

US 1

# **Grundlagen der Ultraschalltechnik**

Tabea Hacheney  
tabea.hacheney@tu-dortmund.de

Bastian Schuchardt  
bastian.schuchardt@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.05.2022

Abgabe: 10.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Ausbreitung von Schallwellen . . . . .	3
2.2 Erzeugung von Ultraschall . . . . .	4
2.3 Ultraschallverfahren . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>4</b>
4.1 Vorbereitung . . . . .	4
4.1.1 Vorbereitungsaufgaben . . . . .	4
4.1.2 Kennenlernen und Einstellen des Programms . . . . .	5
4.2 Ausmessen der verwendeten Acrylzylinder . . . . .	7
4.3 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren . . . .	8
4.4 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren . . . .	8
4.5 Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren . . . . .	10
4.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells . . . . .	11
<b>5 Diskussion</b>	<b>12</b>
<b>Literatur</b>	<b>12</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Funktionsweise der Ultraschalltechnik untersucht werden, da sie vor allem in der medizinischen und materialwissenschaftlichen Technik ihre Anwendung findet und deshalb für die Experimentalphysik von Relevanz ist.

## 2 Theorie

Den Frequenzbereich des Schalls lässt sich in folgende Teilbereiche aufteilen. Einmal den für das menschliche Ohr hörbaren Bereich von ca. 16 Hz bis ca. 20 kHz, den Teilbereich darüber von ca. 20 kHz bis ca. 1 GHz, der auch Ultraschall genannt wird und den Teilbereich darüber ab 1 GHz, der auch Hyperschall genannt wird. Der Teilbereich unter dem hörbaren Bereich wird auch Infraschall genannt.

### 2.1 Ausbreitung von Schallwellen

Bei Schallwellen handelt es sich um longitudinale Wellen, die sich aufgrund von Druckschwankungen fortbewegt. Eine Schallwelle mit Ausbreitung in x-Richtung lässt sich Druckschwankungen

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

Dabei ist  $p_0$  der Normaldruck,  $v_0$  die Schallschnelle, und  $Z = \rho c$  die Akustische Impedanz mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  und der Dichte  $\rho$  des durchstrahlten Materials. Die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten lässt sich in Abhängigkeit ihrer Kompressibilität  $\kappa$  und ihrer Dichte  $\rho$  durch

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}}$$

ausdrücken. Da in Festkörpern auch die transversalen Wellen aufgrund der Schubspannung mit berücksichtigt werden müssen, wird  $\kappa$  durch den Zusammenhang zum Elastizitätsmodul  $E$  ersetzt. Es ergibt sich

$$c_{Fe} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Im Normalfall geht immer eine Teil der Energie bei der Schallausbreitung durch Absorption verloren. Daraus bestimmt sich die Intensität zu

$$U(x) = U_0 \cdot e^{-\alpha x}. \quad (1)$$

Dabei ist  $\alpha$  der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude. Um den Absorptionskoeffizienten möglichst gering zu halten, wird aufgrund des hohen Absorptionskoeffizienten der Luft ein Kontaktmittel zwischen Schallgeber und Material verwendet.

Außerdem können Schallwellen reflektiert werden. Der Reflexionskoeffizient ergibt sich in Abhängigkeit der akustischen Impedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  der Materialien durch

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

Für den Transmissionskoeffizienten ergibt sich

$$T = 1 - R$$

## 2.2 Erzeugung von Ultraschall

Ultraschallwellen können durch den piezo-elektrischen Effekt erzeugt werden. Dazu wird ein piezo-elektrischer Kristall, z.B. Quarz, in ein elektrisches Wechselfeld gebracht. Der Kristall beginnt nun an zu schwingen und emittiert Ultraschallwellen. Bei Resonanz werden so große Ultraschallamplituden erreicht. Umgekehrt kann bei angeregten Schwingungen ein elektrisches Wechselfeld gemessen werden, so dass die Quelle der Ultraschallwellen auch als Empfänger dienen kann.

## 2.3 Ultraschallverfahren

Es werden in der Ultraschalltechnik zwei Verfahren verwandt.

