

# **US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik**

Simon Schulte  
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek  
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 04.07.2017

Abgabe: 11.07.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>2</b>
3.1	Versuchsaufbau . . . . .	2
3.2	Versuchsablauf . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>4</b>
4.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl . . . . .	4
4.2	Betrachtung des Dämpfungsverhaltens von Acryl . . . . .	7
4.3	Vermessung des Augenmodells . . . . .	7
4.4	Bestimmung der Dicke von Acrylplatten mithilfe des Cepstrum . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>13</b>
5.1	Schallgeschwindigkeitsmessung . . . . .	13
5.2	Dämpfungsverhalten . . . . .	13
5.3	Messung am Augenmodell . . . . .	13
5.4	Dickenbestimmung per Cepstrum . . . . .	13
	<b>Literatur</b>	<b>14</b>

## 1 Zielsetzung

Bei diesem Versuch wird die Schallgeschwindigkeit und Dämpfung von Ultraschall in Acryl untersucht. Anschließend werden an einem Augenmodell Distanzen gemessen.

## 2 Theorie

Als Ultraschall werden Schallwellen mit Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 GHz bezeichnet. Ihre Intensität nimmt bei der Ausbreitung nach

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

ab.  $\alpha$  ist dabei der Absorptionskoeffizient.

Für die Erzeugung von Ultraschall wird der piezo-elektrische Effekt verwendet. Hierbei wird ein geeigneter Kristall elektrisch zu Schwingungen angeregt. Die Resonanz des Kristalls kann dabei auch zur Messung von Ultraschall verwendet werden.

Bei Messungen mit Ultraschall gibt es allgemein zwei verschiedene Methoden. Das Durchschallungs-Verfahren und das Impuls-Echo-Verfahren.

Bei dem Durchschallungs-Verfahren werden zwei Ultraschallsonden verwendet. Die erste agiert als Sender und die zweite als Empfänger. Zwischen den Sonden wird die Probe platziert. Durch Messung der Zeitpunkte der Impulse lässt sich so bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Länge bzw. bei bekannter Länge die Schallgeschwindigkeit der Probe bestimmen.

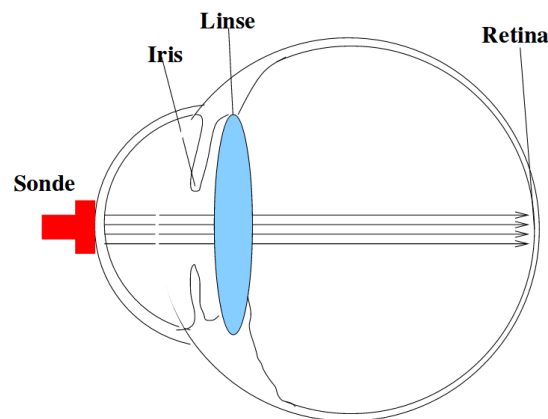
Bei dem Impuls-Echo-Verfahren wird nur eine Sonde verwendet. Diese agiert als Sender und Empfänger. Durch Laufzeitmessungen lassen sich auch hier Länge und Schallgeschwindigkeit der Probe bestimmen. Im Gegensatz zum Durchschallungs-Verfahren kann hierbei auch die Position von potenziellen Fehlstellen bestimmt werden. Da der Schall bei dieser Methode immer den doppelten Weg zurücklegt ergibt sich für die Strecke

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

### 3 Durchführung

#### 3.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau besteht aus einem Ultraschallgenerator, an dem zwei Sonden angeschlossen sind. An einem Drehschalter ist auswählbar, welche Sonden jeweils Sender und Empfänger sein sollen. Es stehen mehrere Acrylzyylinder und Platten mit unterschiedlichen Längen bzw. Dicken zur Verfügung. Für das Durchschallungs-Verfahren liegt ein Keil vor, welcher dafür sorgt, dass die Zylinder nicht wegrollen. Die Daten der Sonden werden an einem Computer angezeigt. Daran lassen sich dann die Laufzeiten und Signalamplituden bestimmen. Für den letzten Versuchsteil wird ein Augenmodell verwendet, wie es in Abbildung 1 dargestellt ist.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Augenmodells. [Dor17]

Für die Zylinder und Platten wurden vorab folgende Längen gemessen:

**Tabelle 1:** Zylinderlängen.

Zylinder/Platte Nr.	Länge/Dicke in cm
1	3,115
2	4,045
3	6,160
4	7,086
5	8,045
6	10,240
7	12,055
a	0,610
b	1,195

Zylinder Nr.4 wird dabei aus einem Zylinder der Länge 3 cm und einem der Länge 4 cm zusammengesetzt und die Buchstaben stehen für die Acrylplatten.

