

## **VERSUCH US1**

# **Grundlagen der Ultraschalltechnik**

Annika Bennemann  
annika.bennemann@tu-dortmund.de

Paulin Vehling  
paulin.vehling@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>
<b>3</b>	<b>Aufbau</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
4.1	Vermessung der Probestücke mit dem Impuls-Echo-Verfahren . . . . .	5
4.2	Vermessung der Probestücke mit dem Durchschallungsverfahren . . . . .	6
4.3	Spektrale Analyse (FFT) und Cepstrum . . . . .	6
4.4	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
5.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und der Dämpfungskonstante mit dem Impuls-Echo-Verfahren . . . . .	7
5.2	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungsverfahren	11
5.3	Spektrale Analyse (FFT) und Cepstrum . . . . .	13
5.4	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>17</b>
	<b>Literatur</b>	<b>17</b>

## 1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es die grundlegenden physikalischen Eigenschaften und Begriffe der Ultraschallechographie zu lernen und anzuwenden. Dazu wird bei verschiedenen Körpern durch verschiedene Verfahren die Laufzeit gemessen.

## 2 Theorie

Ultraschall besitzt einen Frequenzbereich zwischen 20kHz und 1GHz, welchen Menschen nicht mehr wahrnehmen können. Schall im Allgemeinen ist eine longitudinale Welle, welche mit

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

beschrieben werden kann und welche sich aufgrund von Druckschwankungen fortbewegt. Der Faktor  $Z$  ist die akustische Impedanz oder Schallkennwiderstand und wird durch

$$Z = c \cdot \rho$$

beschrieben, wobei  $\rho$  die Dichte des durchstrahlten Materials und  $c$  die Schallgeschwindigkeit in diesem Material ist. Schallwellen zeigen im Allgemeinen das selbe Verhalten wie elektromagnetische Wellen auf, jedoch ist bei Schallwellen aufgrund der Änderung von Druck und Dichte die Phasengeschwindigkeit materialabhängig.

Aufgrund der Materialabhängigkeit muss bei Schallwellen zwischen gasförmigen bzw. flüssigen Medien und Festkörpern unterschieden werden. In Gasen und Flüssigkeiten treten lediglich Longitudinalwellen auf, sodass sich für die Schallgeschwindigkeit

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

ergibt, wobei  $\kappa$  die Kompressibilität des Mediums beschreibt. In Festkörpern treten zusätzlich zu Longitudinalwellen auch Transversalwellen auf. Daraus folgt, dass in Festkörpern die Schallgeschwindigkeit grundsätzlich richtungsabhängig ist. Mit dem Elastizitätsmodul  $E$  ergibt sich für die Schallgeschwindigkeit

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

Für Transversalwellen und Longitudinalwellen ist  $c_{Fe}$  unterschiedlich.

Bei der Betrachtung von Schallwellen in einem Medium geht ein Teil der Energie durch Absorption verloren. Die Intensität der Welle

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

lässt sich als Funktion des Ortes und des Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  beschreiben. Dabei besitzt Luft einen sehr großen Absorptionskoeffizienten, weshalb im folgenden Versuch

immer ein Kontaktmittel verwendet wird.

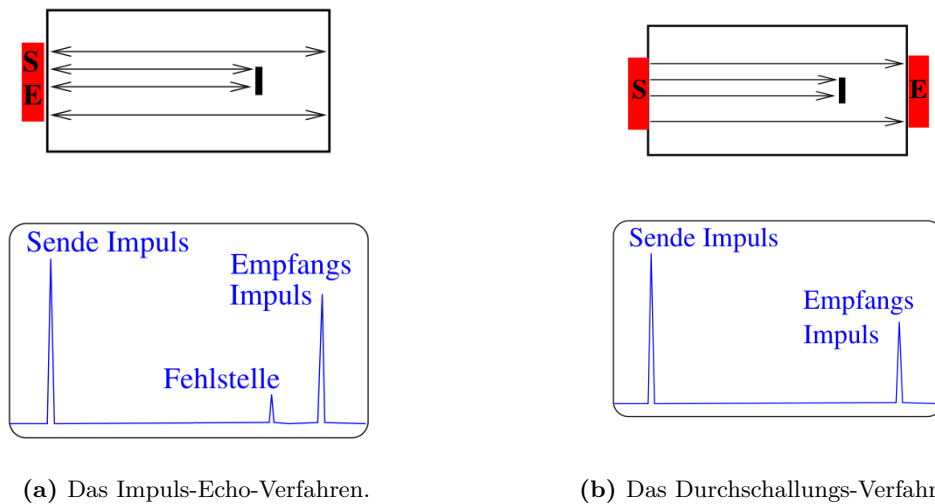
Während des Experiments werden zwei verschiedene Messmethoden verwendet, wovon eine auf der reflektierten und eine auf der transmittierten Welle basiert. Der Reflexionskoeffizient