1. Beim *Durchschallungsverfahren* wird ein Sender und ein Empfänger verwendet. Dabei befindet sich die Probe zwischen dem Sender und dem Empfänger. Wenn der Sender nun einen Schallimpuls aussendet, bewegt sich dieser durch die Probe und verliert an Intensität. Weiterhin kann durch Störstellen die Intensität auch verringert werden bevor der Impuls zum Zeitpunkt  $t$  auf den Empfänger trifft.
2. Beim *Impuls – Echo – Verfahren* wird der Sender gleichzeitig als Empfänger verwendet. Nach der Laufzeit  $t$  wird die Intensität des Schallimpulses gemessen. Aus der Schallgeschwindigkeit  $c$  und der Laufzeit  $t$  lässt sich der Abstand zur Störstelle in der Probe durch

$$s = \frac{1}{2}ct \tag{2}$$

bestimmen.

# 3 Durchführung

## 4 Auswertung

### 4.1 Vorbereitung

#### 4.1.1 Vorbereitungsaufgaben

Als Vorbereitung auf die Versuchsreihe, werden Literaturwerte zur Dichte und Schallgeschwindigkeit verschiedener Materialien recherchiert. Anschließend wird die Impedanz

mithilfe von  $Z = \rho \cdot c$  ausgerechnet.

Die Werte lassen sich in Tabelle 1 finden. Anschließend wird die Wellenlänge und die

**Tabelle 1:** Literaturwerte und akustische Impedanzen verschiedener Materialien.

Material	Schallgeschwindigkeit $c$ / $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Dichte $\rho$ / $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Akustische Impedanz $Z$ / $\frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \cdot 10^6$
Luft	331 [1]	$1,300 \cdot 10^{-3}$ [1]	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Wasser	1492 [1]	0,9982 [1]	1,48
Blut	1530 [1]	1,03 [1]	1,56
Knochen	3600 [1]	1,7 [1]	6,12
Acryl	2730 [3]	1,189 [2]	3,25

Periode einer 2 MHz Schwingung in Acryl ausgerechnet.

$$\lambda = \frac{c}{f} = 1,365 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3)$$

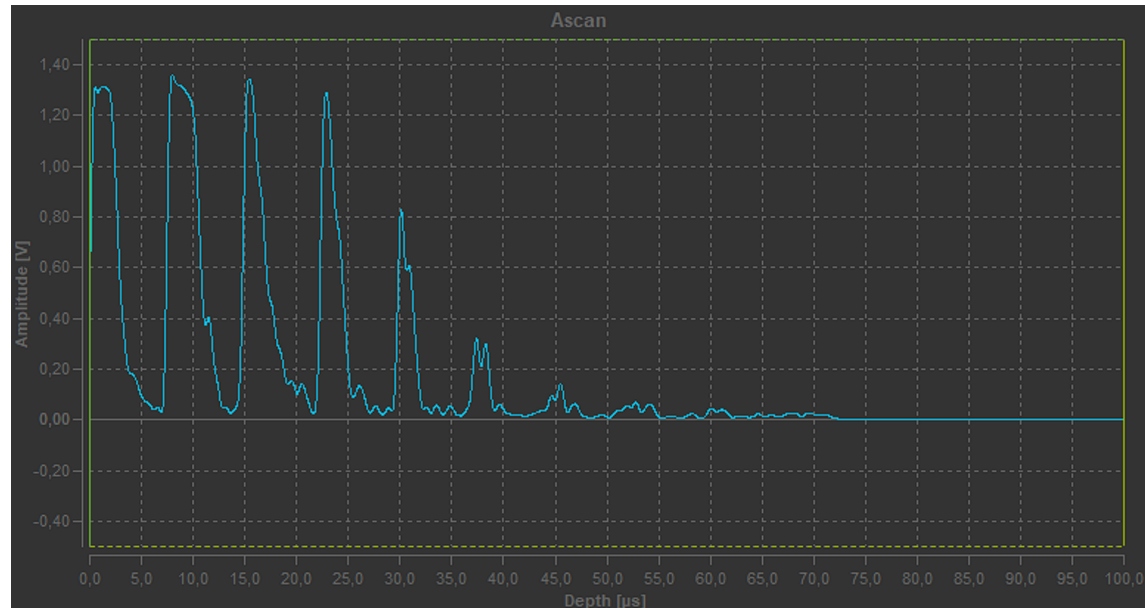
$$T = \frac{1}{f} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (4)$$

#### 4.1.2 Kennenlernen und Einstellen des Programms

Mit der Schieblehre wird die Dicke der ausgewählten Acrylplatte gemessen. Diese beträgt  $d = (9,95 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Anschließend wird ein A-Scan durchgeführt, welcher die Graphik in Abbildung 1 erzeugt.

