schwingung versetzt wird, wodurch dieser Ultraschallwellen emittiert. Das elektrische Feld übt eine Kraft auf die einzelnen Ladungen im Kristallgitter aus, welches sich daraufhin zusammenzieht oder ausdehnt und somit beginnt zu schwingen. Umgekehrt können Schallwellen das Kristallgitter in Schwingung versetzen, wodurch sich der Ladungsschwerpunkt verschiebt und folglich eine Spannung anliegt. So kann der piezoelektrische Effekt ebenso zur Detektion von Ultraschallwellen genutzt werden. Mittels Ultraschall ist es so möglich Aussagen über die Beschaffenheit von Körpern zu treffen, ohne diese eröffnen zu müssen. Dies kann auf zwei verschiedene Arten geschehen. Zum einen, indem von einem Sender ein kurzer Schallimpuls durch das Medium ausgesendet wird, welcher von einem Detektor auf der anderen Seite des zu untersuchenden Körpers aufgefangen wird. Mögliche Fehlstellen sind durch eine Abschwächung des Signals zu erkennen. Die Lokalisation dieser ist jedoch nicht möglich. Dieses Verfahren wird Durchschallungsverfahren genannt und ist schematisch in Abbildung 1 zu sehen.

Durchschallungs-Verfahren

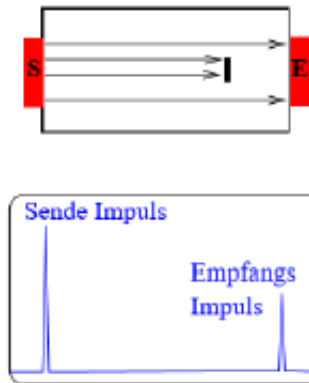


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Durchschallungsverfahrens.[Dor]

Das zweite Verfahren, das bei der Unteruschung von Medien zum Einsatz kommt, ist das Impuls-Echo-Verfahren. Hierbei fungiert der Schallkopf sowohl als Sender als auch als Empfänger, der an den Grenzflächen emittierten Ultraschallwellen. Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, ist es mittels dieser Methode möglich, etwaige Fehlstellen zu detektieren. Deren Größe kann durch die Höhe der gemessenen Reflexion abgeschätzt werden. Ist die Schallgeschwindigkeit im Medium bekannt, so kann mittels folgender Formel ebenfalls die Lage der Fehlstelle ermittelt werden:

$$s = \frac{1}{2} c t$$

Impuls-Echo-Verfahren

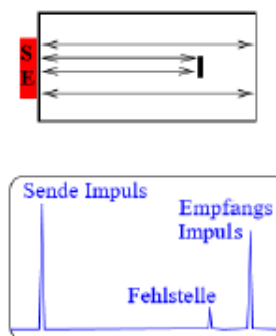


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Impuls-Echo-Verfahrens. [Dor]