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

beschreibt das Verhältnis der einfallenden und reflektierten Intensitäten und ist von den akustischen Impedanzen  $Z$  abhängig. Der transmittierte Anteil  $T$  lässt sich aus  $T = 1 - R$  berechnen.

Die Erzeugung von Ultraschall kann auf verschiedene Arten passieren. In diesem Versuch wird nur der piezo-elektrische Effekt betrachtet. Piezo-elektrische Kristalle können durch Anregung eines äußeren elektrischen Feldes in Schwingungen versetzt werden. Die Amplitude der entstehenden Welle und die daraus resultierende Energiedichte kann maximiert werden, indem zwischen Anregungsfrequenz und Eigenfrequenz des Kristalls Resonanz entsteht. Außerdem können Piezokristalle als Empfänger genutzt werden, weil sie durch Schallwellen angeregt werden. Dabei ist Quarz der meist verwendete Piezokristall, weil Quarz gleichbleibende physikalische Eigenschaften besitzt. Jedoch ist der Piezo-Effekt bei Quarzen relativ gering.

Mithilfe von Ultraschall können Informationen über der Aufbau eines Stoffes gewonnen werden. Dies wird hauptsächlich mit der Laufzeitmessung gemacht, welche in diesem Versuch durch zwei Methoden durchgeführt wird. Im Allgemeinen basiert die Messung darauf, dass ein Ultraschallsignal losgesendet wird und die Laufzeit auf einer definierten Messstrecke mittels eines Empfängers gemessen wird.



**Abbildung 1:** Zwei Messmethoden zur Messung der Laufzeit[3].

Bei der ersten Methode handelt es sich um das Impuls-Echo-Verfahren (Abbildung 1a).

Es wird nur ein Schallkopf verwendet, welcher sowohl Schallwellen lossendet als auch die reflektierten Signale wahrnimmt. Mithilfe der Laufzeit kann die Lage der Fehlstelle mit

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

bestimmt werden.

Die zweite Methode ist das Durchschallungs-Verfahren, was in Abbildung 1b schematisch dargestellt ist. Dabei werden zwei Ultraschallköpfe benutzt. Einer davon ist der Ultraschallsender und sendet ein Signal, welches auf der anderen Seite von einem Empfänger aufgenommen wird. Die Intensität wird abgeschwächt, wenn eine Fehlstelle in der Probe vorliegt. Der genaue Ort der Fehlstelle kann nicht durch dieses Verfahren bestimmt werden.

### 3 Aufbau

Der Aufbau des Versuchs besteht aus einem Ultraschallechoskop mit zwei angekoppelten Ultraschallsonden. Das Ultraschallechoskop ist zudem an einen Computer angeschlossen um die Daten auslesen und auswerten zu können. Die Ultraschallsonden generieren Impulse mit einer Frequenz von 2 MHz. Bei den zu untersuchenden Probestücken handelt es sich um mehrere Platten und Zylinder aus Acryl. Als Kontaktmittel wird beim Impuls-Echo-Verfahren bidestilliertes Wasser verwendet. Beim Durchschallungsverfahren wird Ultraschallgel als Kontaktmittel herangezogen.

## 4 Durchführung

### 4.1 Vermessung der Probestücke mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Als erstes werden die Probestücke mit einer Schieblehre vermessen um Referenzwerte für die im Folgenden zu bestimmenden Maße zu erhalten.

Im ersten Versuchsteil werden die Acrylplatten untersucht und die Funktionsweise des Ultraschallechoscops kennengelernt. Hierbei wird eine der Acrylplatten auf ein Papiertuch gelegt und von oben eine der Ultraschallsonden mit bidestilliertem Wasser angekoppelt. Das Papiertuch hat hierbei nur die Funktion, die Probestücke vor Beschädigungen zu schützen. Ein A-Scan wird durchgeführt. Es soll die Verstärkung am Echoskop so eingestellt werden, dass mindestens 4 Reflexe gut zu sehen sind. Die Laufzeiten der Reflexe werden bestimmt und der Graph exportiert. Außerdem wird mithilfe der Darstellungsart AM+HF in einem Reflex die Periode von 5 Schwingungen abgelesen und die Wellenlänge sowie Frequenz daraus berechnet. Zudem wird die Schallgeschwindigkeit berechnet und der Wert in das Programm eingetragen um die Dicke der Acrylplatte zu bestimmen. Das Ergebnis wird mit der zuvor bestimmten Dicke der Platte verglichen.

