

US1

# **Grundlagen der Ultraschalltechnik**

Sonia Chander

sonia.chander@tu-dortmund.de

Jana Schlücking

jana.schluecking@tu-dortmund.de

Durchführung: 18.05.2021

Abgabe: 25.05.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Die allgemeine Schallwelle . . . . .	3
2.2 Der Ultraschall . . . . .	4
2.2.1 Das Durchschallungsverfahren . . . . .	4
2.2.2 Das Impuls-Echo-Verfahren . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	5
3.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und Untersuchung von Fehlstellen	5
3.3 Untersuchung des Augenmodells . . . . .	7
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit . . . . .	7
4.2 Bestimmung des Absorptionskoeffizienten . . . . .	9
4.3 Bestimmung der Abstände im Auge . . . . .	10
<b>5 Diskussion</b>	<b>11</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>12</b>
<b>Literatur</b>	<b>15</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Schallgeschwindigkeit in Acryl mithilfe des Impuls-Echo Verfahren bestimmt werden. Zusätzlich wird mit derselben Methode ein Acrylblock auf Fehlstellen, sowie ein Augenmodell untersucht.

## 2 Theorie

### 2.1 Die allgemeine Schallwelle

Der Schall ist eine longitudinale Welle und kann wie folgt beschrieben werden:

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

Dabei ist  $Z = c \cdot \rho$  die akustische Impedanz, auch Schallkennwiderstand genannt.  $\rho$  beschreibt die Dichte des durchstrahlten Materials,  $c$  die Schallgeschwindigkeit in diesem Material.

Die Phasengeschwindigkeit einer Schallwelle ist materialabhängig. In Flüssigkeiten hängt sie neben der Dichte  $\rho$  auch von der Kompressibilität  $\kappa$  ab. Es gilt:

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

Wird die Schallwelle in einem Festkörper betrachtet, kommt aufgrund von Schubspannungen ein transversaler Anteil zur Welle hinzu. In diesem Fall wird das Elastizitätsmodul  $E$  hinzugezogen um die Schallgeschwindigkeit auszudrücken:

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

Zusätzlich ist die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern richtungsabhängig und unterscheidet sich somit für den longitudinalen und transversalen Anteil der Welle.

Ähnlich wie die elektromagnetische Welle kann die Schallwelle reflektiert oder gebrochen werden. Unter anderem wird ein Teil der Energie bei Ausbreitung der Welle absorbiert. Für die Abnahme der Intensität  $I_0$  über die Strecke  $x$  gilt:

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

Hier ist  $\alpha$  der Absorptionskoeffizient. Bei Auftreffen der Welle auf eine Grenzfläche wird ein Teil reflektiert. Dieser Reflexionskoeffizient kann dann über die akustischen Impedanzen  $Z$  der beiden Materialien ausgedrückt werden:

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

Der Transmissionskoeffizient  $T$  folgt aus  $T = 1 - R$ .

## 2.2 Der Ultraschall

Schallwellen werden nach bestimmten Frequenzbereichen kategorisiert. Während der Mensch Frequenzen von 16 Hz bis 20 kHz wahrnimmt, werden Frequenzen über 20 kHz bis zu 1 GHz als Ultraschall bezeichnet.

Um diesen Ultraschall zu erzeugen, wird der reziproken piezo-elektrischer Effekt verwendet. Hierbei wird ein piezoelektrischer Kristall in einem elektrischen Wechselfeld zum Schwingen angeregt, wodurch Ultraschallwellen entstehen. Bei Resonanz können besonders große Schwingungsamplituden erzeugt werden, diese erlauben eine Nutzung von hohen Schallenergiedichten. Der Kristall kann auch als Schallempfänger verwendet werden. Dabei wird der Kristall durch die auftreffenden Schallwellen zum Schwingen angeregt. Der meist benutzte piezoelektrischer Kristall ist Quarz, aufgrund seiner stabilen physikalischen Eigenschaften. Nur ist der piezoelektrischer Effekt bei Quarz relativ schwach.

Um einen Körper mithilfe von Ultraschall zu untersuchen, werden häufig Laufzeitmessungen durchgeführt. Ein kurzer Schallimpuls wird ausgesendet und von einem Empfänger aufgenommen. Die dafür benötigte Laufzeit wird dabei gemessen, die zurückzulegende Strecke wird zuvor definiert. Dazu gibt es zwei Verfahren in der Ultraschalltechnik: das Durchschallungs- und das Impuls-Echo-Verfahren.