3 Durchführung

Zur Durchführung des Versuchs steht ein Echoskop, eine Ultraschallsonde für die Impuls-Echo-Methode, sowie eine weitere für das Durchschallungsverfahren bereit. Beide Ultraschallsonden haben 2 MHz. Am Echoskop kann das Ultraschallsignal verstärkt werden, um Amplitudenmaxima deutlicher darstellen zu lassen. Bei der Einstellung des Echoskops ist darauf zu achten, dass zwischen den beiden Scan-Einstellungen mit einem Kippschalter zwischen "REFLEC." und "TRANS." gewechselt werden kann. Außerdem wird zur Auswertung der Daten ein PC verwendet, wodurch die Daten direkt mit der FFT (Fast Fourier Transformation) und dem Cepstrum verglichen werden können. Die zu untersuchenden Körper sind Acrylzyylinder mit verschiedener Höhe und das Modell eines menschlichen Auges. Zu Beginn des Versuchs wird mit dem Impuls-Echo-Verfahren ein A-Scan (Amplitudenscan) eines Zylinders aufgenommen, der auf einem Papiertuch steht. Das Signal wird für diese Messung so verstärkt, dass die Amplitude des ersten Peaks zwischen 1 und 1,2 V liegt. Die eine Oberfläche des Zylinderdeckels wird mit bidestilliertem Wasser benetzt und eine Ultraschallsonde aufgesetzt. Mittels dem Auswertungsprogramm auf dem PC wird ein Plot erstellt, in dem die Laufzeit gegen die Spannung aufgetragen wird. Die erscheinenden ersten Maxima werden in ihrer Höhe und ihrem Abstand zueinander vermessen. Daraus lässt sich die Höhe des Zylinders ermitteln. Die Höhe und der Abstand der Maxima können mit Cursors direkt im Plot auf dem PC exakt analysiert werden. Anschließend wird die Verstärkung komplett ausgeschaltet, um die Messergebnisse der folgenden beiden Messungen nicht zu verfälschen. Dann wird die vorher beschriebene Messung für sechs weitere Zylinder mit unterschiedlicher Höhe durchgeführt. Alle Zylinder werden ebenfalls mit einer Schieblehre vermessen, sodass dann die experimentell ermittelten Höhen mit den tatsächlich gemessenen verglichen werden können. Außerdem kann mit den Messergebnissen die Schallgeschwindigkeit in den Acrylzyindern ermittelt werden. Gleichzeitig werden nacheinander für die vermessenen Zylinder die Lage aller auf dem Plot dargestellten Maxima ermittelt und somit die Dämpfung des Ultraschallsignals ermittelt.

Im anschließenden Versuchteil wird die Durchlaufzeit des Ultraschallsignals für einen Zylinder mit Hilfe des Durchschallungsverfahrens ermittelt und somit die Schallgeschwindigkeit im Acrylzyylinder ermittelt. Hierzu wird der Kippschalter am Echoskop auf "TRANS." umgelegt, ein Zylinder auf eine Führungsschiene gelegt und an dessen beiden Enden jeweils eine Ultraschallsonde angelegt. Eine als Sender, eine als Empfänger. Es werden abermals im Plot am PC die Peaks und deren Abstand zueinander vermessen, woraus sich die Laufzeit des Ultraschallsignals im Zylinder ergibt. Anschließend werden die Ergebnisse aus dem Impuls-Echo-Verfahren mit dem Durchschallungsverfahren verglichen.

Im nächsten Teil des Versuchs werden wieder im Impuls-Echo-Verfahren Mehrfachimpulse aufgenommen, indem zwei unterschiedlich dicke Acrylplatten aufeinander gelegt werden, auf die ein ca. 4 cm hoher Acrylzyylinder gestellt wird, an den mit bidestilliertem Wasser eine Ultraschallsonde gekoppelt wird. Die Verstärkung wird so eingestellt,

dass im Plot drei Mehrfachechos zu erkennen sind. Wird im Analyseprogramm dann die Eindringtiefe (depth in mm) gegen die Spannung aufgetragen, so können die Dicken der Platte bequem abgelesen werden, wenn im Porgramm die zuvor ermittelte Schallgeschwindigkeit für Acryl eingestellt wurde. Sodann werden die Marker so gesetzt, dass mittels der FFT ein Spektrum und ein Cepstrum des Mehrfachechos angezeigt werden. Der entstandene Plot wird gespeichert, um ihn dann zu analysieren.

Im letzten Teil des Versuchs wird mittels des Impuls-Echo-Verfahrens und dem A-Scan ein Augenmodell biometrisch vermessen. Hierzu wird auf das Auge ein Hydrogel aufgetragen, sodass die Ultraschallsonde auf dem Auge vorsichtig mit wenig Druck bewegt werden kann. Sitzt die Sonde mittig auf der Hornhaut des Modells, so sind im Plot fünf Maxima zu erkennen, deren Laufzeiten vermessen werden, wodurch dann die Abmessungen des Auges bestimmt werden können. Es ist zu beachten, dass die Schallgeschwindigkeit in der Linse von der im Glaskörper unterschiedlich ist, was bei der Berechnung der Abmessung des Auges zu beachten ist.