In der Abbildung lassen sich fünf Schwingungen besonders gut erkennen. Von diesen



**Abbildung 1:** A-Scan der 1 cm dicken Acrylplatte.

Schwingungen wird die Laufzeit und Amplitude mittels importierter Daten aus dem Programm bestimmt und in Tabelle 2 aufgelistet. Aus den gemessenen Daten wird der

**Tabelle 2:** Laufzeiten und Amplituden der ersten fünf Schwingungen.

Schwingung	Laufzeit $t$ / $\mu\text{s}$	Amplitude $A$ / V
1	7,12	1,316
2	7,28	1,366
3	7,40	1,340
4	7,64	1,297
5	7,22	0,880

Mittelwert der Laufzeit und anschließend die Schallgeschwindigkeit mittels Gleichung 2 bestimmt.

Mittelwert der Laufzeit:

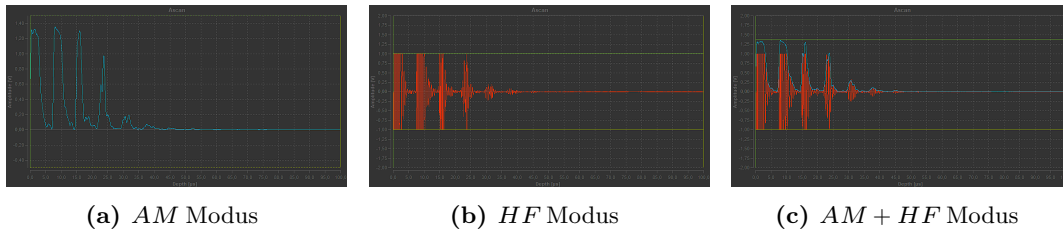
$$t = (7,33 \pm 0,09) \mu\text{s}$$

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

$$c = (2714,87 \pm 13,64) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Unsicherheit wurde mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt. Die Schallgeschwindigkeit in Acryl lautet somit  $c_{\text{Acryl}} = (2714,87 \pm 13,64) \text{ m/s}$ .

Nun wird zwischen den Anzeigemodi  $AM$ ,  $HF$  und  $AM + HF$  gewechselt und Bilder der Modi aufgezeichnet. Die Bilder sind in Abbildung 2 gezeigt.