Danach werden verschieden dicke Zylinder mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens untersucht. Auch hier wird die Ultraschallsonde von oben mit bidestilliertem Wasser angekoppelt. Die

Laufzeiten des Echos und die Amplituden werden für die verschiedenen Zylinderdicken in einer Tabelle festgehalten. Aus den Messwerten wird mithilfe einer Ausgleichsrechnung die Schallgeschwindigkeit und die Dicke der Anpassungsschicht der Sonden bestimmt. Außerdem wird die Dämpfung bestimmt, indem die logarithmierte Amplitude gegen die Dicke der Zylinder in einem Diagramm aufgetragen und auch hier eine Ausgleichsrechnung durchgeführt wird.

#### **4.2 Vermessung der Probestücke mit dem Durchschallungsverfahren**

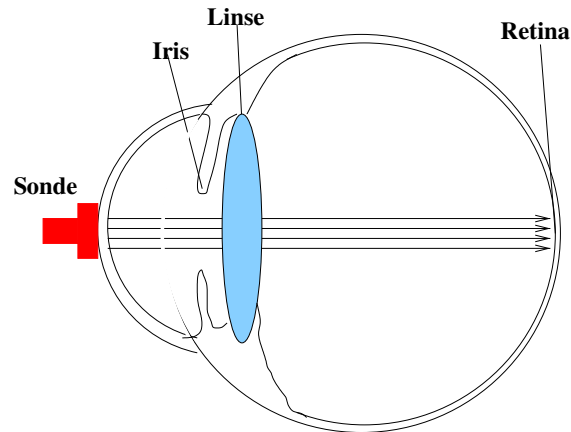
In diesem Versuchsteil werden die Probestücke horizontal auf eine Halterung gelegt. Mithilfe von Ultraschallgel wird an beiden Seiten des Zylinders jeweils eine Sonde angekoppelt. Das Ultraschallechoskop wird auf die Verwendung zweier Sonden umgestellt. Mithilfe eines A-Scans werden die Laufzeiten für die verschiedenen Zylinder erfasst. Daraus wird die Schallgeschwindigkeit mithilfe einer Ausgleichsrechnung berechnet.

#### **4.3 Spektrale Analyse (FFT) und Cepstrum**

Nun werden die zwei Acrylplatten übereinandergelegt und der circa 40 mm dicke Zylinder daraufgestellt. Die Acrylelemente werden mit bidestilliertem Wasser gekoppelt und oben eine Sonde angekoppelt. So wird eine Mehrfachreflexion aufgenommen. Der Ausschnitt wird so eingestellt, dass 3 Reflexe zu sehen sind und mithilfe der FFT-Funktion wird ein Spektrum und ein Cepstrum der Sonde ausgegeben. Aus den Laufzeiten der Reflexe wird die Dicke der Platten bestimmt.

#### **4.4 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells**

Die letzte Messreihe wird an einem Augenmodell im Massstab 1:3 durchgeführt. Hierbei wird eine Ultraschallsonde mit Koppelgel auf die Hornhaut gesetzt und vorsichtig so bewegt, dass die Reflexion der verschiedenen Schichten im Auge gut zu unterscheiden sind. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 2 zu sehen. Es wird ein A-Scan aufgenommen und so aus den Laufzeiten die Abstände im Auge ermittelt.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Scans vom Augenmodell[3].

## 5 Auswertung

Die in den Messungen verwendeten Zylinder und Platten werden mithilfe einer Schieblehre vermessen und haben die folgenden Dicken  $d$ . Dabei werden die Werte als fehlerfrei angenommen.