### 2.2.1 Das Durchschallungsverfahren

An einem Körper befindet sich auf einer Seite der Ultraschallsender und auf der anderen der Empfänger. Ein kurzer Schallimpuls wird, wie in Unterabschnitt 2.2 beschrieben, ausgesendet und vom Empfänger aufgenommen. Bei Fehlstellen im Körper wird eine schwächere Intensität beim Empfänger registriert. Genauere Aussagen über Position und Größe der Fehlstelle können nicht getroffen werden, in Abbildung 1a wird dies ersichtlich.

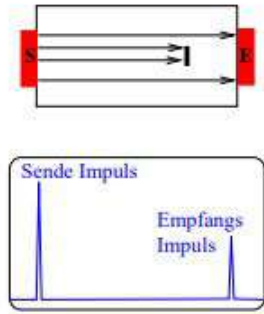
### 2.2.2 Das Impuls-Echo-Verfahren

Hier ist der Ultraschallsender auch gleichzeitig der Empfänger. Der kurze Impuls wird bei einer Grenzfläche reflektiert und wieder aufgenommen. Aussagen über die Fehlstellen wie ihre Größe oder ihre Position können mithilfe der Höhe des Echos, der Schallgeschwindigkeit und der Laufzeit  $t$  gemacht werden. Es ergibt sich der Zusammenhang:

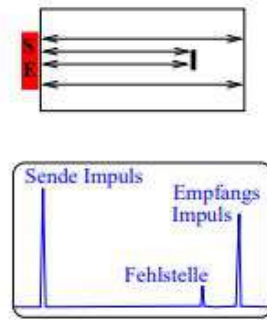
$$s = \frac{1}{2}c \cdot t \quad (2)$$

In Abbildung 1b wird dieses Prinzip der Reflexion anschaulich skizziert.

### Durchschallungs-Verfahren



### Impuls-Echo-Verfahren



(a) Das Durchschallungsverfahren skizziert. Durch die Pfeile kann bildlich nochvollzogen werden, warum so wenige Aussagen über die Fehlstelle getroffen werden können.[2]

(b) Das Impuls-Echo-Verfahren skizziert. Durch die aufgenommene Reflexion der Impulse können mehr Aussagen über die Fehlstelle getroffen werden. [2]

**Abbildung 1:** Die beiden Abbildungen zu den unterschiedlichen Messverfahren.

## 3 Durchführung

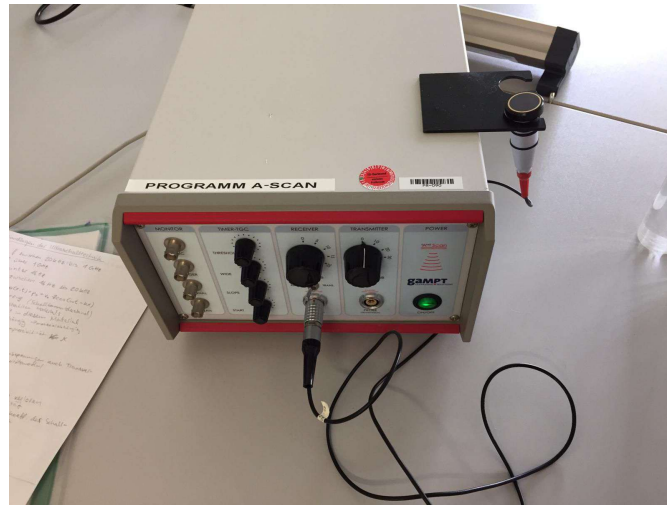
Dieser Versuch wird nur mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens durchgeführt.

### 3.1 Versuchsaufbau

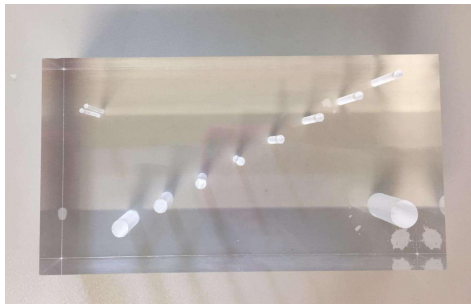
In Abbildung 2 ist das Ultraschallechoskop zu sehen. Mithilfe der Ultraschallsonde sollen die Probe untersucht werden, diese ist auf 2 MHz voreingestellt. Die aufgenommenen Daten des Echoscops werden von einem Rechner erfasst und in einem A-Scan abgebildet. Die Abszisse beschreibt dabei die Laufzeit  $t$  des Impulses in  $\mu\text{s}$ , auf der Ordinate wird die Eingangsspannung in Volt angegeben.

