

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Julian Hochhaus
julian.hochhaus@tu-dortmund.de

Niko Salewski
niko.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 30.05.2017

Abgabe: 06.06.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Grundlagen	3
2.2	Messverfahren mit Ultraschall	3
3	Durchführung	4
3.1	Versuchsaufbau	4
3.2	Versuchsbeschreibung	4
4	Auswertung	5
4.1	Konfiguration des Messprogramms	5
4.2	Schallgeschwindigkeit über Impuls-Echo-Verfahren	7
4.3	Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungsverfahren	8
4.4	Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren	10
4.5	Spektrale Analyse und Cepstrum	11
4.6	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	13
5	Diskussion	14
	Literatur	16
6	Anhang	17

1 Zielsetzung

Im vorliegenden Versuch wird mithilfe verschiedener Messverfahren der Ultraschalltechnik die Schallgeschwindigkeit in Acryl bestimmt und schließlich zur Vermessung von Acrylplatten sowie zur Bestimmung der Innenabstände in einem Modell des menschlichen Auges verwendet.

2 Theorie

2.1 Grundlagen

Ultraschallwellen sind Schallwellen im Frequenzbereich von 20 kHz bis 1 GHz mit denen die Struktur von Materialien untersucht werden kann. Schallwellen können – wie elektromagnetische Wellen – reflektiert und gebrochen werden. Da sie sich aber aufgrund von Druckschwankungen im Raum fortbewegen, ist die Schallgeschwindigkeit c materialabhängig. Bei Flüssigkeiten zum Beispiel hängt die Schallgeschwindigkeit von der Kompressibilität κ und der Dichte ρ ab. Des Weiteren wird Schall von dem Material absorbiert, sodass die Schallamplitude exponentiell mit dem Ort x abfällt;

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

Die Absorptionsstärke wird vom materialabhängigen Absorptionskoeffizienten α festgelegt. Luft beispielsweise absorbiert Schall sehr stark, sodass in der Praxis ein Kontaktmittel an der Grenzfläche von dem untersuchten Material aufgetragen wird. Wenn Schall auf eine Grenzfläche trifft, wird ein Teil reflektiert und ein Teil transmittiert.

Ultraschall kann beispielsweise mit dem piezo-elektrischen Effekt erzeugt werden. Durch ein elektrisches Wechselfeld kann ein piezo-elektrischer Kristall – z.B. Quarze – zu Schwingungen angeregt werden. Wird der Kristall mit Schwingungen, die der Eigenfrequenz des Kristalls entsprechen, angeregt, werden Ultraschallwellen mit höherem Schalldruck ausgesandt. Piezokristalle können auch durch Wechselwirkung mit Schallwellen zu Schwingungen angeregt werden. Im Folgenden werden die grundlegenden Messverfahren mit Ultraschall erläutert.

2.2 Messverfahren mit Ultraschall

Messungen mit Ultraschallwellen werden durch Laufzeitmessungen realisiert. Es lässt sich zwischen zwei elementaren Messverfahren unterscheiden: Bei dem Durchschallungsverfahren wird ein Impuls am Anfang des Probestücks mit einem Ultraschallsender ausgesendet und am Ende des Probestücks wird die abgeschwächte Intensität des Impulses gemessen (vgl. Abbildung 1). Dieses Messverfahren bringt keine Aussage über die Lage einer Fehlstelle in einem Material.

Das Impuls-Echo-Verfahren hingegen ermöglicht eine Aussage über die Fehlstelle des Probestücks. Hierbei wird der ausgesandte Impuls nach einer Reflexion am Ende des Probestücks am Anfang des Probestücks gemessen (vgl. Abbildung 1). Liegt eine Fehlstelle

im Probestück vor, wird der Schallimpuls an dieser reflektiert und die verkürzte Laufzeit t legt die Lage der Fehlstelle gemäß

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

fest.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

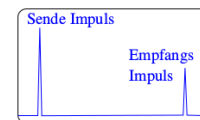
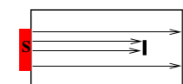
Der Versuchsaufbau besteht aus einem Ultraschallechoskop, an dessen Ausgänge zwei Ultraschallsonden mit 2 MHz gekoppelt sind, und einem Rechner zur Datenaufnahme und -analyse.

An das Ultraschallechoskop sind zwei Ultraschallsonden angeschlossen, mithilfe derer sich sowohl eine Impuls-Echo-Messung, als auch eine Durchschallmessung realisieren lässt. Am Rechner werden die gemessenen Daten mittels des Programms „Echoview“ ausgewertet.

Hierbei ist „Echoview“ in der Lage, vier verschiedene Diagramme darzustellen. Im linken oberen Graphen wird der A-Scan dargestellt, also die Amplitude gegen die Zeit aufgetragen. Der linke untere Graph stellt die gewählte Verstärkung dar. Die Verstärkung lässt sich am Ultraschallechoskop über die Drehknöpfe zur Laufzeit- bzw. tiefenabhängigen Verstärkung (TGC; Time Gain Control) und ebenso über die Verstärkung des Outputs und der Empfindlichkeit der Sonden regulieren. Zu beachten ist, dass eine Verstärkung nur gewählt werden darf, wenn die auszuwertende Messreihe nicht zur Untersuchung der Amplitudenhöhe dient.

