

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</b> | <b>Zielsetzung</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theorie</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1      | Ausbreitung von Schallwellen . . . . .                                   | 3         |
| 2.2      | Erzeugung von Ultraschall . . . . .                                      | 4         |
| 2.3      | Ultraschallverfahren . . . . .   | 4         |
| <b>3</b> | <b>Durchführung</b>  | <b>4</b>  |
| <b>4</b> | <b>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 . . . . .                   | 10        |
| <b>5</b> | <b>Diskussion</b>  | <b>11</b> |
|          | <b>Literatur</b>   | <b>11</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

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

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

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}} \quad (2)$$

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

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

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

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}. \quad (4)$$

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

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

Für den Transmissionskoeffizienten ergibt sich

$$T = 1 - R \quad (6)$$

## 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

$$s = \frac{1}{2}ct \quad (7)$$

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.

$$\lambda = \frac{c}{f} = 1,365 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (8)$$

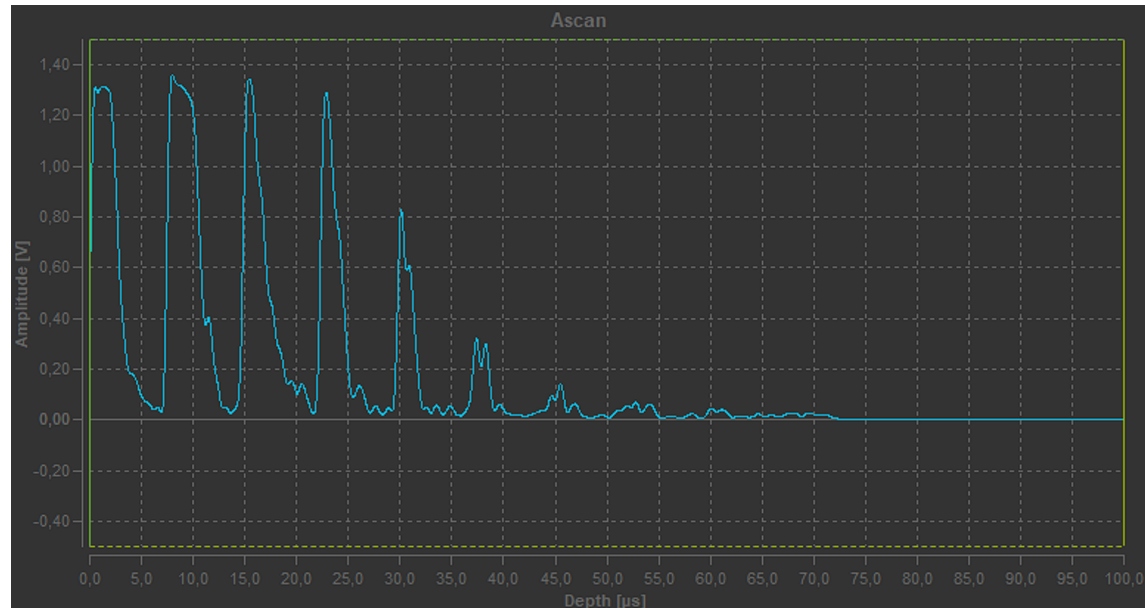
$$T = \frac{1}{f} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (9)$$

#### 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 7 bestimmt.

Mittelwert der Laufzeit:

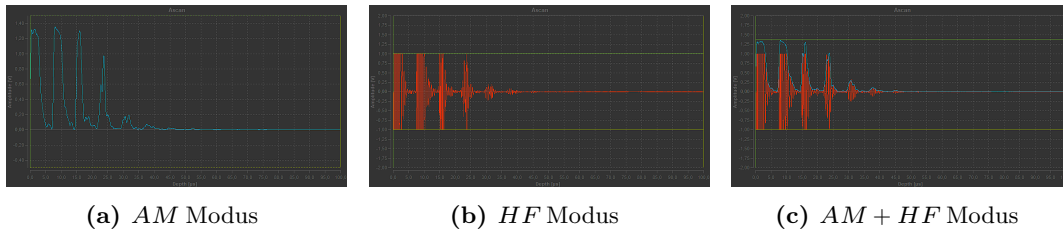
$$t = (7,33 \pm 0,09) \mu\text{s}$$

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

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

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 7 und einer Anpassungsschicht  $d$  für die Sonde. Die Geradengleichung lautet also

$$2l = c \cdot t + d. \quad (10)$$

$l$  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.

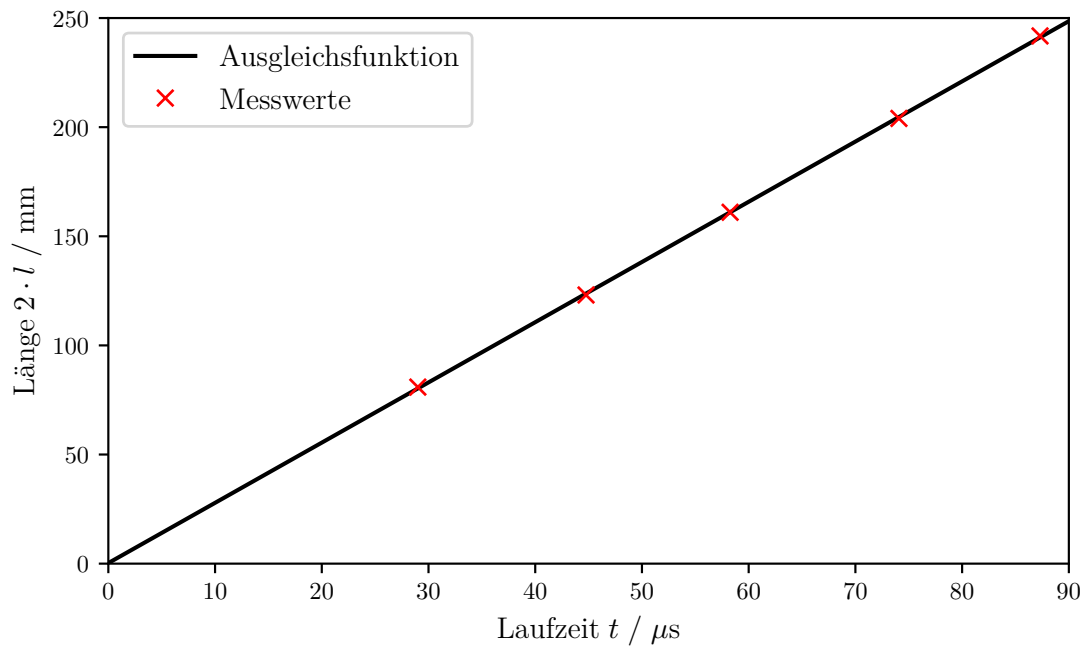
Mit diesem Verfahren ergibt sich für die Strecke die Gleichung

$$l = c \cdot t + d, \quad (11)$$

da der Weg bis zur Singnalempfangung nur einmal zurückgelegt wird.

Mittels A-Scan wird die Laufzeit des Impulses gemessen und in





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

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

| Höhe $h / mm$ | Zeitpunkt eingehender Impuls $t_0 / \mu s$ | Zeitpunkt reflektierter Impuls $t_R / \mu s$ |
|---------------|--|--|
| 40            |  |  |
| 60            |  |  |
| 80            |  |  |
| 120           |  |  |

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

**4.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells**

## 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).