### 3.2 Versuchsablauf

Zuerst wird mit dem Impuls-Echo-Verfahren die Laufzeit und die Amplitude der Impulse in den verschiedenen Zylindern gemessen. Damit lässt sich die Schallgeschwindigkeit in Acryl und der entsprechende Absorptionskoeffizient bestimmen. Anschließend werden alle Zylinder außer Nr.4 mit dem Durchschallungs-Verfahren erneut vermessen. Hierbei wird nur die Laufzeit notiert.

Nun werden die beiden Acrylplatten aufeinander und Zylinder Nr.2 auf den beiden Platten platziert. Von oben wird dann per Impuls-Echo-Verfahren ein Cepstrum aufgenommen. Dieses zeigt ein Spektrum aus Laufzeiten, die durch mehrfache Reflexion entstehen. Anhand dieser kann die Dicke der Platten bestimmt werden.

Zuletzt werden an einem Augenmodell per Impuls-Echo-Verfahren die Abstände zwischen Iris, Linse und Retina bestimmt.

## 4 Auswertung

### 4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl

Die aus der Messung nach dem Impuls-Echo-Verfahren gewonnenen Messwerte finden sich in Tabelle 2, die aus dem Durchschallungsverfahren in Tabelle 3. Hierbei bezeichnet

$l/\text{mm}$	$U/\text{V}$	$t/\mu\text{s}$	TGC/dB
40.45	0.60	29.6	0
80.45	0.19	58.8	10
120.55	0.07	88.2	20
102.40	0.06	75.6	20
31.15	0.62	23.0	0
61.60	0.08	45.5	0
70.85	0.05	53.2	0

**Tabelle 2:** Messwerte der Messung per Impuls-Echo-Verfahren.

$l/\text{mm}$	$U/\text{V}$	$t/\mu\text{s}$	TGC/dB
31.15	0.729	23.2	0
40.45	0.759	29.5	0
61.60	0.271	46.6	0
80.45	0.154	39.1	0
102.40	0.271	38.5	0
120.55	0.329	45.0	0

**Tabelle 3:** Messwerte der Messung per Durchschallungsverfahren.

$l$  jeweils die Höhe der Zylinder,  $U$  die Spannungsamplitude des gemessenen Peaks,  $t$  den zeitlichen Abstand zwischen senden des Schallimpulses und empfangen des Signals und TGC gibt den verwendeten Verstärkungsfaktor für den Amplitudenwert an. Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten geschieht nun durch lineare Regression. Zu beachten ist, dass sich die Laufzeiten bei der Messung per Impuls-Echo-Verfahren verfahrensbedingt auf die doppelte Länge beziehen. Es werden daher in den Rechnungen die halben gemessenen Laufzeiten betrachtet. Dies ist notwendig, da innerhalb des Sondenmaterials eine gewisse Strecke zurückgelegt werden muss, die ansonsten als systematischer Fehler in die Rechnung eingehen würden. Die Regression der Länge-Laufzeit Wertepaare errechnet sich mit

$$t(l) = l \cdot \frac{1}{c} + t_0. \quad (3)$$

Dabei ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit im Zylinder und  $t_0$  die Laufzeit innerhalb der Sonde. Das liefert für das Impuls-Echo-Verfahren:

$$c = (2713 \pm 24) \text{ m s}^{-1}$$

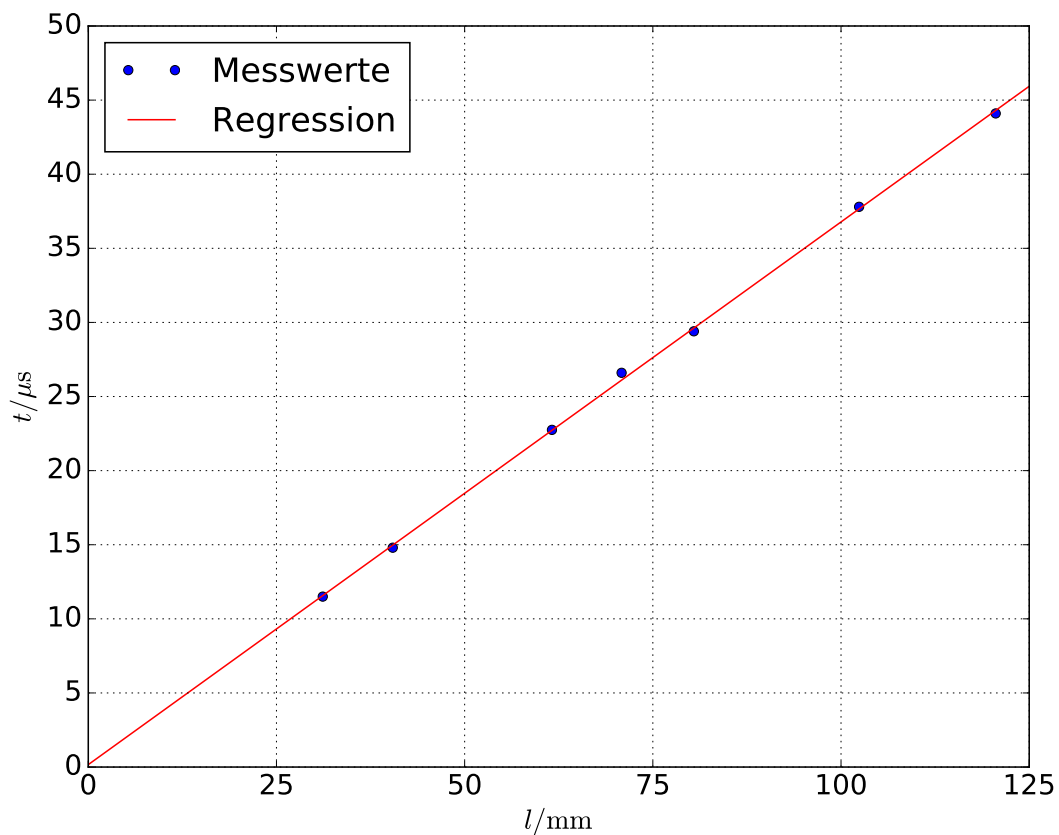
$$t_0 = (1,0 \pm 0,1) \mu\text{s}$$

und für das Durchschallungsverfahren:

$$c = (2731 \pm 27) \text{ m s}^{-1}$$

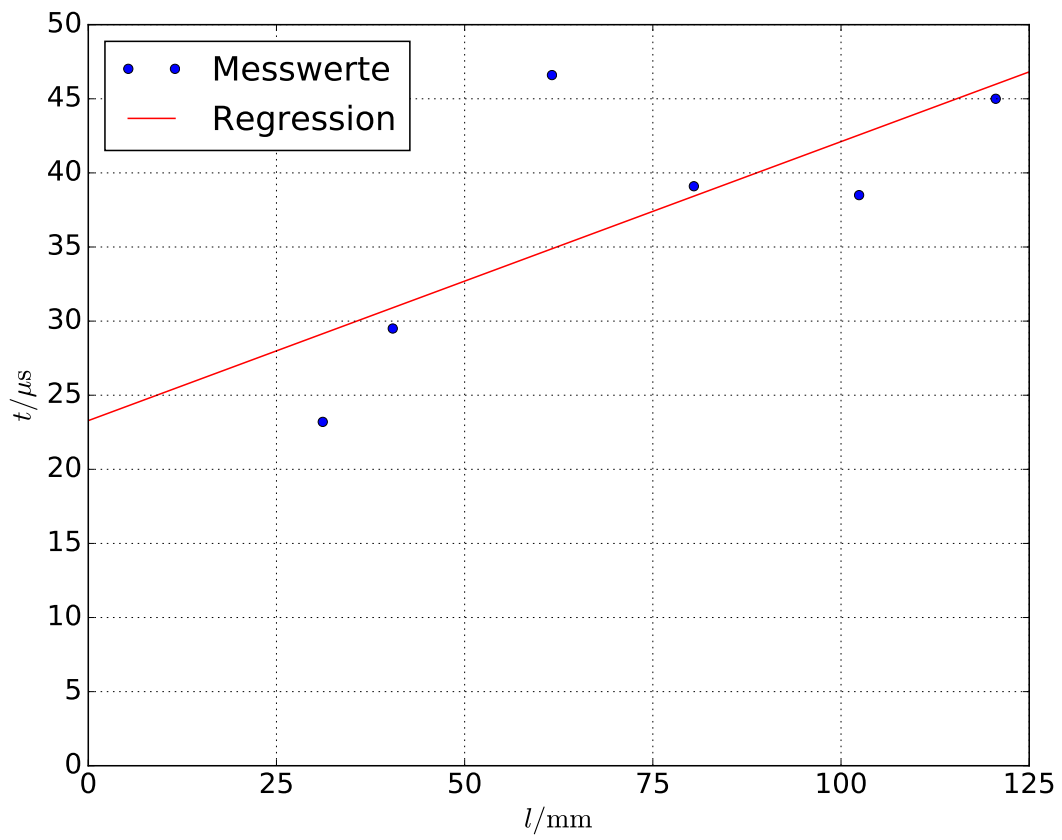
$$t_0 = (1,6 \pm 0,2) \mu\text{s}$$

Messwerte und Regression sind in Abbildung 2 für das Impuls-Echo-Verfahren, sowie in Abbildung 3 für das Durchschallverfahren dargestellt. Dargestellt sind die gemessenen



**Abbildung 2:** Impuls-Echo-Verfahren

Laufzeiten bei beiden Messmethoden mit Regression. Insbesondere in 3 erkennt man die Verschiebung des Graphen auf der y-Achse, verursacht durch die Schalllaufzeit innerhalb der Sonde, deutlich.



**Abbildung 3:** Durchschallverfahren



## 4.2 Betrachtung des Dämpfungsverhaltens von Acryl

Nun werden die Dämpfungseigenschaften von Acryl betrachtet. Dabei wird die gemessene Spannungsamplitude des Signals in Abhängigkeit der zurückgelegten Wegstrecke betrachtet. Zu beachten ist hier: Beim Impuls-Echo-Verfahren wird Verfahrensbedingt die doppelte Strecke zurückgelegt, manche Amplituden mussten mit Verstärkung gemessen werden. Diese ist in den Tabellen 2 und 3 als TGC-Wert in dB angegeben. Die Umrechnung in einen linearen Faktor geschieht durch:

$$G(g) = 10^{(g \cdot \frac{1}{20})} \quad (4)$$

mit TGC-Wert  $g$ . Die Dämpfung verläuft exponentiell, der Dämpfungskoeffizient  $\alpha$  wird daher durch Regression mit einer Funktion:

$$U(l) = U_0 \cdot e^{\alpha l} \quad (5)$$

in PHYTON-SCIPY bestimmt. Für das Impuls-Echo-Verfahren ergeben sich:

$$U_0 = (0,43 \pm 0,15) \text{ V}$$
$$\alpha = (-19 \pm 7) \frac{1}{\text{m}}$$

und für das Durchschallungsverfahren:

$$U_0 = (3,1 \pm 1,4) \text{ V}$$
$$\alpha = (-24 \pm 6) \frac{1}{\text{m}}$$

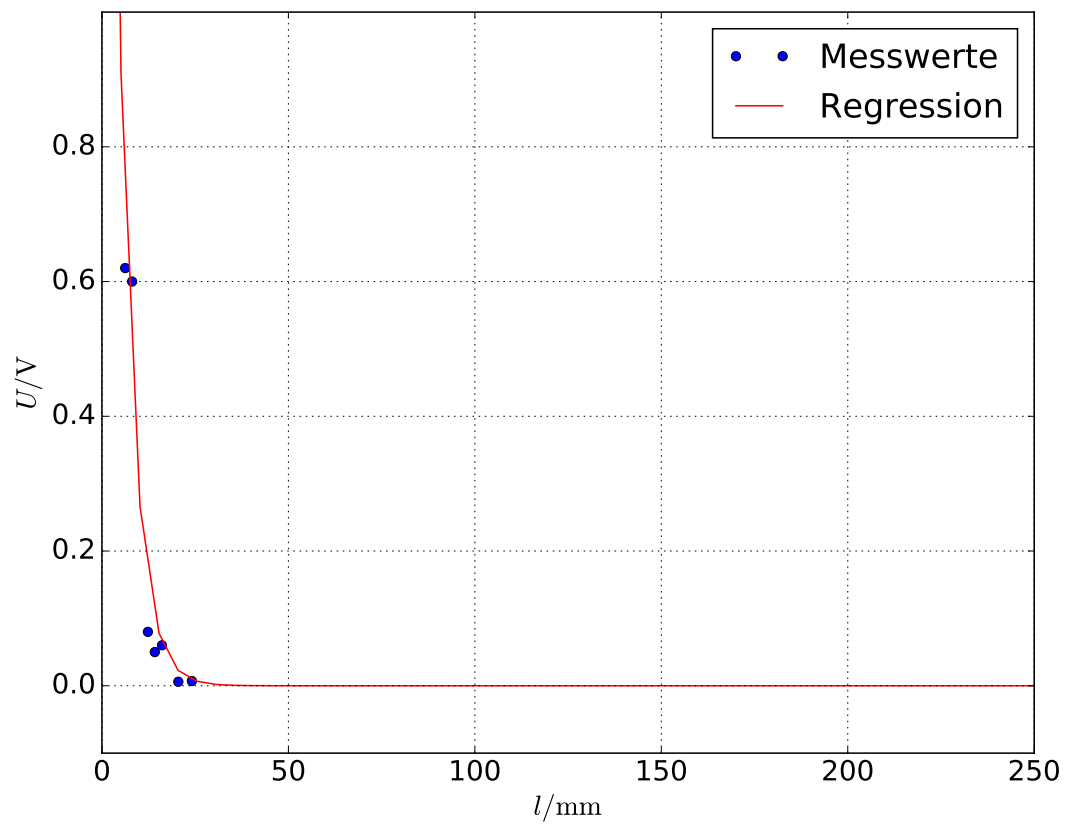
Die Verläufe mit Regression sind in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Dabei sind die gemessenen Signalamplituden in Abhängigkeit der Signallaufzeit bei beiden Messmethoden mit Regression dargestellt.

## 4.3 Vermessung des Augenmodells

Die gewonnenen Messwerte sind in Tabelle 4 dargestellt. Für die Schallgeschwindigkeit [Dor17] in der Glaskörperflüssigkeit gilt  $c_{GK} = 1410 \text{ m s}^{-1}$  und für die Linse  $c_L = 2500 \text{ m s}^{-1}$ . Sind die Laufzeitdifferenzen  $\Delta t$  zwischen den Grenzflächen bekannt, kann nach

$$S = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t \quad (6)$$

der Abstand zwischen den Schichten bestimmt werden. Der Faktor  $1/2$  ist notwendig, da beim Impuls-Echo-Verfahren die doppelten Laufzeiten gemessen werden. Dargestellt sind in 4 die Ergebnisse der Vermessung des Augenmodells im Maßstab 3:1, angegeben als Verfahrensbedingt doppelte Laufzeiten. In 5 finden sich die berechneten Abstände zwischen Schallsonde und den angegebenen Grenzschichten für das Augenmodell (Maßstab 3:1) und zurückgerechnet auf ein menschliches Auge.