4 Auswertung

4.1 Messung der Schallgeschwindigkeit

Im ersten Teil des Versuchs soll die Schallgeschwindigkeit c_{Acryl} mit Hilfe der Ultraschallmessung bestimmt werden. Hierzu werden die zeitlichen Abstände der Peaks der Reflektion gemessen und mit der Länge des Zylinders mit dem Weg-Zeit-Gesetz in Relation gesetzt

$$c_{\text{Acryl}} = \frac{2l_1}{\Delta t}$$

Die Messwerte und die berechnete Schallgeschwindigkeit für Acryl sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Messung der Peaks mit Verstärkung ist in Abbildung 3 zu sehen.

Tabelle 1: Messwerte zur Messung der Schallgeschwindigkeit von Acryl.

Länge des Zylinders l_1 / cm	Peak 1		Peak 1		Zeitdifferenz t / μs	Schallgeschwindigkeit c_{Acryl} m/s
	t_1 / μs	U_1 / V	t_2 / μs	U_2 / V		
$4,025 \pm 0,005$	30,4	1,300	60,0	0,139	29,6	$2719,6 \pm 3,4$

Mit Hilfe der berechneten Schallgeschwindigkeit kann nun die Länge des Zylinders mit einer Ultraschallsonde gemessen werden, indem die Schallgeschwindigkeit in das Programm eingetragen wird und auf den Modus DEPTH umgestellt wird. Der entstehende Peak kann nun abgemessen werden, daraus folgt für die Länge des Zylinders

$$l_1 = 4,13 \text{ cm}$$

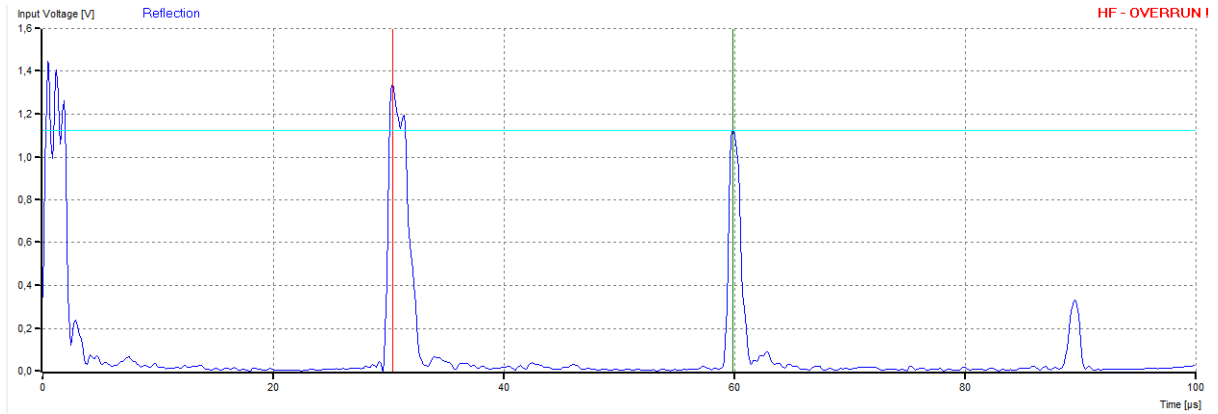


Abbildung 3: Messung der Schallgeschwindigkeit in Acryl (mit Verstärkung).

4.2 Bestimmung der Dämpfung

Bei der Berechnung der Dämpfung des Schalls wird die Eigenschaft der Proportionalität der gemessenen Spannung zur Intensität der Welle ausgenutzt, also $I \propto U$. Aus den gemessenen Amplituden der reflektierten Ultraschallwelle und der Länge des Zylinders (siehe Tabelle 2), wobei dieser von dem Schall zwei mal durchlaufen wird, lässt sich eine exponentielle Regression der Form

$$U(l) = U_0 \exp(-\alpha l)$$

durchführen. Diese Regression liefert die Werte für U_0 und α :

$$U_0 = (3,0 \pm 0,8) \text{ V}$$

$$\alpha = (11,5 \pm 2,8) \frac{1}{\text{m}}$$

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung der Dämpfung, Impuls-Echo-Verfahren: Wobei U die Spannung der reflektierten Welle ist und l die Länge des Zylinders.