Die beiden rechten Graphiken sind das berechnete Spektrum der Messdaten (FFT), bzw. ihr Cepstrum. Erzeugte Graphiken und Messdaten können aus dem Programm heraus exportiert werden. Als zu untersuchende Versuchsobjekte stehen Acrylzyylinder verschiedener Länge, Acrylplatten unterschiedlicher Dicke sowie das Modell eines menschlichen Auges im Maßstab 3:1 zur Verfügung.

Durchschallungs-Verfahren



Impuls-Echo-Verfahren

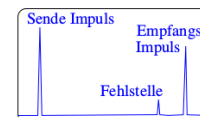
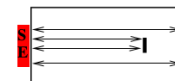


Abbildung 1: Prinzipielle Darstellung der Messverfahren. [2]

3.2 Versuchsbeschreibung

Zu Beginn der Messung werden die verwendeten Acrylzyylinder ebenso wie die Acrylplatten mit einer Schiebelehre vermessen. Über einen Drehschalter lässt sich das Messverfahren am Ultraschallechoskop einstellen. Für das Impuls-Echo-Verfahren ist dieser Drehschalter

auf die Position 1/1, bzw. 2/2 zu drehen, je nachdem mit welcher Sonde die Messung durchgeführt wird.

Für das Durchschallungsverfahren wird der Modus 1/2 bzw. 2/1 gewählt. Eine Sonde ist hierbei jeweils der Sender und die andere Sonde dient als Empfänger. Für die Messung der Laufzeit mit dem Impuls-Echo Verfahren wird eine Sonde über bidestilliertes Wasser an einen Acrylzyylinder gekoppelt, welcher auf ein Papiertuch zu stellen ist, um Kratzer am Versuchsobjekt zu vermeiden.

In das Messprogramm ist zur Berechnung der Eindringtiefe die Schallgeschwindigkeit c nach den Literaturdaten, bzw. die durch eine Laufzeitmessung nach Formel (2) ermittelte Schallgeschwindigkeit einzutragen. Um Impulse eindeutiger identifizieren zu können, kann für Laufzeitmessungen die Amplitude über die Einstellung am Ultraschallechoskop verstärkt werden.

Die Messung mit dem Impuls-Echo-Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit soll für sieben verschiedene Zylinderlängen erfolgen. Hierfür können auch mehrere Zylinder gestapelt werden. Mittels des Impuls-Echo-Verfahrens soll zudem die Dämpfungskonstante des Zylindermaterials bestimmt werden. Zu Beachten ist, dass hierfür keinesfalls eine Verstärkung verwendet werden darf. Außerdem dürfen keine Zylinder gestapelt werden, da sich an der Übergangsfläche sowohl eine reflektierte, als auch eine transmittierte Schallwelle bildet, somit ist eine Bestimmung des Amplitudenverhältnis nicht sinnvoll. Es sollen möglichst viele Zylinderlängen vermessen werden. Für große Zylinderlängen kann allerdings die Amplitude der reflektierten Schallwelle so gering ausfallen, dass sie nicht mehr zu bestimmen ist.

Zudem soll die Schallgeschwindigkeit für möglichst viele Zylinder mit dem Durchschallverfahren bestimmt werden. Hierfür wird beidseitig an den Acrylzyylinder, welcher in eine Halterung waagrecht gelegt wird, jeweils eine Sonde mit Kopplungsgel gekoppelt. Zur Analyse eines Spektrums/Cepstrums wird ein etwa 40 mm langer Acrylzyylinder auf zwei Acrylplatten gesetzt sowie eine Sonde an den Zylinder gekoppelt. Alle Grenzflächen werden durch bidestilliertes Wasser gekoppelt. Die Verstärkung ist so zu wählen, dass 3 Mehrfachreflexionen zu erkennen sind. Im A-Scan werden die beiden Cursor so neben die Mehrfachreflexionen gesetzt, dass ein Spektrum/Cepstrum mittels der FFT-Funktion erzeugt werden kann.

Zur Untersuchung der Innenabstände des Augenmodells wird eine Messung mit dem Impuls-Echo-Verfahren durchgeführt. Hierzu wird eine Sonde mit Koppelgel vorsichtig auf die Hornhaut des Augenmodells gesetzt und vorsichtig so ausgerichtet, dass im Messprogramm fünf Peaks zu erkennen sind (Reflexion durch die Hornhaut, Iris, Vorder- und Rückseite der Linse und der Retina).

4 Auswertung

4.1 Konfiguration des Messprogramms

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Material der vorliegenden Acrylzyylinder wird die Länge eines Zylinders vermessen und die Zeitdifferenz Δt zwischen zwei Maxima im A-Scan bestimmt. In Abbildung 2 ist der Amplituden-Scan der Messung dargestellt.