**Abbildung 4:** Impuls-Echo-Verfahren

Grenzschicht	$\Delta t/\mu\text{s}$
Iris	5.77
Linse ein	8.13
Linse aus	9.50
Retina	23.60

**Tabelle 4:** Messergebnisse.

Grenzschicht	$\frac{l}{3}/\text{mm}$
Iris	2.41
Linse ein	5.38
Linse aus	5.93
Retina	12.00

**Tabelle 5:** Berechnete Werte.

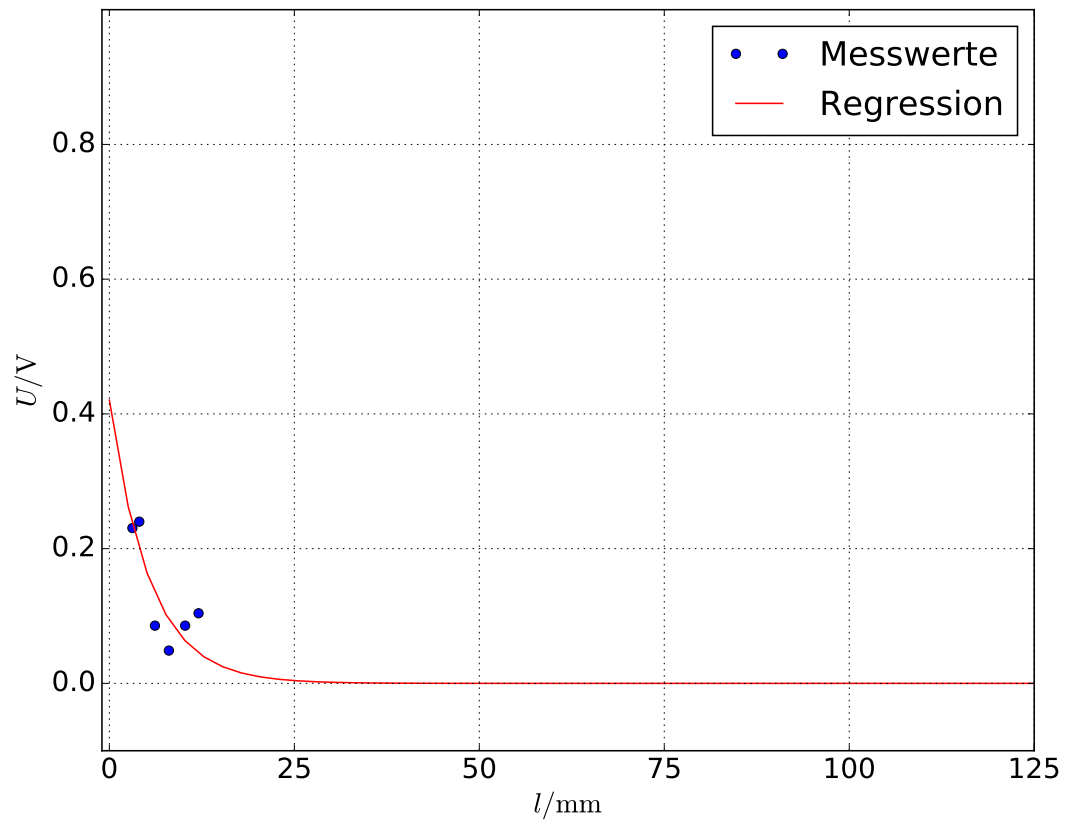


Abbildung 5: Durchschallverfahren

#### 4.4 Bestimmung der Dicke von Acrylplatten mithilfe des Cepstrum

Das vermessene Cepstrum findet sich in Abbildung 6. Die daraus erhaltenen Messwerte finden sich in Tabelle 6. Bei den Messwerten in 6 gehören 1. und 2. sowie 3. und 4.

Peak	$t/\mu\text{s}$
1	4.5
2	8.8
3	13.3
4	17.4
5	22.0

**Tabelle 6:** Messwerte.

Messwert so zusammen, dass 3. und 4. Reflexionen von 1. und 2. sind. Wieder handelt es sich um die doppelten Werte. Messwert 5. ist dann eine "doppelte" Reflexion von 1. Es ergeben sich also zwei Werte für die Dicke der Platten. Als Schallgeschwindigkeit wird der aus dem Durchschallverfahren bestimmte Wert genutzt, da sein Fehlerintervall kleiner ist. In Tabelle 7 sind die bestimmten Werte für die Plattendicke angegeben. Dargestellt