U / V	l / cm
1,367	4,025
0,055	12,05
0,645	6,16
1,300	3,10
0,063	10,20
0,412	8,04
0,928	7,08

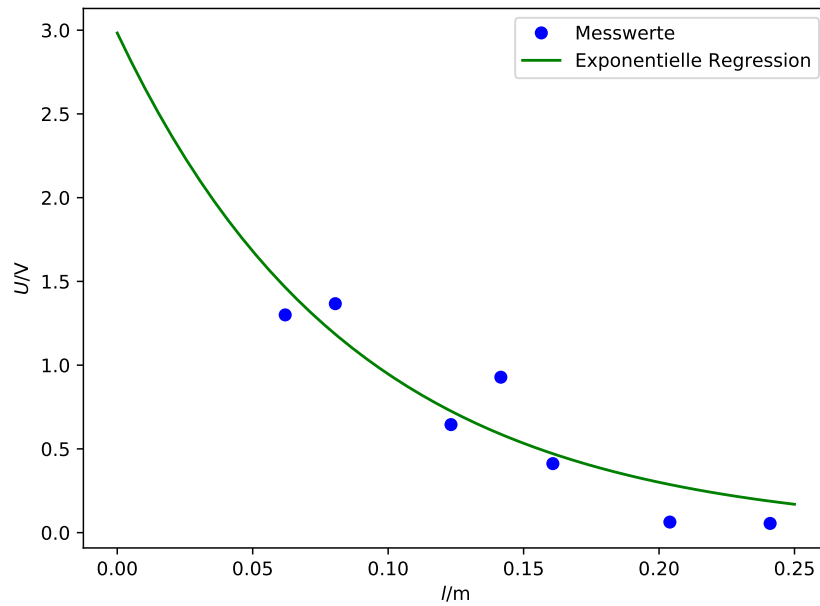


Abbildung 4: Exponentielle Regression der Dämpfung, Impuls-Echo-Verfahren.

4.3 Messung der Schallgeschwindigkeit mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Zur Messung der Schallgeschwindigkeit mittels Impuls-Echo-Verfahren wird aufgrund systematischer eine lineare Regression der Form

$$\frac{t}{2} = l \cdot c_1 - l_{0,1}$$

durchgeführt, wobei l die Länge des Zylinders, c_1 die Schallgeschwindigkeit, $l_{0,1}$ die Dicke der Grenzschicht und t die zurückgelegte Zeit der Ultraschallwellen beschreibt. Diese Regression liefert die Werte für c_1 und $l_{0,1}$:

$$c_1 = (2727 \pm 21) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$l_{0,1} = (0,7 \pm 0,6) \text{ mm}$$

Die Messwerte sind in Tabelle 2 aufgelistet und mit der Regression in Abbildung 5 dargestellt. Bei der Berechnung der Regression wurde ein stark abweichender Messwert nicht mit einbezogen, da der Zylinder bei der Messung durch zwei kleinere Zylinder zusammengesetzt wurde und deswegen die Grenzschicht aus Wasser zwischen den Zylindern zu starken Fehlern in der Berechnung führt.