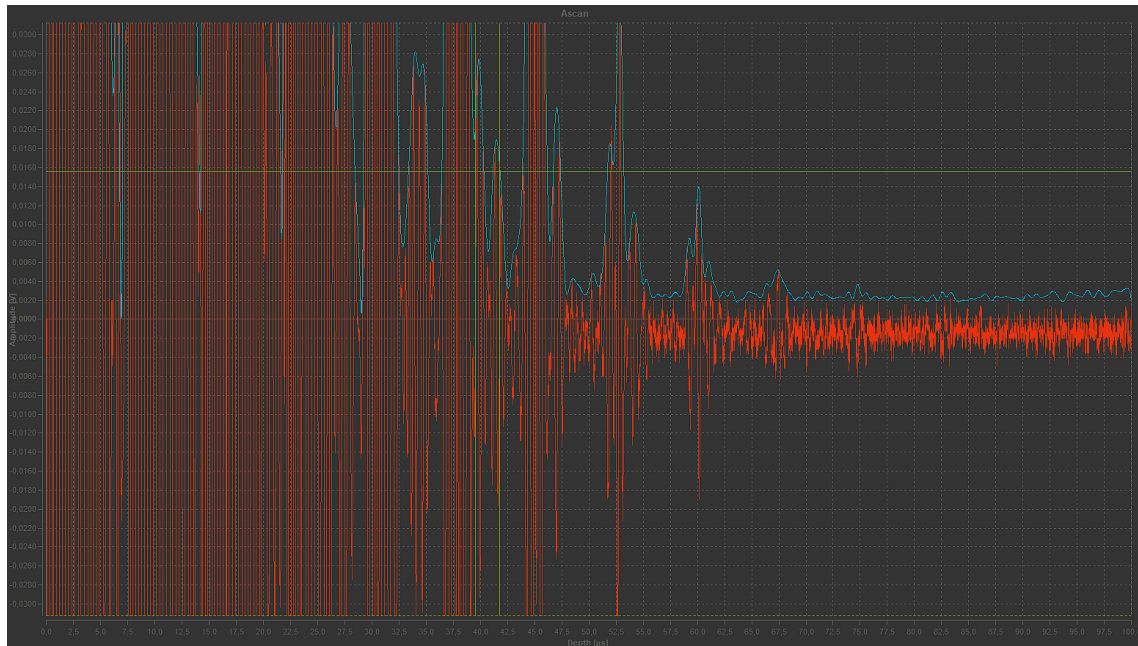


**Abbildung 2:** Alle drei verschiedenen Anzeigemodi

Es lässt sich erkennen, dass im  $HF$ -Modus jede einzelne Schwingung angezeigt wird, während im  $AM$ -Modus jeweils nur die positiven Amplituden jener Schwingungen angezeigt werden. Im  $AM + HF$ -Modus werden jene zwei Modi kombiniert ausgegeben.

Je nach Versuchsteil wird ein anderer Modus verwendet.

Als nächstes wird der  $AM + HF$ -Modus eingeschaltet und bei einer 2 MHz Schwingung die Periode einer Schwingung ausgerechnet. Dafür wird über fünf Perioden hinweg gemittelt. Der verwendete Bereich ist mittels grünen Balken in Abbildung 3 eingezeichnet. Die fünf Perioden zusammenaddiert haben eine Länge von  $T_5 = 2,2 \mu\text{s}$ . Dieser Messwert wird durch fünf geteilt, um die Länge einer Periode zu erhalten:  $T_1 = \frac{2,2}{5} \mu\text{s} = 0,44 \mu\text{s}$ . Daraus



**Abbildung 3:** 2 MHz Schwingung im *AM + HF*-Modus angezeigt.

lässt sich nun die Wellenlänge und Frequenz der Schwinung in Acryl berechnen:

$$f = \frac{1}{T} = 2272727,27 \frac{1}{s} = 2,3 \text{ MHz}$$

$$\lambda = (1,19 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Mittels der Tiefenmessung des Programms wird für die Acrylplatte eine Dicke von 1 cm gemessen.

## 4.2 Ausmessen der verwendeten Acrylzyylinder

Insgesamt stehen vier verschiedene Größen von Acrylzyindern zur Verfügung. Diese werden alle mit einer Schieblehre ausgemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 3 eingetragen. Die Schieblehre hat eine Messungenauigkeit von 0,05 mm.

**Tabelle 3:** Messwerte der vier verschiedenen Acrylzyylinder.

Zylindernummer	Höhe $h$ / mm	Durchmesser $d$ / mm
1	120,90	40,00
2	80,50	40,10
3	61,55	40,45
4	40,45	40,15

### 4.3 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

In dieser Versuchsreihe werden die vier Zylinder mittels Impuls-Echo-Verfahren beschallt. Zudem wird noch ein 10 cm großer Zylinder aus den einzelnen Zylindern gebaut und beschallt.

**Tabelle 4:** Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren aufgenommene Messwerte.

Höhe $h$ / mm	Ausges. Imp. $U_A$ / V	Startzeit $t_0$ / $\mu\text{s}$	Reflekt. Imp. $U_R$ / V	Endzeit $t_R$ / $\mu\text{s}$
40,45	1,318	1,260	1,250	30,26
61,55	1,318	1,280	0,619	46,04
80,50	1,319	1,240	0,304	59,50
102,00	1,318	1,260	0,068	75,34
120,90	1,319	1,260	1,193	88,56

Mittels dieser Messwerte wird eine lineare Ausgleichsrechnung mit Python durchgeführt. Die Theoriekurve ergibt sich aus Gleichung 2 und einer Anpassungsschicht  $d$  für die Sonde. Die Geradengleichung lautet also

$$2l = c \cdot t + d.$$

$l$  ist die jeweilige Länge des Zylinders und  $t = t_R - t_0$  die Laufzeit der Schwingung.  $t_0$  ist der Zeitpunkt des Peaks des ausgesendeten Impulses und  $t_r$  der Zeitpunkt des Peaks des reflektierten Impulses.