### 3.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und Untersuchung von Fehlstellen

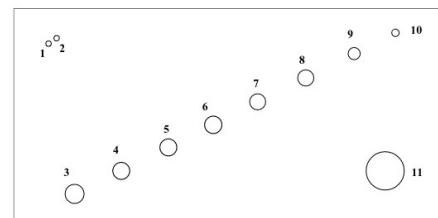
Zunächst soll die Schallgeschwindigkeit in Acryl bestimmt werden. Dafür wird der Acrylblock (siehe Abbildung 3a) sowie die Positionen der Fehlstellen mit der Schieblehre vermessen und mithilfe eines A-Scans untersucht. Als Kontaktmittel wird hier bidestilliertes Wasser verwendet, da Luft den Ultraschall stark absorbiert. Zusätzlich steht der Acrylblock auf einem Papiertuch. Die Kontaktmittel beeinflussen die Messung nicht. Die Sonde wird auf dem Block über eine Fehlstelle gesetzt. Die vom Rechner angegebenen Ausschläge werden notiert und die Sonde wird zur nächsten Fehlstelle bewegt. Dieser Vorgang wird für alle Fehlstellen im Block wiederholt. Der Block wird gedreht und der gerade beschriebene Messvorgang nochmals wiederholt.



**Abbildung 2:** Das Ultraschallechoskop. Rechts ist die Ultraschallsonde angehängt.



**(a)** Der Acrylblock und seine Fehlstellen.



**(b)** Schema zur Nummerierung der Störstellen.

[1]

**Abbildung 3:** Zwei Abbildungen zur Beschreibung des Acrylblocks mit den Störstellen.

### 3.3 Untersuchung des Augenmodells

Nun soll das Augenmodell (siehe Abbildung 4) untersucht werden. Als Kontaktmittel wird ein Koppelgel verwendet. Die Sonde wird vorsichtig über die Iris bewegt bis auf dem Rechner mehrere Ausschläge zu sehen sind. Das angezeigte Bild des Rechners wird schnell fotografiert und einige Messwerte werden aufgenommen.



Abbildung 4: Das Augenmodell.

## 4 Auswertung

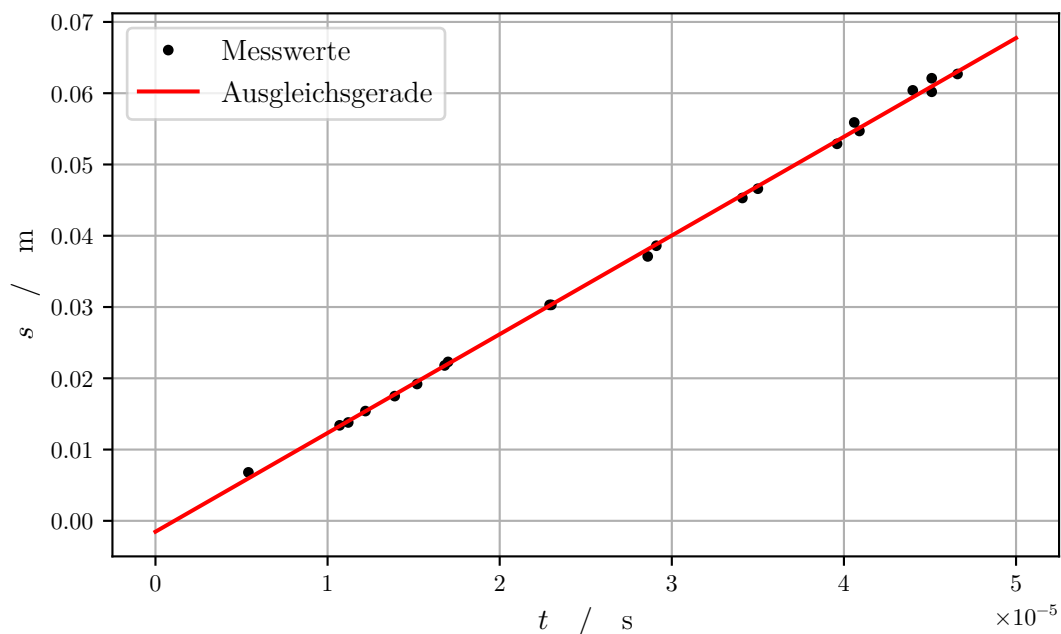
### 4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Der Acrylblock hat die Maße  $149,3 \text{ mm} \times 79,6 \text{ mm} \times 41,7 \text{ mm}$ , welche mit einer Schieblehre gemessen wurden. Mit dem Ultraschallechoskop werden im Impuls-Echo-Verfahren die Störstellen einmal von der Oberseite, also der Seite, wo die Stellen 1 und 2 oben sind, und einmal von der Unterseite gemessen; die Messpunkte bestehen aus Tupel von Zeit und Amplitude. Zusätzlich werden die Abstände der Störstellen zur jeweiligen Außenkante mit einer Schieblehre ermittelt. In der Tabelle 1 sind die Messdaten zu finden.