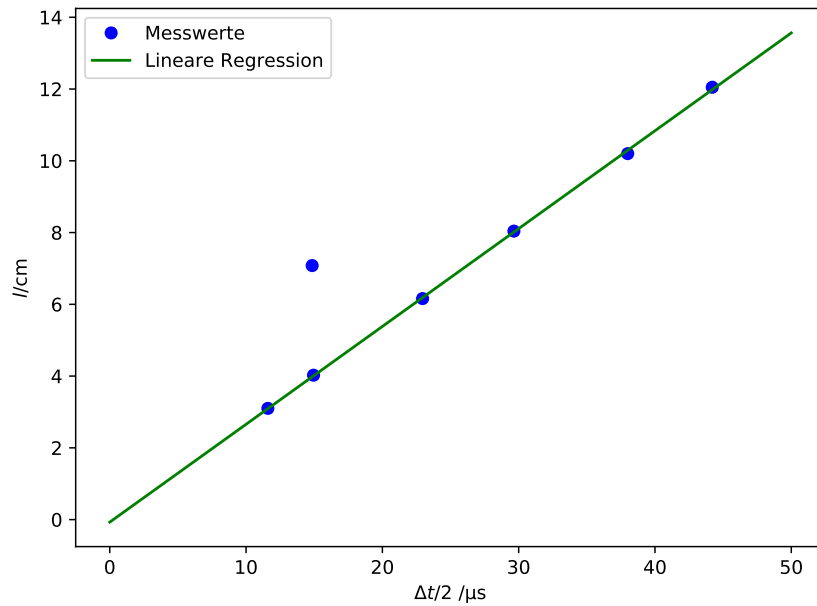


Abbildung 5: Messung der Schallgeschwindigkeit mittels Impuls-Echo-Verfahren.

4.4 Messung der Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungsverfahren

Die Berechnung der Schallgeschwindigkeit mittels des Durchschallungsverfahrens ist ähnlich, wie die des Impuls-Echo-Verfahrens. Der einzige Unterschied ist hierbei die Zeit, da der Schall nur einmal durch den Zylinder geht, muss hier nicht die halbe Zeit genommen werden. Es wird also eine lineare Regression der Form

$$t = l \cdot c_2 - l_{0,2}$$

durchgeführt, wobei l die Länge des Zylinders, c_2 die Schallgeschwindigkeit, $l_{0,2}$ die Dicke der Grenzschicht und t die Zeit beschreibt, die der Schall durch das Medium benötigt. Diese Regression liefert die Werte

$$c_2 = (2711 \pm 30) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$l_{0,1} = (2,4 \pm 0,9) \text{ mm}$$

Die Messwerte und die Regression sind in 6 abgebildet. Die Messwerte sind in Tabelle 3 aufgelistet.

4.5 Spektrale Analyse und Cepstrum

Zur Messung der Dicke der Platten wird die Schallgeschwindigkeit der Messung am Anfang eingestellt und in den Modus Depth umgeschaltet. Hierbei wird direkt die Dicke

Tabelle 3: Messwerte zur Messung der Schallgeschwindigkeit mittels Durchschallungsverfahren.

$t / \mu\text{s}$	l / cm
12,6	3,1
15,4	4,025
30,5	8,04
38,9	10,20
45,1	12,05
23,6	6,16

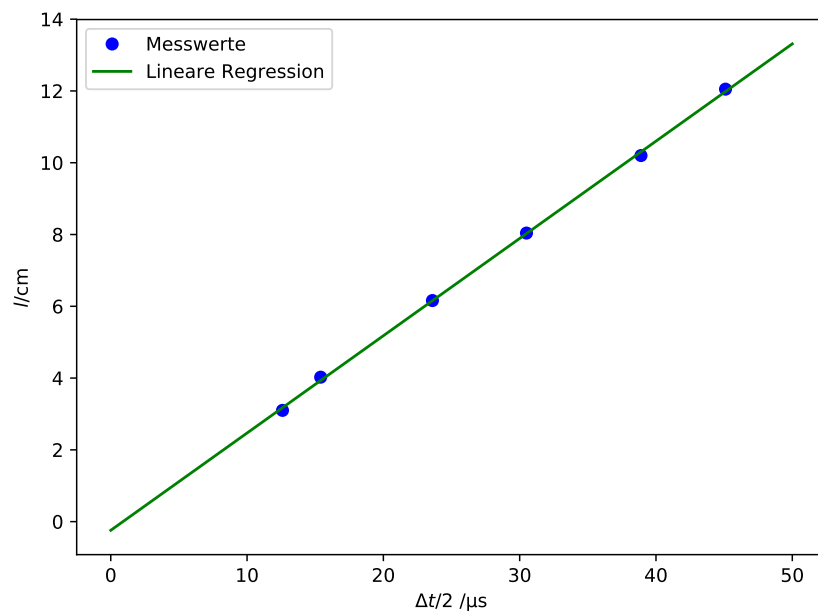


Abbildung 6: Messung der Schallgeschwindigkeit mittels Durchschallungsverfahren.

ausgemessen, indem die Differenz der Peaks gemessen wird. Für die Dicke der Platten ergibt sich

$$d_1 = 0,61 \text{ cm}$$

$$d_2 = 1,15 \text{ cm}$$

Tabelle 4: Messwerte zur Bestimmung der Dicke der Acrylplatten.