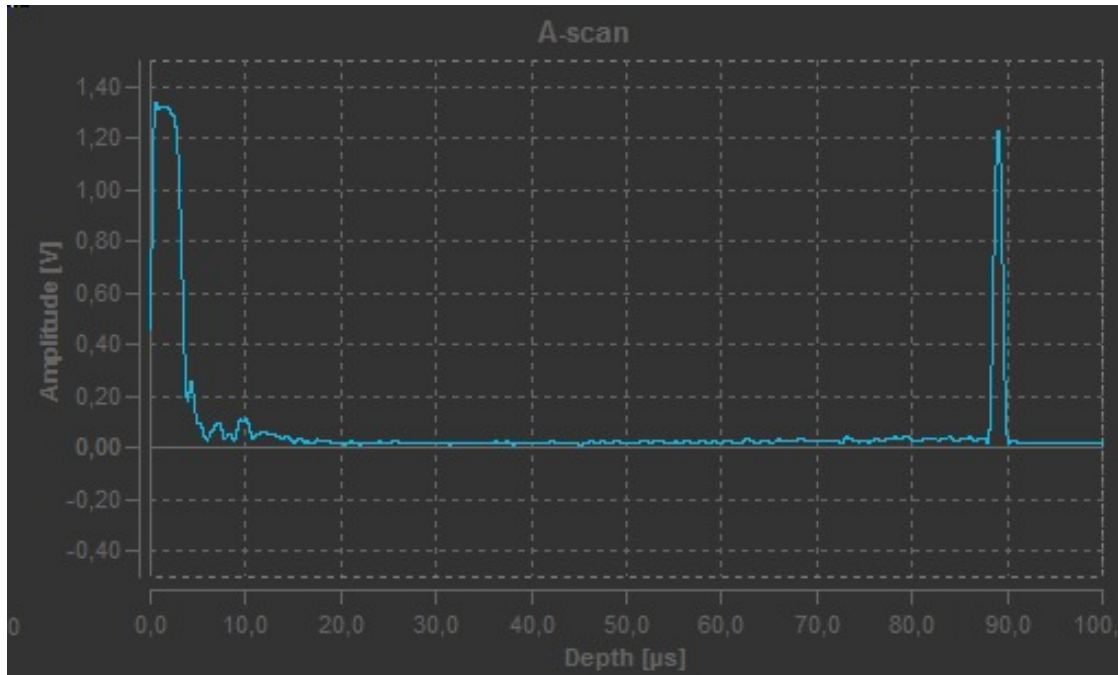


Abbildung 2: Amplituden-Scan zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Probenmaterial.

Die Zeitdifferenz zwischen den beiden Maxima bei $t_1 = 0,51 \mu\text{s}$ und $t_2 = 89,20 \mu\text{s}$ wird mithilfe der Cursor bestimmt zu

$$\Delta t = 88,69 \mu\text{s}. \quad (3)$$

Die Amplitudenhöhe wurde nicht vermessen, da nicht bekannt ist, wie die Verstärkung des Signals herausgerechnet werden muss.

Über die gemessene Länge des Acrylzyllinders $s = 120,5 \text{ mm}$ ergibt sich mit Formel (2) eine Schallgeschwindigkeit von

$$v_{\text{Schall}} = 2717,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (4)$$

Da es zahlreiche unterschiedliche Literaturwerte für die Schallgeschwindigkeit in Acryl gibt, wird für die folgende Messung eine Schallgeschwindigkeit von $v_{\text{Schall}} = 2720 \text{ m/s}$ angenommen und in das Messprogramm eingetragen. Mit diesem Wert ist das Programm schließlich in der Lage, die Eindringtiefe der Schallwelle in das Material zu bestimmen. Der Abstand zwischen den beiden Peaks entspricht dann der Länge des Acrylstabs. Die durch das Programm berechnete Länge ergibt sich zu

$$s = 119,73 \text{ mm}. \quad (5)$$

4.2 Schallgeschwindigkeit über Impuls-Echo-Verfahren

Die Zylinderlängen s der mittels Impuls-Echo-Verfahrens vermessenen Zylinder samt der zugehörigen gemessenen Laufzeiten t findet sich in Tabelle 1. In Abbildung 3 sind die Zylinderlängen gegen die Laufzeiten aufgetragen. Hierbei wurde der Messpunkt bei $t = 82,6 \mu\text{s}$ bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit vernachlässigt, da er deutlich vom linearen Verlauf abweicht und das Ergebnis deutlich verschlechtert. Nach Formel (2) besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Zylinderlänge und der Laufzeit. Mit python/scipy [3] wird daher eine lineare Ausgleichsrechnung nach

$$y = m \cdot x + b \quad (6)$$

durchgeführt.

Aus dem doppelten Steigungsparameter m ergibt sich die Schallgeschwindigkeit c_{IE} .

$$2 \cdot m = c_{\text{IE}} = (2738 \pm 11) \frac{\text{m}}{\text{s}},$$
$$b = (11 \pm 3) \mu\text{m}.$$

Der Geradenparameter b ist von Null verschieden, da eine Anpassungsschicht zwischen der Sonde und dem Zylinder vorliegt. Die Ausgleichsgrade ist daher nach rechts verschoben. Die Dicke der Anpassungsschicht entspricht dabei dem Geradenparameter b .