**Zylinder 1** 3,10 cm

**Zylinder 2** 3,97 cm

**Zylinder 3** 8,03 cm

**Zylinder 4** 10,20 cm

**Zylinder 5** 12,05 cm

**Platte 1** 0,61 cm

**Platte 2** 1,00 cm

### 5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und der Dämpfungskonstante mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Der Versuch wird nach Abschnitt 3 aufgebaut und die erste Messung nach Unterabschnitt 4.1 durchgeführt. Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit wird Platte 1 benutzt und dann die Laufzeit  $t$  gemessen und in Tabelle 1 eingetragen. Die Schallgeschwindigkeit  $c$  wird mit Gleichung 1 berechnet, indem die Formel nach  $c$  umgestellt und der dadurch berechnete Wert auch in Tabelle 1 eingetragen wird.

**Tabelle 1:** Laufzeit und Schallgeschwindigkeit durch Platte 1.

Laufzeit $\Delta t/\mu\text{s}$	Laufzeitdifferenz $\Delta t_{diff}/\mu\text{s}$	Schallgeschwindigkeit $c/\frac{\text{m}}{\text{s}}$
5	5	2440
10	5	2440
14	4	3050
19	5	2440

Der Mittelwert der Schallgeschwindigkeit wird mit

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (2)$$

zu

$$\bar{c} = 2592,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

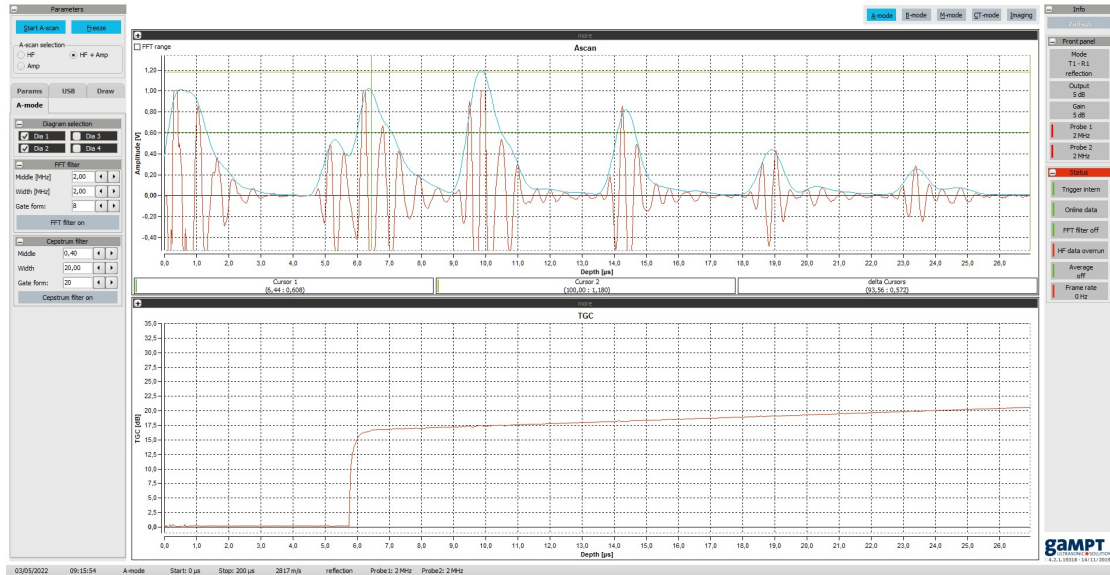
berechnet. Die Abweichung lässt sich mit

$$\Delta \bar{c} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

berechnen, sodass sich die mittlere Schallgeschwindigkeit zu

$$\bar{c} = (2592,5 \pm 241.12) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ergibt.



**Abbildung 3:** Abbildung des A-Scans der Acrylplatte 1.



Anhand von Abbildung 3 kann zwischen 5 Schwingungen die Periode abgelesen werden und die Frequenz daraus bestimmt werden. Die gemessene Periode  $T$  wird mit der daraus nach

$$f = \frac{1}{T}$$

berechneten Frequenz  $f$  und der nach

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

berechneten Wellenlänge  $\lambda$  sind in Tabelle 2 eingetragen. Die Abweichung der Wellenlänge wird mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta\lambda = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{f} \cdot \Delta\bar{c} \right)^2}$$

bestimmt.