	Peak 1 d_1 / mm	Peak 2 d_2 / mm	Dicke d / mm
Zylinder	0,6	40,9	40,3
Platte 1	40,9	47,0	6,1
Platte 2	47,0	58,5	11,5

Außerdem wird für diesen Versuchsteil ein FFT (Fast-Fourier-Transformation) durchgeführt. Dieses spaltet das entstandene Spektrum in ein Frequenzspektrum auf. Das Cepstrum ist in Abbildung 7 zu sehen.

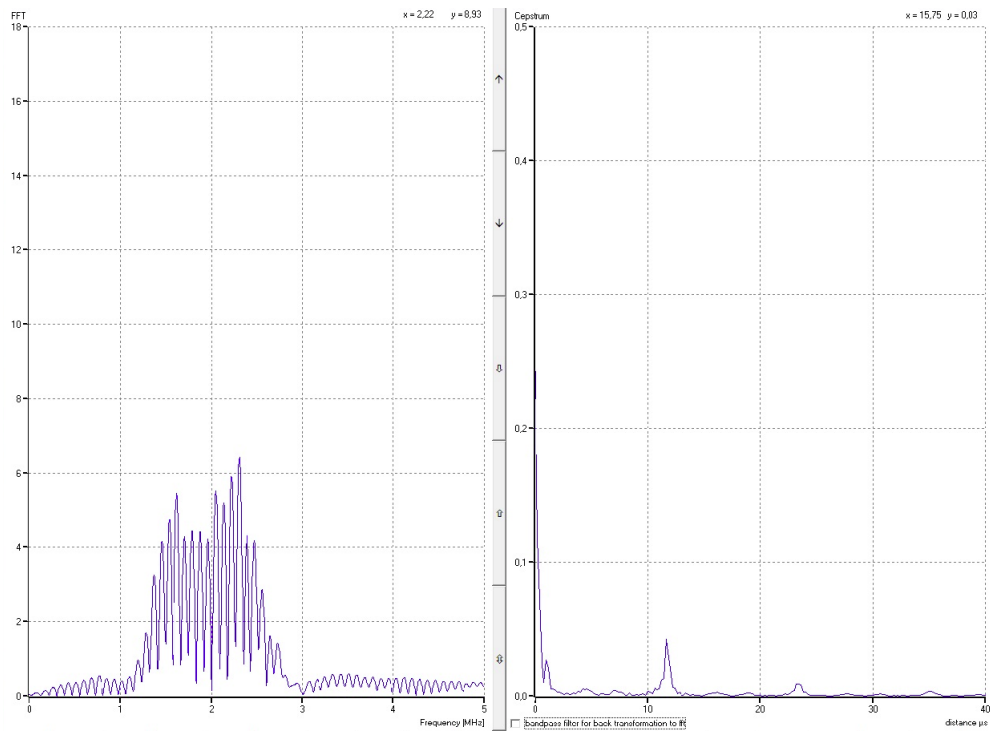


Abbildung 7: Cepstrum.

4.6 Ausmessung des Augenmodells mittels Impuls-Echo-Verfahren

Zur Vermessung des Augenmodells werden die Zeiten t berechnet, die der Schall durch den jeweiligen Bereich benötigt. Hierbei muss beachtet werden, dass erneut das Impuls-Echo-Verfahren verwendet wird und der Schall durch die Reflektion zweimal durch den jeweiligen Bereich läuft, deswegen muss die berechnete Zeit halbiert werden. Die Schallgeschwindigkeit in der Glaskörperflüssigkeit beträgt $c_{\text{GK}} = 1410 \text{ m/s}$ und in der Linse $c_{\text{L}} = 2500 \text{ m/s}$ [Dor]. Die aus dem Diagramm 8 abgelesenen Werte sind in Tabelle 5 aufgelistet. Aus diesen Werte folgt für den Bereich von der Hornhaut bis zur Iris:

$$\begin{aligned}\Delta t_1 &= 10,9 \mu\text{s} \\ l_1 &= \Delta t_1 \cdot c_{\text{GK}} = 7,68 \text{ mm}\end{aligned}$$