Tabelle 1: Messdaten zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit über das Impuls-Echo-Verfahren.

s/mm	$t/\mu\text{s}$
102,7	76,12
80,7	59,4
61,5	45,81
40,15	30,2
31,1	23,43
71,25	52,88
82,6	69,02
120,5	88,69

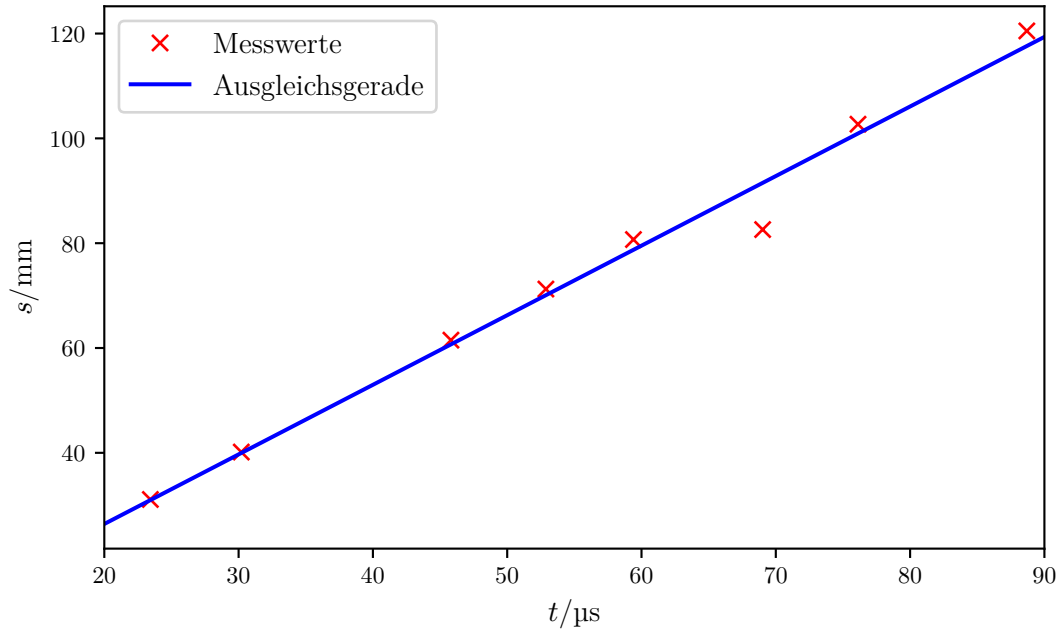


Abbildung 3: Messdaten samt Ausgleichsgrade zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit über das Impuls-Echo-Verfahren.

4.3 Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungsverfahren

Die Schallgeschwindigkeit wird mittels des Durchschallungsverfahrens erneut bestimmt. In Tabelle 2 finden sich die Längen der vermessenen Zylinder sowie die zugehörigen gemessenen Laufzeiten. In Abbildung 4 sind die Längen der Zylinder s gegen die zugehörigen Laufzeiten t geplottet. Mittels python/scipy [3] wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Nach Formel (2) ergibt sich die Schallgeschwindigkeit der Durchschallmessung c_{Ds} aus dem doppelten Steigungsparameter m zu:

$$2 \cdot m = c_{\text{Ds}} = (2770 \pm 40) \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$b = (-53 \pm 11) \mu\text{m}.$$

Der Geradenparameter b ist von null verschieden. Dies entsteht durch die Dicke der Anpassungsschicht beider Sonden.

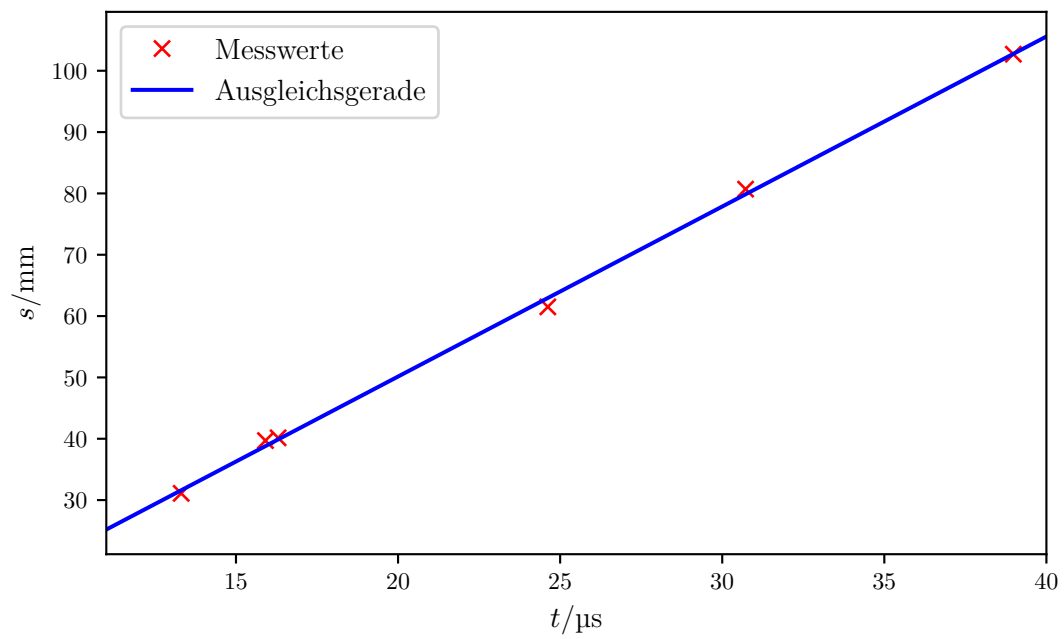


Abbildung 4: Messdaten samt Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit über das Durchschallungsverfahren.