**Tabelle 2:** Periode, Frequenz und Wellenlänge.

Periode $T/\mu\text{s}$	Frequenz $f/\text{MHz}$	Wellenlänge $\lambda/\text{mm}$
0,4	2,5	1,037 $\pm$ 0,122
0,6	1,7	1,525 $\pm$ 0,179
0,6	1,7	1,525 $\pm$ 0,179
0,5	2,0	1,296 $\pm$ 0,153

Die Mittelwerte der Frequenz und der Wellenlänge betragen somit analog zu Gleichung 2 und Gleichung 3

$$\bar{f} = (1.98 \pm 0.19)\text{MHz}$$

$$\bar{\lambda} = (1.346 \pm 0.158)\text{mm}.$$

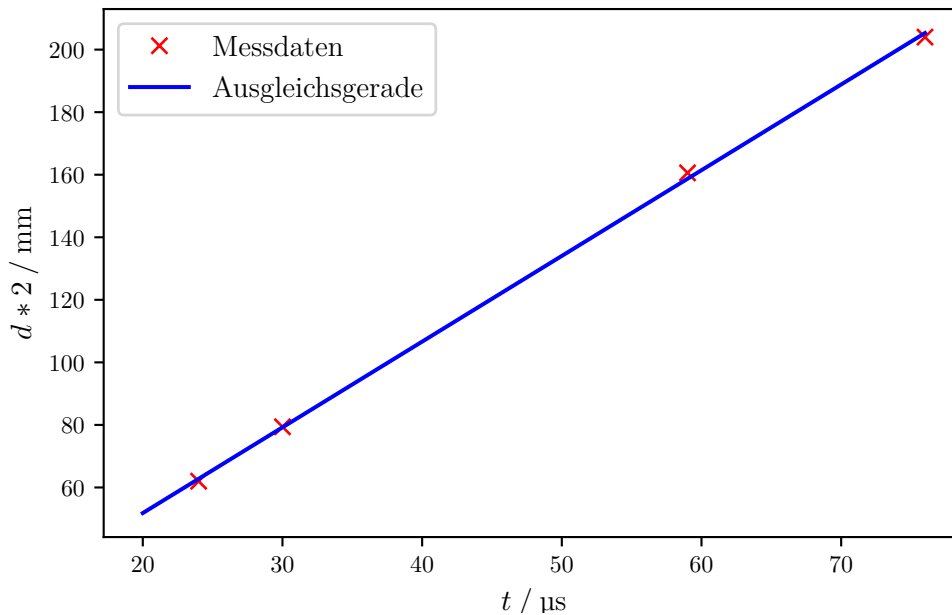
Der erste berechnete Wert der Schallgeschwindigkeit in Acryl  $c = 2440 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  wird in das Darstellungsprogramm eingegeben. Es wird eine Tiefenmessung durchgeführt. Die ersten beiden Peaks liegen bei 0.6cm und 1.2cm, woraus abzulesen ist, dass die verwendete Platte eine Dicke von  $d = 0.6\text{cm}$  hat.

In der zweiten Messreihe werden die zuvor ausgemessenen Acrylzyylinder mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens vermessen. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 3 aufgelistet.

**Tabelle 3:** Laufzeit und Amplituden durch verschiedene Zylinder mit dem Impuls-Echo-Verfahren.

Zylinder	Laufzeit $t/\mu\text{s}$	Amplitude $A/\text{V}$
1	24	1,24
2	30	1,24
3	59	0,24
4	76	0,08

Die Werte der Laufzeiten in Tabelle 3 werden den jeweiligen Dicken der Zylinder in Abbildung 4 gegenübergestellt. Zudem wird eine Ausgleichsrechnung der Form  $c * t + b$  mithilfe des Pythonmoduls Matplotlib [2] durchgeführt und auch in die Abbildung eingetragen.



**Abbildung 4:** Darstellung der Zylinderdicken gegen die Laufzeiten zur Berechnung der Schallgeschwindigkeiten im Impuls-Echo-Verfahren.