Es ist zu sehen, dass die Störstelle 10 von der Unterseite nicht durch das Ultraschallechoskop zu messen ist, da diese Stelle komplett durch die Störstelle 11 abgedeckt ist. Da die Stelle 11 einen größeren Durchmesser hat, ist sie von der Oberseite dennoch zu bestimmen.

**Tabelle 1:** Die Werte von den Messungen des Acrylblockes mit Störstellen.

Nr	Oberseite			Unterseite		
	$t / \mu\text{s}$	$A / \text{V}$	$s / \text{mm}$	$t / \mu\text{s}$	$A / \text{V}$	$s / \text{mm}$
1	15,2	0,134	19,2	44,0	0,025	60,4
2	13,9	0,118	17,5	45,1	0,017	62,1
3	45,1	0,039	60,2	10,7	0,305	13,4
4	39,6	0,025	52,9	16,8	0,188	21,8
5	34,1	0,031	45,3	23,0	0,050	30,3
6	28,6	0,056	37,1	29,1	0,062	38,6
7	22,9	0,090	30,3	35,0	0,045	46,6
8	17,0	0,132	22,3	40,9	0,045	54,7
9	11,2	0,199	13,8	46,6	0,022	62,7
10	5,4	0,303	6,8			72,8
11	40,6	0,045	55,9	12,2	0,342	15,4



**Abbildung 5:** Die aufgenommenen Werte geplottet inclusive einer Ausgleichsgerade.

In der Abbildung 5 sind die Daten aus der Tabelle 1 in einem  $t$ - $s$ -Diagramm aufgetragen. Zusätzlich ist eine Ausgleichsrechnung der Form  $s = a \cdot t + b$  geplottet. Die Parameter



ergeben sich zu:

$$a = (1385,33 \pm 9,97) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

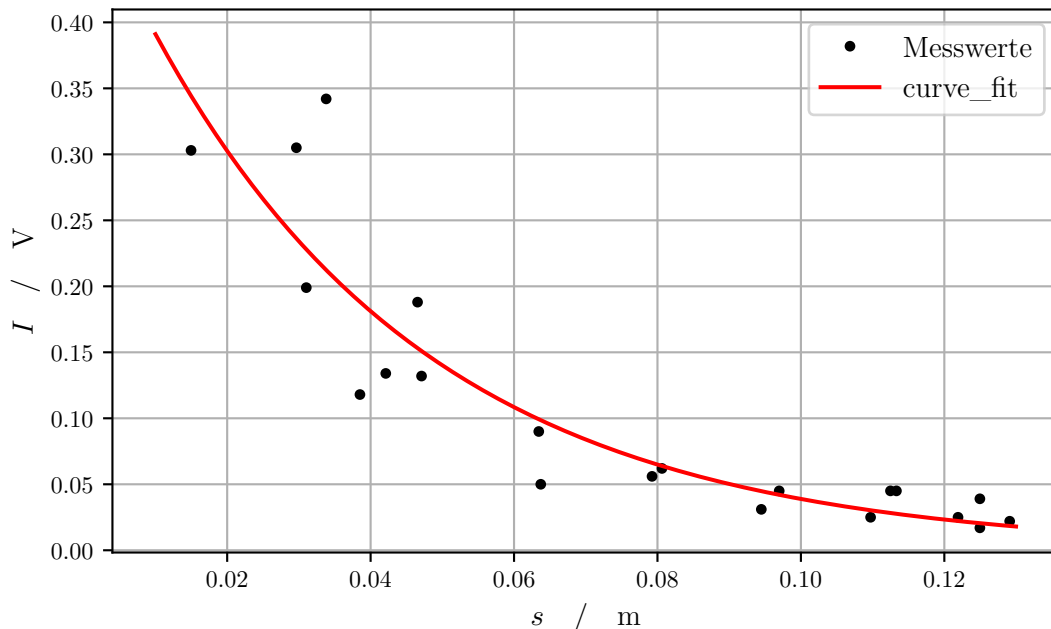
$$b = (-0,0015 \pm 0,0003) \text{ m}$$

Durch Vergleich mit der Formel (2) lässt sich die Schallgeschwindigkeit in Acryl errechnen:

$$c = 2 \cdot a = (2771 \pm 20) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 4.2 Bestimmung des Absorptionskoeffizienten

Nun werden die Werte der Amplitude  $A$  aus der Tabelle 1 in Abhängigkeit von der Entfernung zur Außenkante aufgetragen. Für die Strecke wird im folgenden der Ausdruck  $s(t) = c \cdot t$  benutzt. Dies beschreibt die Strecke, die die Schallwelle zurücklegt, bis sie vom dem Ultraschallechoskop wieder aufgenommen wird. Der Plot ist in der Abbildung 6 zu finden.



**Abbildung 6:** Die Amplitude aufgetragen gegen die im Acrylblock zurückgelegte Strecke.

In die Abbildung 6 ist außerdem eine Ausgleichsrechnung der Form  $I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$  eingetragen. Die Parameter dafür ergeben sich zu:

$$I_0 = (0,5054 \pm 0,0724) \text{ V}$$

$$\alpha = (25,6531 \pm 3,7636) \frac{1}{\text{m}}$$

Der Absorptionskoeffizient wird mit  $\alpha$  beschrieben.

### 4.3 Bestimmung der Abstände im Auge

Abschließend wird das Augenmodell mit dem Ultraschallechoskop untersucht. In dem Foto 7 sind drei Peaks zu sehen. Es wird vermutet, dass der erste Peak die Reflektion an der Iris, der Zweite die Reflektion an der Linse und der dritte Peak die Reflektion an der Retina beschreibt. Die Zeiten wurden abgelesen zu:

$$\begin{aligned}t_1 &= 11,3 \mu\text{s} \\t_{\text{Linse}} &= 17,4 \mu\text{s} \\t_{\text{Retina}} &= 24,6 \mu\text{s}\end{aligned}$$

Mit den Schallgeschwindigkeiten für die Glaskörperflüssigkeit und das Linsenmaterial des Augenmodells,  $c_{\text{Gk}} = 1410 \text{ m/s}$  und  $c_{\text{L}} = 2500 \text{ m/s}$  nach [2], lassen sich nun die Abstände im Augenmodell bestimmen. Sie lauten:

$$\begin{aligned}s_{\text{Iris}} &= \frac{c_{\text{Gk}} \cdot t_1}{2} &&= 7,9665 \text{ mm} \\s_{\text{textLinse}} &= \frac{(t_2 - t_1) \cdot c_{\text{L}}}{2} + s_{\text{Iris}} &&= 15,5915 \text{ mm} \\s_{\text{textRetina}} &= \frac{(t_3 - t_2) \cdot c_{\text{Gk}}}{2} + s_{\text{Iris}} + s_{\text{Linse}} &&= 20,6675 \text{ mm.}\end{aligned}$$