Tabelle 2: Messdaten zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit über das Durchschallungsverfahren.

s/mm	$t/\mu\text{s}$
61,5	24,62
40,15	16,3
39,7	15,91
31,1	13,31
102,7	38,98
80,7	30,72

4.4 Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Über das Impuls-Echo-Verfahren wird zudem die Dämpfungskonstante des Acryls bestimmt. Es lässt sich Formel (1) umformen zu:

$$\ln \left(\frac{I(x)}{I_0} \right) = -\alpha x. \quad (7)$$

Es besteht daher ein linearer Zusammenhang zwischen der Dämpfungskonstante und dem Logarithmus des Amplitudenverhältnis. In Tabelle 3 finden sich die verwendeten Messdaten und in Abbildung 5 ist der Logarithmus des Amplitudenverhältnis aufgetragen gegen die Länge der Acrylstäbe aufgetragen. Mittels einer linearer Ausgleichsrechnung mit python/scipy [3] ergibt sich die Dämpfungskonstante aus der Steigung der Ausgleichsgrade:

$$\begin{aligned} -m = \alpha &= (47 \pm 2) \frac{1}{\text{m}}, \\ b &= 0,28 \pm 0,14. \end{aligned}$$

Tabelle 3: Messdaten zur Bestimmung der Dämpfungskonstante α .

s/mm	I_0/V	$I(s)/\text{V}$	$\ln \left(\frac{I(s)}{I_0} \right)$
80,7	0,986	0,018	4,00
80,5	0,987	0,019	3,95
61,5	0,987	0,035	3,34
40,15	0,987	0,114	2,16
31,1	0,985	0,189	1,65
39,7	0,986	0,117	2,13

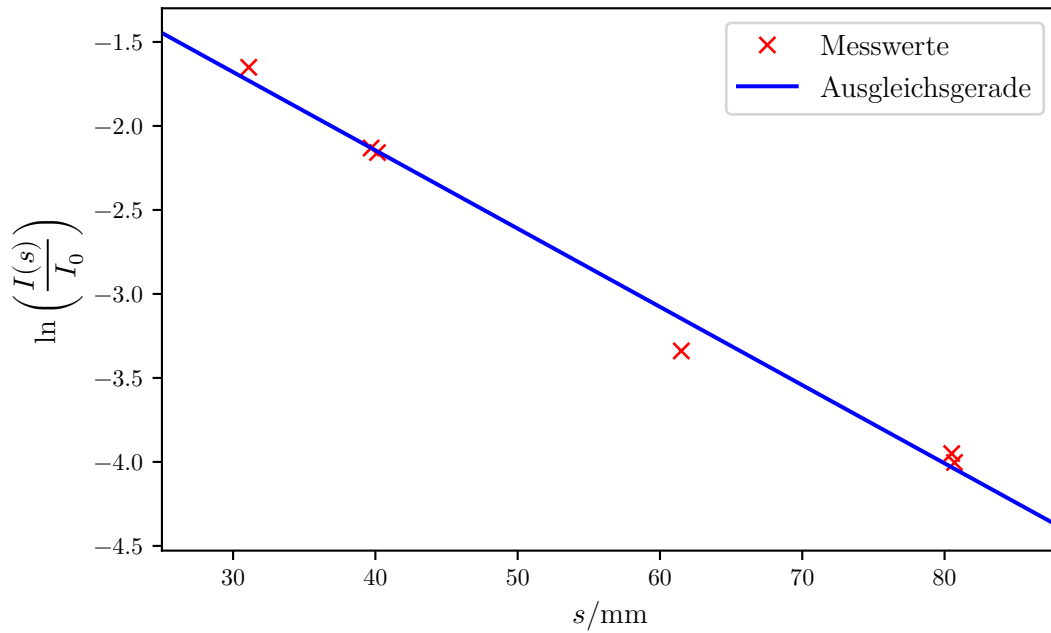


Abbildung 5: Messpunkte samt Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Dämpfungskonstante α .

4.5 Spektrale Analyse und Cepstrum

Das aufgenommene Cepstrum ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Laufzeiten der drei zu bestimmenden Mehrfachreflexionen sind mit der Cursorfunktion aufgenommen worden (vgl. dazu Grafik im Anhang). Um die Dicke der Acrylplatten zu berechnen, wird der Mittelwert der bisher bestimmten Schallgeschwindigkeiten (c_{Ds} und c_{IE}) verwendet. Er ergibt sich zu

$$\bar{c} = (2754 \pm 16) \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Mit Formel (2) lassen sich die zugehörigen Längen berechnen. In Tabelle 4 sind die Laufzeiten mit den zugehörigen abgelaufenen Strecken aufgetragen. Die Dicken der

Tabelle 4: Laufzeiten der Mehrfachreflexionen bestimmt mit der Cursorfunktion und zugehörige Strecken berechnet mit Formel (2).