Paar	Platte 1		Platte 2	
	$\Delta t/\mu\text{s}$	$d/\text{mm}$	$\Delta t/\mu\text{s}$	$d/\text{mm}$
1	2,372	$6,02 \pm 0,05$	4,335	$11,91 \pm 0,09$
2	2,401	$6,08 \pm 0,05$	4,380	$11,98 \pm 0,09$

**Tabelle 7:** Berechnete Werte.

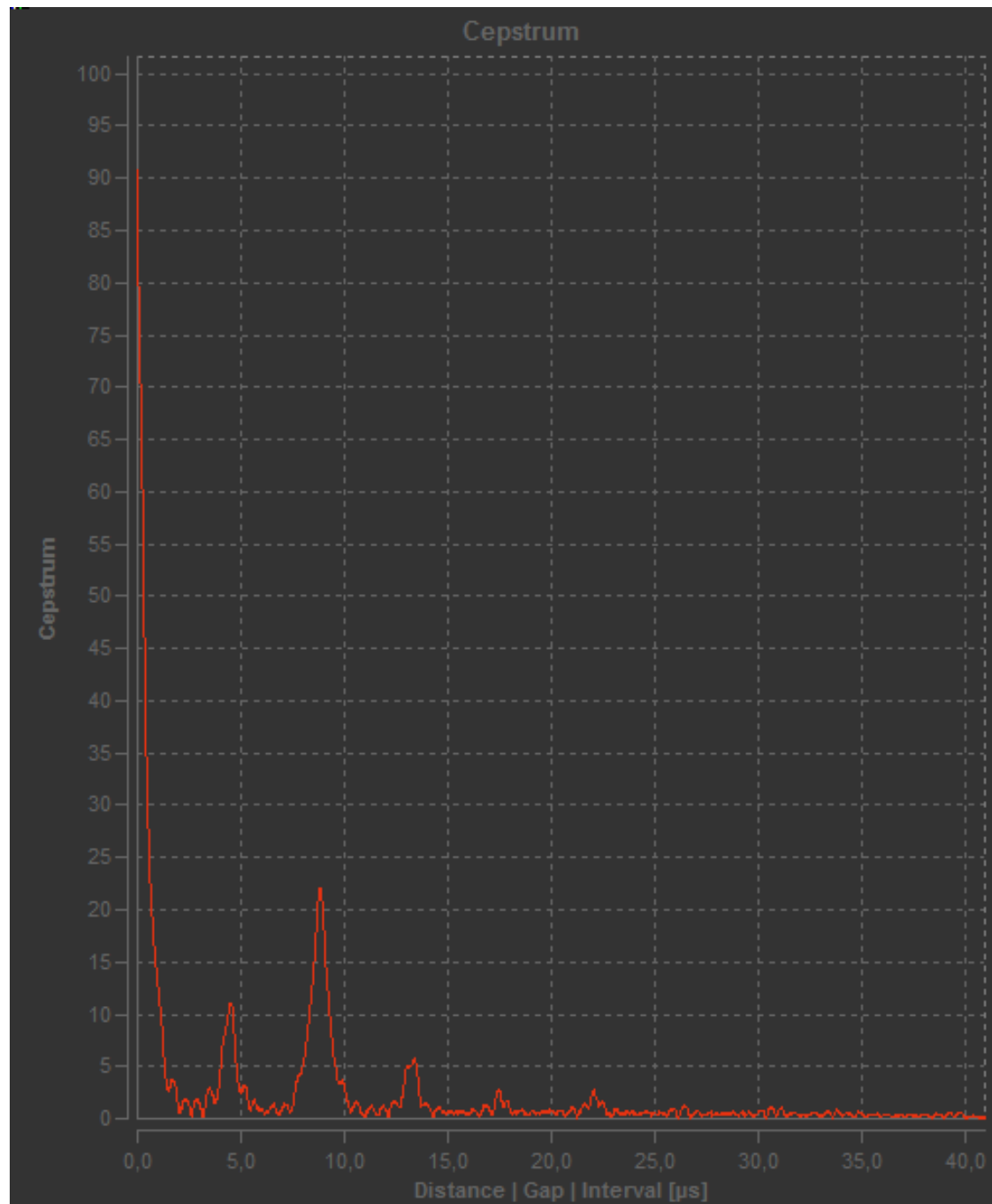
Platte	$d/\text{mm}$
1	6.01
2	11.95

**Tabelle 8:** Vergleichswerte.

sind in 7 die Ergebnisse für beide gemessenen Paare von Peaks. Die Differenz  $\Delta t$  der Laufzeiten ist dabei aus den Messwerten (siehe Tabelle 6) berechnet und halbiert, da die doppelte Laufzeit gemessen wurde. In 8 finden sich die durch direkte Vermessung der Platten erhaltenen Werte. Die Laufzeitdifferenzen ergeben sich aus

$$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{2}. \quad (7)$$

Wieder ist der Faktor  $1/2$  notwendig, da doppelte Laufzeiten gemessen wurden. Aus dem Wert für  $\Delta t$  lässt sich dann durch  $d = ct$  der Durchmesser der vermessenen Platte bestimmen.



**Abbildung 6:** Ausschnitt des aufgenommenen Cepstrums.

## 5 Diskussion

Bei allen Messwerten ist zu beachten, dass die erhaltenen Abweichungen bei den hohen Schallgeschwindigkeiten in den Material leicht zu großen Abweichungen führen.

### 5.1 Schallgeschwindigkeitsmessung

Beide Ergebnisse liegen innerhalb der gegenseitigen Messungenauigkeit. Ebenfalls liegt der Literaturwert [Oly17] von 2730 m/s in den Intervallen beider Ergebnisse. Auffällig ist die große Abweichung zwischen den Werten der sondeninternen Laufzeit. Da beide Werte aus einer Ausgleichsrechnung mit einem sehr begrenzten Datensatz gewonnen wurden und keine Literaturwerte vorhanden sind, kann hier nur vermutet werden. Das Aufnehmen weiterer Messwerte würde helfen, die Ergebnisse zu verifizieren.