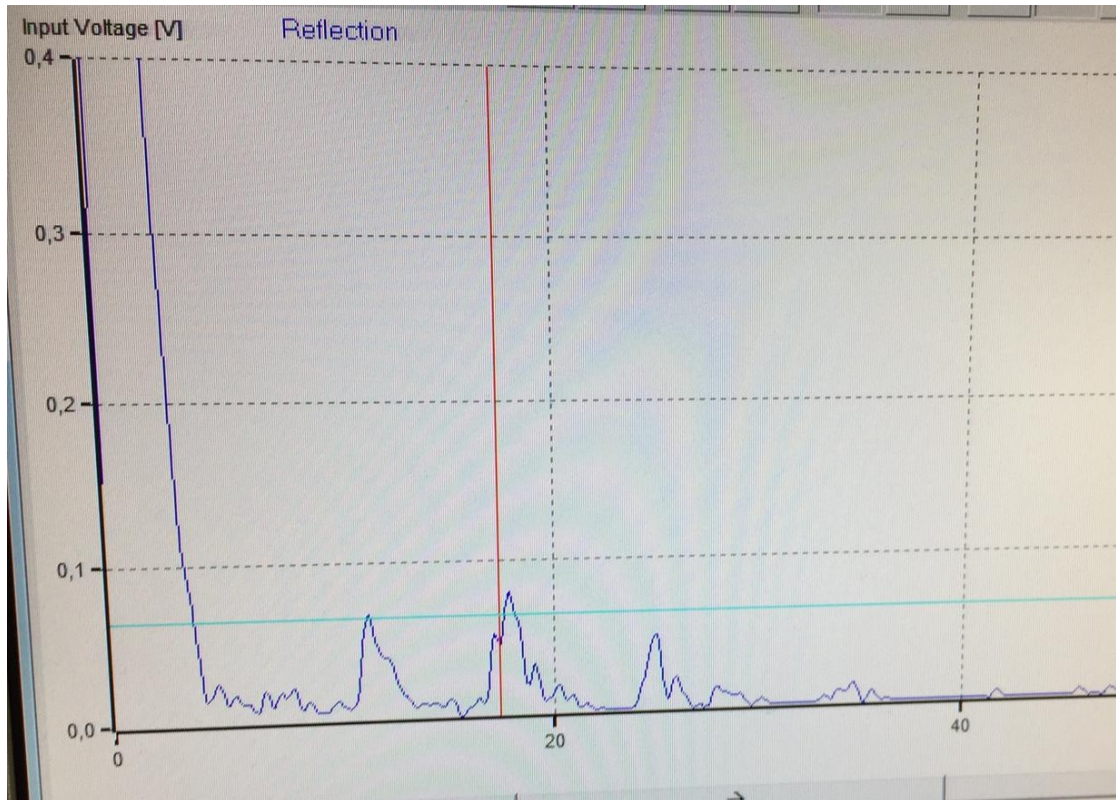


Abbildung 7: Das Foto von den aufgenommenen Peaks beim Messen des Augenmodells.

## 5 Diskussion

In dem Versuch wird experimentell die Geschwindigkeit von Schall in Acryl ermittelt. Der Literaturwert ist der Quelle [3] entnommen. Es ergibt sich:

$$c_{\text{exp}} = (2771 \pm 20) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{theo}} = 2730 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta c = 1,5 \%$$

Außerdem wird der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  bestimmt zu:

$$\alpha = (25,6531 \pm 3,7636) \frac{1}{\text{m}}$$

Das Ergebnis für die Schallgeschwindigkeit ist recht genau für die Art der Messung. Das Ausmessen des Blockes mit der Schieblehre sollte recht gute Ergebnisse liefern, jedoch war es aufgrund der geringen Durchmesser der Bohrungen schwierig, genau den Abstand von der ihren äußersten Stellen zu nehmen. Zu den Aufnahmen der Messpunkte von dem

**Tabelle 2:** Die Werte von den Messungen mit Ultraschall und Schieblehre im Vergleich.

Nr	Oberseite				Unterseite			
	$s_t$ / mm	$s$ / mm	$\Delta s_{\text{abs}}$ / mm	$\Delta s$ / %	$s_t$ / mm	$s$ / mm	$\Delta s_{\text{abs}}$ / mm	$\Delta s$ / %
1	20,748	19,2	1,548	−8,06	60,060	60,4	0,340	0,56
2	18,973	17,5	1,473	−8,42	61,561	62,1	−0,538	0,86
3	61,561	60,2	1,361	−2,26	14,605	13,4	1,205	−8,99
4	54,054	52,9	1,154	−2,18	22,932	21,8	1,132	−5,19
5	46,546	45,3	1,246	−2,75	31,395	30,3	1,095	−3,61
6	39,039	37,1	1,939	−5,23	39,721	38,6	1,121	−2,90
7	31,258	30,3	0,958	−3,16	47,775	46,6	1,175	−2,52
8	23,205	22,3	0,905	−4,06	55,828	54,7	1,128	−2,06
9	15,288	13,8	1,488	−10,78	63,609	62,7	0,909	−1,45
10	7,371	6,8	0,571	−8,39		72,8		
11	55,419	55,9	−0,481	0,86	16,653	15,4	1,253	−8,14

Ultraschallechoskop ist zu sagen, dass auf einem Computerbildschirm zwei Cusor nach Augenmaß gelegt werden, welche dann den Punkt bestimmen.