Peak	$t / \mu\text{s}$	s / mm
1	30,41	$41,6 \pm 0,2$
2	34,87	$47,7 \pm 0,2$
3	42,32	$57,9 \pm 0,2$

Platten ergeben sich als Differenzen der abgelaufenen Strecken. Demnach weist die erste

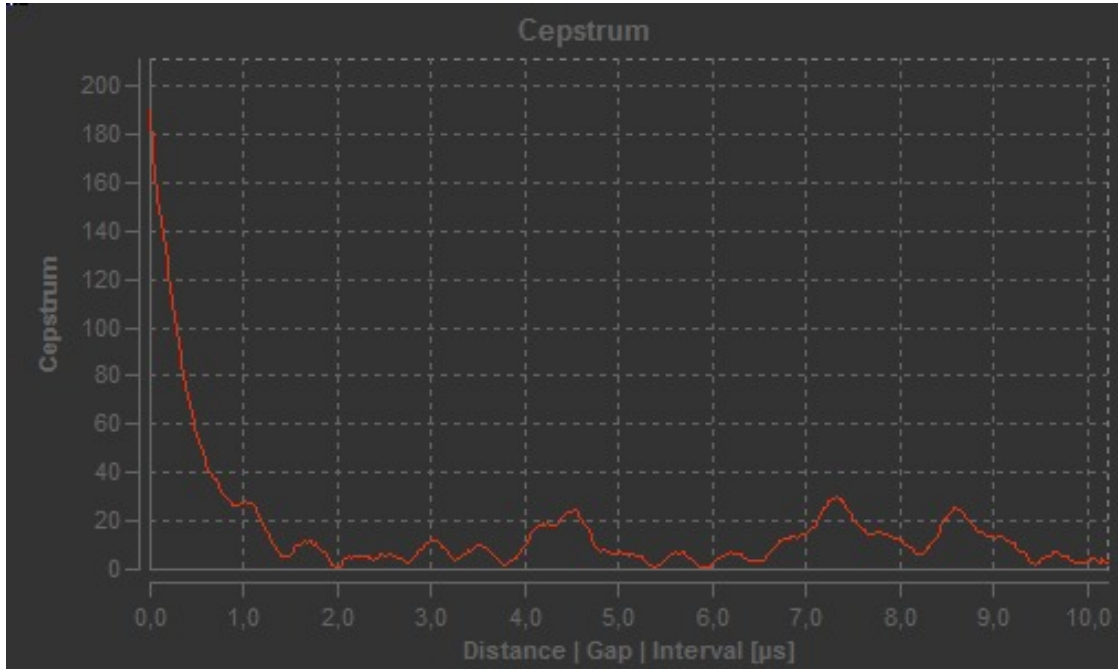


Abbildung 6: Cepstrum der Mehrfachreflexion.

Platte (Differenz von Peak 1 und Peak 2) eine Dicke von

$$d_1 = (6,1 \pm 0,2) \text{ mm}$$

auf. Analag wird die Dicke der zweiten Platte (Differenz von Peak 2 und Peak 3)

$$d_2 = (10,2 \pm 0,2) \text{ mm}$$

berechnet. Die gemessenen Dicken sowie die berechneten Dicken sind in Tabelle 5 zu

Tabelle 5: Messergebnisse für die Dicke der Platten mit der Schiebelehre und der Berechnung aus der Mehrfachreflexion.

Platte	$d_{\text{SL}} / \text{mm}$	$d_{\text{CEP}} / \text{mm}$
1	6,1 mm	$(6,1 \pm 0,2) \text{ mm}$
2	10,0 mm	$(10,2 \pm 0,2) \text{ mm}$

finden. Es ergibt sich also eine im Rahmen der Messgenauigkeit sehr geringe Abweichung der gemessenen und der aus dem Cepstrum bestimmten Dicke der Platten.

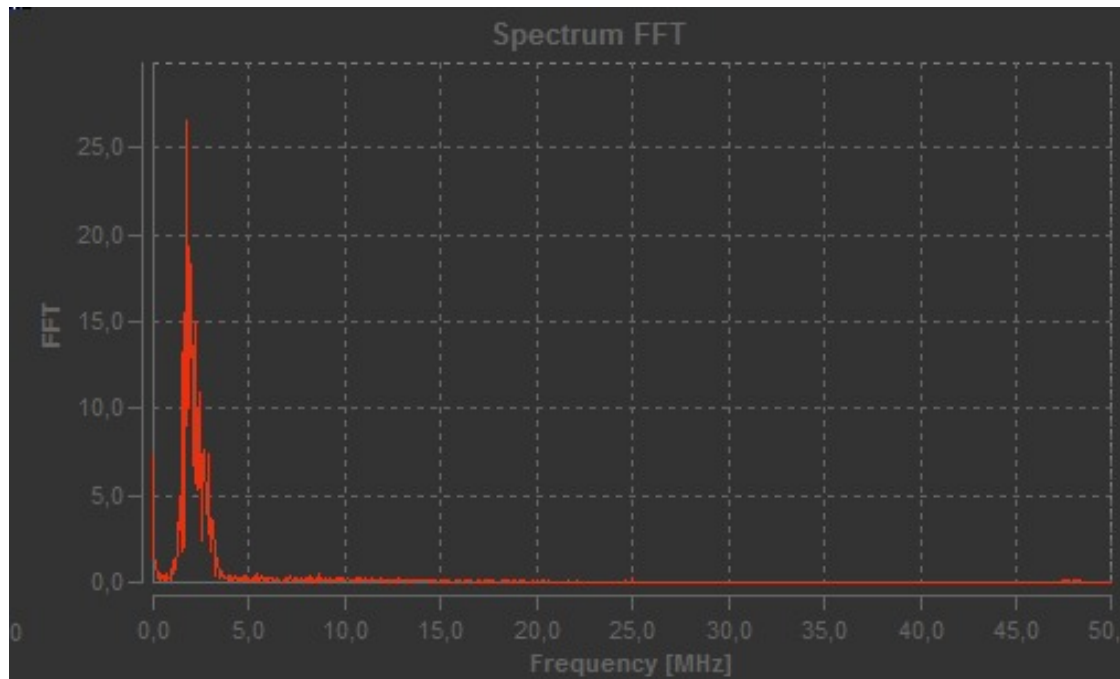


Abbildung 7: Spektrum der Mehrfachreflexion.