### 5.2 Dämpfungsverhalten

Hohe relative Fehler der Werte lassen sich wieder durch den begrenzten Datensatz erklären. Ebenfalls problematisch sind die langen Laufzeiten bei der Impuls-Echo-Messung. Die erhaltenen Daten sind daher bereits stärker gedämpft, weshalb die Ausgleichsrechnung statisch signifikantere Fehler ergeben sollte. Ein Literaturwert [mbH17] von 1,41/cm liegt in keinem der beiden Fehlerintervalle. Auch die relativen Fehler sind sehr hoch. Der Schluss eines systematischen Fehlers liegt nahe.

### 5.3 Messung am Augenmodell

Für das Augenmodell ergeben sich realistische Werte. Der Durchmesser eines Menschlichen Auges liegt laut Literatur [Mat17] zwischen 17 mm und 30 mm, je nach Alter des betrachteten Präparates. Der ermittelte Wert trifft daher auf das Auge eines Jugendlichen zu.

### 5.4 Dickenbestimmung per Cepstrum

Im Vergleich mit den durch direkte Vermessung erhaltenen Werten zeigen sich Abweichungen. Diese Abweichungen sind mit 0,07 mm (dies entspricht 0,1 %) jedoch vergleichsweise gering.

## Literatur

- [Dor17] TU Dortmund. *US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. 25. Apr. 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf>.
- [Hun07] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [J+] 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/>.
- [Leb] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [Mat17] Mathematik.de. *Hintergrund-Information: Das Menschliche Auge in Zahlen*. 28. Apr. 2017. URL: [http://www.mathematik.de/spudema/spudema\\_beitraege/rooch/fenster/auge.html](http://www.mathematik.de/spudema/spudema_beitraege/rooch/fenster/auge.html).
- [mbH17] GAMPT mbH. *Versuchsanleitungen - Ultraschall im Praktikum*. 9. Mai 2017. URL: [http://www.gampt.de/content/cms/downloads/pdf/experiments\\_deu\\_web.pdf](http://www.gampt.de/content/cms/downloads/pdf/experiments_deu_web.pdf).
- [Oli07] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [Oly17] Olympus. *Material Sound Velocities*. 28. Apr. 2017. URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities>.