In der Tabelle 2 sind für die jeweilige Messung pro Störstelle aus der Laufzeit errechnete Strecke  $s_t$  und die mit der Schieblehre gemessene Strecke  $s$  aufgetragen. Die Strecke  $s_t$  wird über die Gleichung (2) mit dem Theoriewert für die Schallgeschwindigkeit in Acryl errechnet. Zusätzlich ist auch der Vergleich dieser Werte  $\Delta s_{\text{abs}} = s_t - s$ , sowie die prozentuale Abweichung mit  $\Delta s = (1 - \frac{s_t}{s})$  eingetragen. Es ist zu sehen, dass die prozentuale Abweichung für einige Werte recht hoch ist, wie beispielsweise bei der Messung von der Störstelle 9 von der Oberseite. Dies ist damit zu erklären, dass das Messen mit der Schieblehre bei den kleinen Durchmessern der Störstellen dieser schwierig zu messen war. Die Abweichung von −8,14 % bei der Messung von der Unterseite von Störstelle 11 ist mit der Überdeckung der Störstelle durch die Störstelle 10 zu erklären. Das Ultraschallechoskop kann somit nicht den kürzesten Abstand zur Außenkante messen, sondern nur einen Punkt weiter außen auf dem Umfang von der Störstelle.

Die Untersuchung des Augenmodell stellte die Herausforderung einer gewölbten Oberfläche, sodass bidestilliertes Wasser nicht als Kontaktmittel benutzt werden konnte, da es abfloß. Stattdessen wurde Ultraschallgel benutzt. Die gewölbte Fläche brachte auch die Schwierigkeit, dass die Ultraschallsonde sehr ruhig gehalten werden musste, da sich die Messergebnisse bei kleinster Bewegung schon veränderten. Somit war das zeitaufwändige Ablesen der Peaks beim Augenmodell sehr schwierig genau durchzuführen.

## 6 Anhang

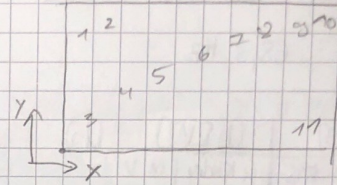
18.05.21

# US1 Grundlagen der Ultraschalltechnik

14,93 cm Länge

7,96 cm Höhe

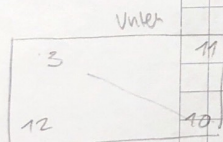
4,17 cm Breite



Anlagen von  
gemessen

Lochnummer

	x [mm]	y [mm]	d [mm]
1	14	60,4	
2	15,7	62,1	
3	26,6	13,4	6
4	41,8	21,8	4,9
5	57,4	30,3	4
6	72,7	38,6	3,9
7	90,7	46,6	2,7
8	105,7	54,7	2,6
9		65,8	2,9
		62,9	
10		72,8	2,2
		70,6	
11		15,4	8,3



	Zeit $\mu s$	Amplitude $\mu$
1	44	0,025
2	45,1	0,017
3	10,7	0,305
4	16,8	0,188
5	23	0,05
6	29,1	0,062
7	35	0,045
8	40,9	0,045
9	46,6	0,022
10		
11	12,2	0,342
nimmend	13,1	0,129



Reihenr.	Zeit [ $\mu$ s]	Amplitude [V]	
1	15,2	0,134	<div> <div>12</div> <div>3</div> <div>10</div> <div>11</div> </div>
2	13,9	0,118	
3	45,1	0,033	
4	39,6	0,025	
5	34,1	0,031	
6	28,6	0,056	
7	22,9	0,09	
8	17	0,132	
9	11,2	0,189	
10	5,4	0,303	
11	40,6	0,045	
<u>Ange</u>			
1.	11,3	0,053	
2.	17,4	0,065	
3.	24,6	0,046	

P.L.

## Literatur

- [1] *Altprotokoll zum Versuch US1*. URL: <http://fachschaft-physik.tu-dortmund.de/wordpress/wp-content/uploads/altprotokolle/ap/US1.pdf>.
- [2] TU Dortmund. *US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. 2021.
- [3] *Literaturwert der Schallgeschwindigkeit in Acryl*. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/> (besucht am 22.05.2021).