4.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

Im A-Scan des Auges (vgl. Abbildung 8) werden die fünf Peaks mit dem Cursor zu

$$\begin{aligned} t_1 &= 1,15 \mu\text{s}, \\ t_2 &= 10,03 \mu\text{s}, \\ t_3 &= 17,90 \mu\text{s}, \\ t_4 &= 25,32 \mu\text{s}, \\ t_5 &= 71,02 \mu\text{s} \end{aligned}$$

bestimmt. Die Peaks kommen durch die Reflexionen an der Oberfläche des Modells, der Iris, der Vorder- bzw. Rückseite der Linse und der Retina zustande. Die Abstände werden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in der Linse ($c_L = 2500 \text{ m/s}$) und in der Glaskörperflüssigkeit ($c_{GK} = 1410 \text{ m/s}$) mit Formel (2) berechnet. Der Abstand s_1 wird als Abstand zwischen der Oberfläche des Modells und der Iris definiert. Die darauffolgenden Abstände sind von der Iris aus bis zur Vorder- bzw. Rückseite der Linse und der Retina angegeben. Es ergeben sich die Abstände:

$$\begin{aligned} s_1 &= 6,26 \text{ mm}, \\ s_2 &= 5,55 \text{ mm}, \\ s_3 &= 14,82 \text{ mm}, \\ s_4 &= 47,04 \text{ mm}. \end{aligned}$$

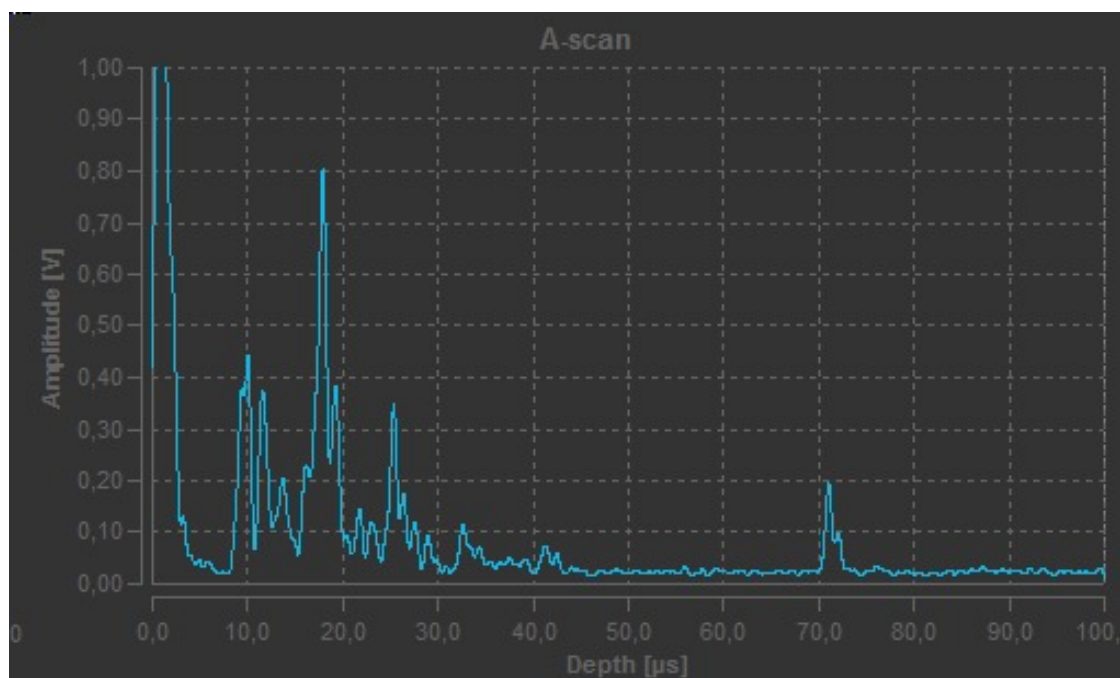


Abbildung 8: A-Scan des Augenmodells.

Außerdem muss der Maßstab 1:3 des Modells berücksichtigt werden, sodass sich die drei Abstände

$$\begin{aligned}s_{\text{IL}} &= 1,85 \text{ mm}, \\ s_{\text{L}} &= 3,09 \text{ mm}, \\ s_{\text{LR}} &= 10,74 \text{ mm}\end{aligned}$$

ergeben.

5 Diskussion

Tabelle 6: Messergebnisse für die bestimmten Schallgeschwindigkeiten im Vergleich zum Literaturwert.