Mittels Python ergibt sich dann die Steigung und der y-Achsenabschnitt der Geraden. Die Steigung entspricht der Schallgeschwindigkeit in Acryl  $c_{\text{Acryl}}$  und der y-Achsenabschnitt entspricht der Anpassungsschicht  $d$ .

$$\begin{aligned} c_{\text{Acryl}} &= (2,75895 \pm 0,01631) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} &= (2758,95 \pm 16,31) \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ d &= (0,26 \pm 1,02) \text{ mm} &= (0,26 \pm 1,02) \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Die Messwerte und Ausgleichsfunktion sind in Abbildung 4 dargestellt.

### 4.4 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren

Für diese Versuchsreihe werden alle 4 Zylindergrößen horizontal platziert und mittels zwei Sonden durchschallt.

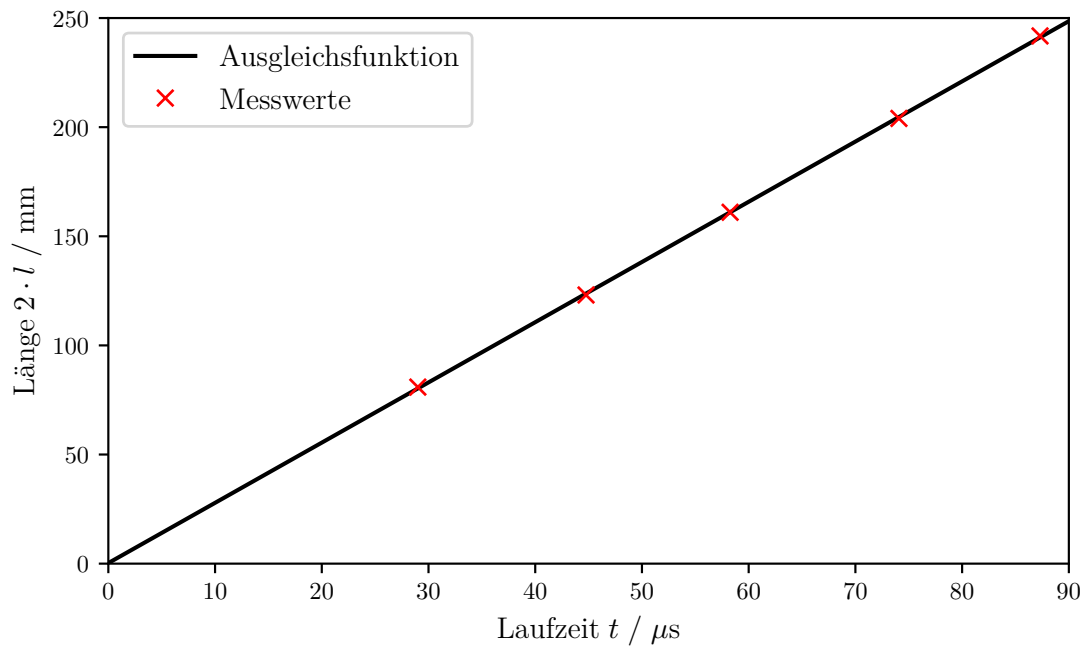
Mit diesem Verfahren ergibt sich für die Strecke die Gleichung

$$l = c \cdot t + d,$$

da der Weg bis zur Singnalempfangung nur einmal zurückgelegt wird.

Mittels A-Scan wird die Laufzeit des Impulses gemessen und in Tabelle 5 aufgelistet.