Der Abstand zwischen der Iris und der Linse:

$$\begin{aligned}\Delta t_2 &= 5,8 \mu\text{s} \\ l_2 &= \Delta t_2 \cdot c_{\text{GK}} = 4,09 \text{ mm}\end{aligned}$$

Der Dicke der Linse:

$$\begin{aligned}\Delta t_3 &= 6,5 \mu\text{s} \\ l_3 &= \Delta t_3 \cdot c_{\text{L}} = 8,13 \text{ mm}\end{aligned}$$

und die Dicke des Glaskörpers:

$$\begin{aligned}\Delta t_4 &= 48,6 \mu\text{s} \\ l_4 &= \Delta t_4 \cdot c_{\text{GK}} = 34,97 \text{ mm}\end{aligned}$$

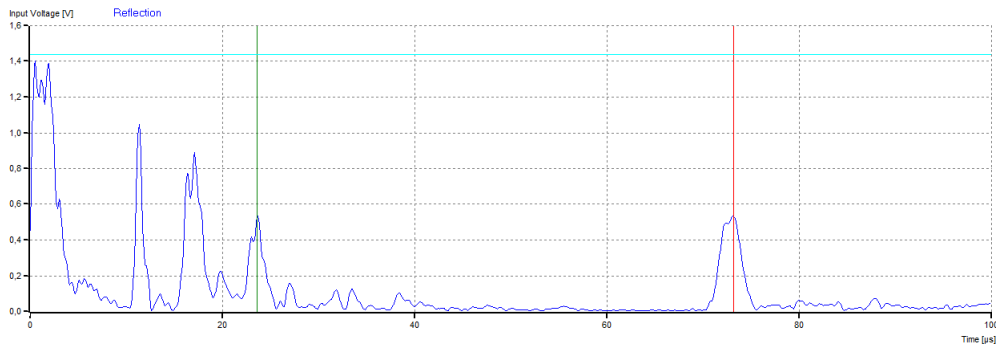


Abbildung 8: Vermessung des Auges mittels Impuls-Echo-Verfahren.

Tabelle 5: Daten zur Vermessung des Auges.

Amplitude	Zeit $t / \mu\text{s}$
A1	0,4
A2	11,3
A3	17,1
A4	23,6
A5	73,2

5 Diskussion

Im ersten Versuchsteil wurde der Zylinder einmal mit der Schieblehre und einmal per Impuls-Echo-Verfahren ausgemessen. Hierbei entstanden Unterschiede von bis zu 1,83 %.

Tabelle 6: Messung des Zylinders.

Schieblehre l_1 / mm	Impuls-Echo-Verfahren l_1 / mm	Abweichung $p / \%$
$40,25 \pm 0,05$	41,3	1,83

Außerdem wurde bei dem Versuchsteil zur Messung der Schallgeschwindigkeit ein Acryl-zylinder verwendet, der aus zwei einzelnen mittels einer Wasserschicht zusammengesetzt wurde. Dies führt zu Verfälschungen der Messung, da der Schall eine kurze Strecke durch Wasser hindurch muss und für diese Strecke eine andere Schallgeschwindigkeit besitzt. Dieser Fehler wurde aber soweit minimiert, dass der entsprechende Wert für die Regression herausgenommen wurde. Dennoch wurde ein Fehler von maximal 0,7 % gemessen.

Tabelle 7: Messung des Zylinders.

Literaturwert $c / \text{m/s}$	Impuls-Echo-Verfahren $c_{\text{IEV}} / \text{m/s}$	Abweichung (IEV) $p_{\text{IEV}} / \%$	Durchschallungs-verfahren $c_{\text{DSV}} / \text{m/s}$	Abweichung (DSV) $p_{\text{DSV}} / \%$
2730	2727 ± 21	0,11	2711(30)	0,70

Literatur

- [Dor] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch US1 Grundlagen der Ultraschall-technik*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf> (besucht am 12.06.2018).