Messverfahren	$c_{\text{Ex.}} / \text{m/s}$	$c_{\text{Theo.}} / \text{m/s}$	Fehler
Impuls-Echo-Verfahren	2738 ± 11	2750	0,4 %
Durchschallverfahren	2770 ± 40	2750	0,7 %

In Tabelle 6 sind die bestimmten Schallgeschwindigkeiten in Acryl im Vergleich zum Literaturwert nach [1] aufgetragen. Es zeigen sich nur sehr geringe Abweichungen. Zudem

weichen die beiden über die verschiedenen Messverfahren bestimmten Schallgeschwindigkeiten lediglich um 1% voneinander ab, beziehungsweise liegen sogar im gegenseitigen Fehlerbereich. Dies deutet auf eine in sich konsistente Messung der Schallgeschwindigkeit hin. Die mit der Cepstrumanalyse bestimmten Dicken der Platten sind mit zugehörigen gemessenen Dicken und Fehlern in Tabelle 7 zu finden. Es lässt sich anmerken, dass die Fehler im Rahmen der Messungenauigkeit liegen. In Tabelle 8 sind die bestimmten

Tabelle 7: Messergebnisse für die Dicke der Platten mit zugehörigen gemessenen Dicken und relativen Fehlern.

Platte	$d_{\text{exp}} / \text{mm}$	$d_{\text{theo}} / \text{mm}$	Fehler
1	$6,1 \pm 0,2$	6,1	0 %
2	$10,2 \pm 0,2$	10,0	2 %

Tabelle 8: Messergebnisse für die Abstände im Auge mit zugehörigen Literaturwerten [4] und relativen Fehlern.

Abstand	$d_{\text{exp}} / \text{mm}$	$d_{\text{theo}} / \text{mm}$	Fehler
Iris – Anfang Linse	1,85	3,6	48,6 %
Anfang Linse – Ende Linse	3,09	3,6	14,2 %
Ende Linse – Retina	10,74	15,18	29,2 %

Abstände im Auge mit den zugehörigen Literaturwerten und relativen Fehlern aufgetragen. Es ist auffällig, dass die Bereiche mit der Glaskörperflüssigkeit einen deutlich höheren Fehler aufweisen, was mit der verwendeten – möglicherweise falschen – Schallgeschwindigkeit c_{GK} zusammenhängen kann.

Literatur

- [1] NDT Database und Journal of Nondestructive Testing. *Plastic Material's acoustic properties*. URL: <http://www.ndt.net/links/proper.htm#references> (besucht am 05.06.2017).
- [2] TU Dortmund. *Versuch 602, Röntgenemission-und -absorption*. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/RoentgenAbs.pdf> (besucht am 28.05.2017).
- [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] PIXEL ZOO. *Optische Instrumente - Das Auge*. URL: http://www.geometrische-optik.de/OPTIK-Texte-html/Kapitel92_Optische%20Instrumente-Auge.htm (besucht am 05.06.2017).

6 Anhang

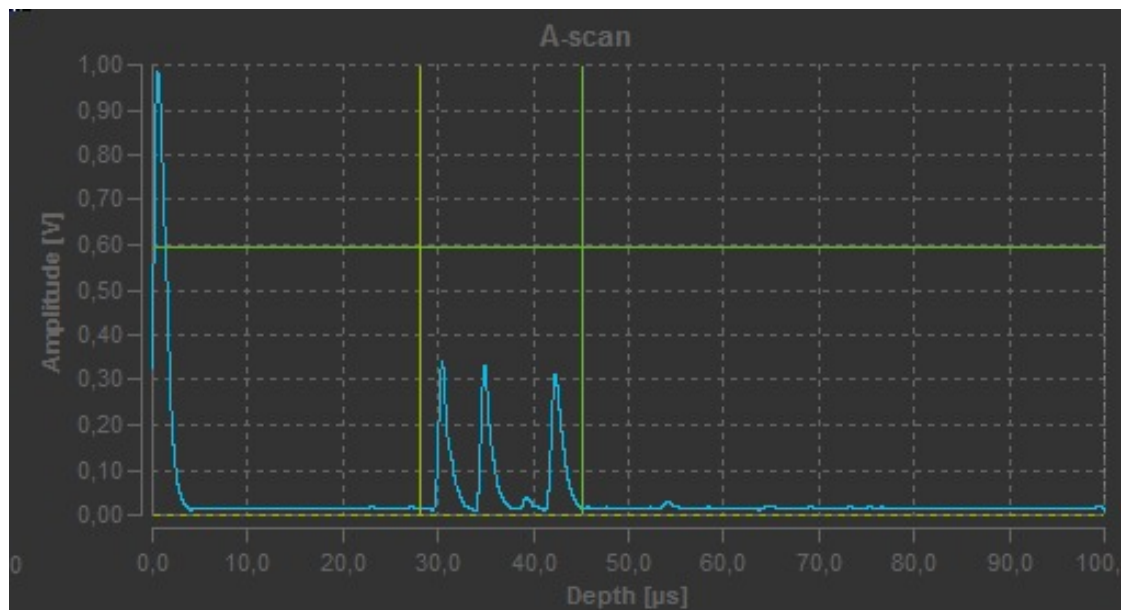


Abbildung 9: A-Scan der Mehrfachreflexion samt markierten Bereich zur Erzeugung des Spektrums/Cepstrums.