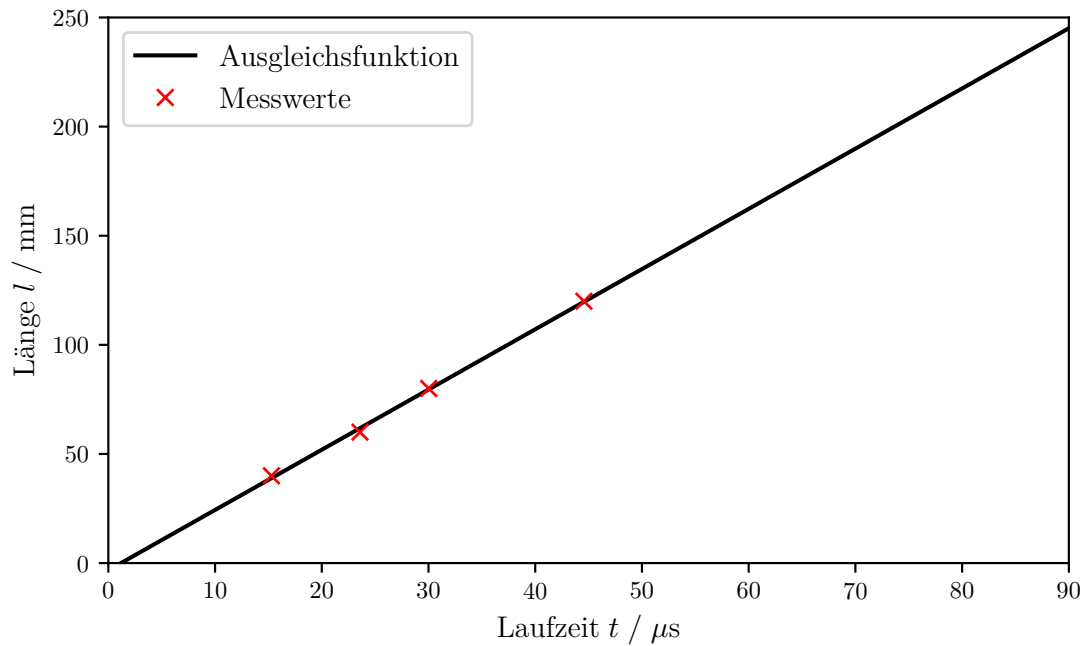




**Abbildung 4:** doppelte Zylinderhöhe  $l$  geplottet gegen die Laufzeit  $t$  beim Impuls-Echo-Verfahren.

**Tabelle 5:** Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren aufgenommene Messwerte.

Höhe $h / mm$	Startzeit $t_0 / \mu s$	Endzeit $t_R / \mu s$
40	0,2	15,48
60	0,2	23,78
80	0,2	30,22
120	0,2	44,76



**Abbildung 5:** Zylinderhöhe  $l$  geplottet gegen die Laufzeit  $t$  beim Durchschallungs-Verfahren.

Es wird mit der obigen Gleichung eine Ausgleichsrechnung in Python durchgeführt. Mit Python wird nun erneut Steigung und y-Achsenabschnitt bestimmt. Die Steigung entspricht erneut der Schallgeschwindigkeit in Acryl  $c_{\text{Acryl}}$  und der y-Achsenabschnitt der Anpassungsschicht  $d$ .

$$c_{\text{Acryl}} = (2,75913 \pm 0,07181) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} = (2759,13 \pm 71,81) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d = (-3,25 \pm 2,18) \text{ mm} = (-3,25 \pm 2,18) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Die Messwerte und Ausgleichsfunktion sind in Abbildung 5 dargestellt.

#### 4.5 Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Für die Bestimmung der Dämpfung der Ultraschallwellen in Acrylglas, werden die Messwerte aus Tabelle 4 verwendet.

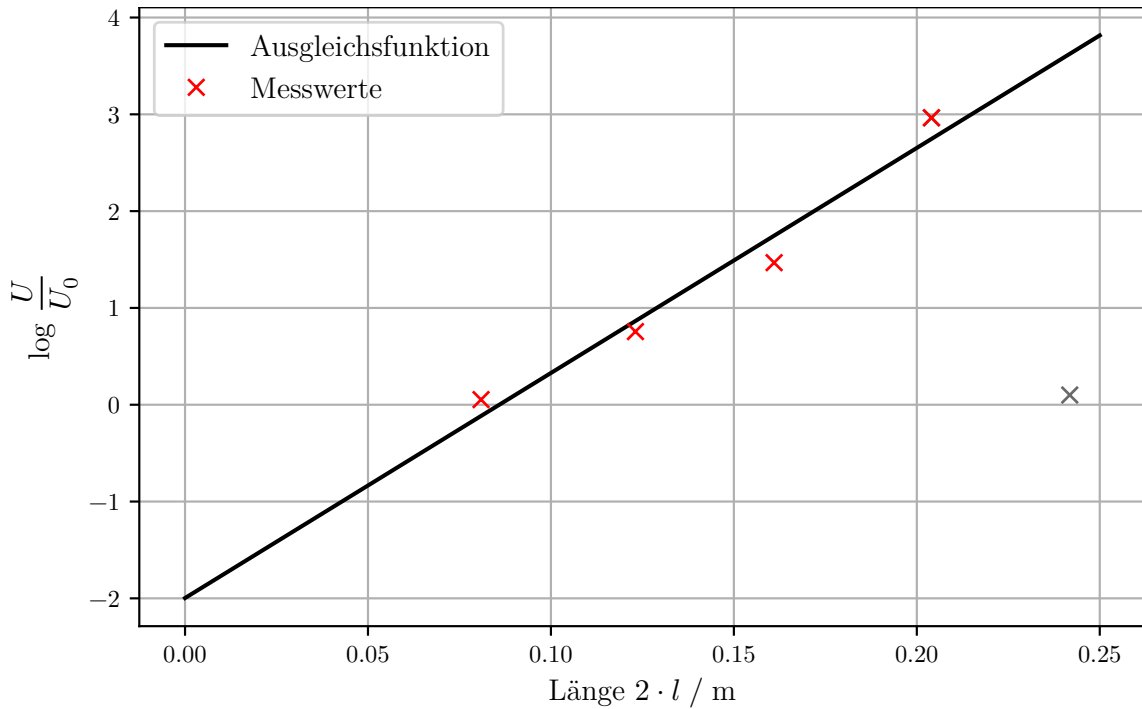
Zwischen Dämpfung und Amplituden besteht der Zusammenhang aus Gleichung 1. Diese Gleichung wird zu

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

umgestellt, damit eine Ausgleichsrechnung mittels Python durchgeführt werden kann. Der letzte Messwert der Amplituden wird ignoriert, da dieser stark von den anderen

abweicht und auf einen Messfehler hindeutet.

Mittels Python wird die Steigung, die Dämpfung, bestimmt und anschließend in Abbildung 6 geplottet. Die Dämpfung beträgt somit  $\alpha = (23,2 \pm 3,2) \text{ 1/m}$ .



**Abbildung 6:** Halblogarithmische Darstellung der Amplitudenverhältnisse gegen die zurückgelegte Strecke innerhalb der Acrylzyylinder.

## 4.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

In dieser Versuchsreihe wird ein Augenmodell mittels Impuls-Echo-Verfahren durchschallt. Im Programm zur Visualisierung des Schalls lassen sich vier deutliche Haupt-Peaks erkennen. Diese sind der Iris, Ein- und Austreten der Linse und der Retina zuzuordnen. Bei der Auswertung muss darauf geachtet werden, dass in dem Glaskörper, der Augenkammer und der Linse jeweils unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten herrschen.

Das Kammerwasser der Augenkammer kann mit Wasser angenähert werden  $c_{\text{Wasser}} = 1492 \text{ m/s}$  [1]. Die Schallgeschwindigkeit in der Linse beträgt  $c_L = 2500 \text{ m/s}$  und in der Glaskörperflüssigkeit  $c_{\text{GK}} = 1410 \text{ m/s}$  [4].

Die Messwerte sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Mittels der Gleichung 2 und Python werden nachfolgende Distanzen bestimmt.

**Tabelle 6:** Beim Untersuchen des Augenmodells aufgenommene Daten.

Peak	Laufzeit $t$ / $\mu\text{s}$	Amplitude $U$ / V
1	10,38	0,7614
2	15,74	0,7179
3	22,50	0,1633
4	72,04	0,1088

Hornhaut zu Iris = 0,77 cm

Iris zu Anfang Linse = 0,39 cm

Dicke Linse = 1,65 cm

Ende Linse bis Retina = 2,27 cm

## 5 Diskussion

### Literatur

- [1] Medizinphysik TU Dortmund. *verschiedene Dichten*. URL: [https://qnap.e3.physik.tu-dortmund.de/suter/Vorlesung/MedizinphysikII\\_15/14\\_Ultraschall.pdf](https://qnap.e3.physik.tu-dortmund.de/suter/Vorlesung/MedizinphysikII_15/14_Ultraschall.pdf). (besucht am 06.05.2022).
- [2] imeter.de. *Dichte Acryl*. URL: [https://www.imeter.de/images/ART/M9/imeter\\_Dichtemessung\\_PMMA\\_Ausdehnung.pdf](https://www.imeter.de/images/ART/M9/imeter_Dichtemessung_PMMA_Ausdehnung.pdf). (besucht am 06.05.2022).
- [3] Olympus. *Schallgeschwindigkeit Acryl*. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/>. (besucht am 06.05.2022).
- [4] *US 1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2014.