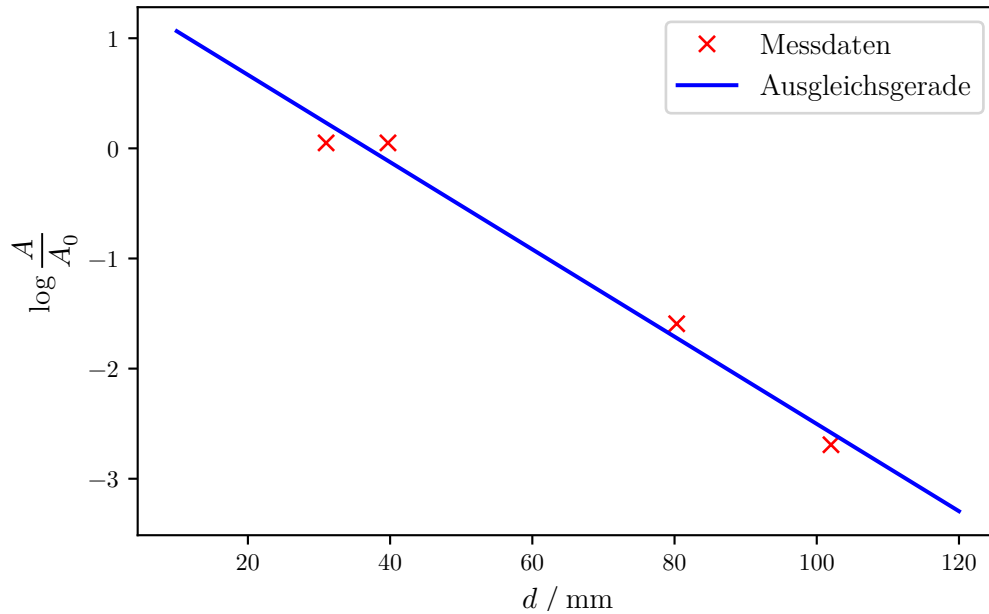
Die Parameter der linearen Regression und somit die bestimmte Schallgeschwindigkeit  $c$  und die Dicke der Ausgleichsschicht  $b$  betragen

$$c_{IE} = (2740.76 \pm 40.50) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$b = (-3.00 \pm 2.10) \text{mm}.$$

Der Ausgangsimpuls Sonde beträgt  $A_0 = 1,18 \text{ V}$ . Die logarithmierten Messwerte  $\log \frac{A}{A_0}$

werden gegenüber der Zylinderdicke aufgetragen und eine Ausgleichsrechnung der Form  $\log \frac{A}{A_0} = -\alpha \cdot d$  durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5:** Darstellung der logarithmierten Amplituden gegenüber der Zylinderdicken zur Berechnung der Dämpfung im Impuls-Echo-Verfahren.

Der Absorptionskoeffizient ergibt sich zu

$$\alpha = (39.63 \pm 3.61) \frac{1}{\text{m}}.$$

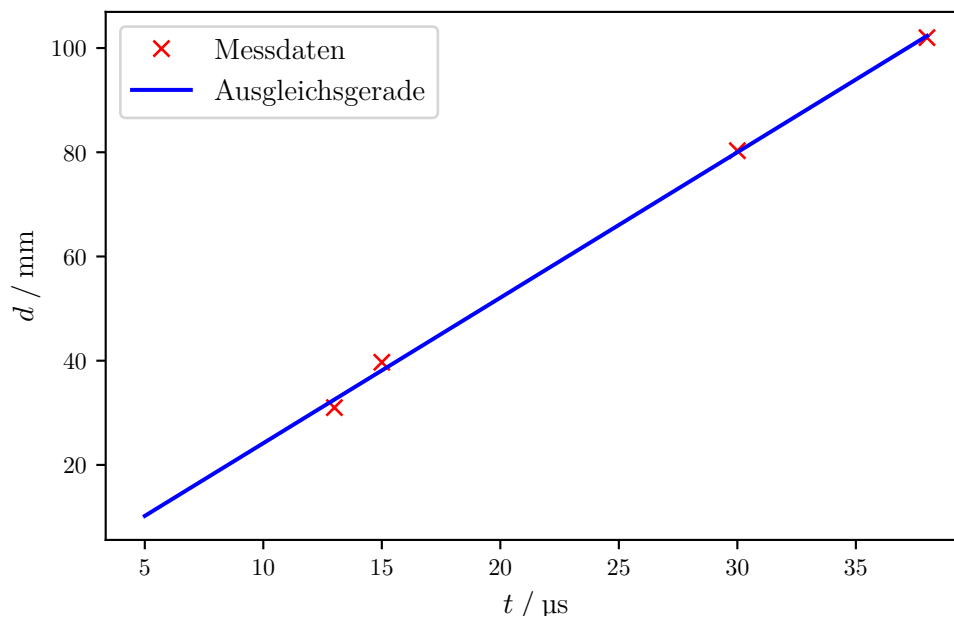
## 5.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungsverfahren

Bei dieser Messreihe werden die Zylinder anhand des Durchschallungsverfahrens nach Unterabschnitt 4.2 ausgemessen. Die Messung wird für dieselben 4 Zylinder wie in Unterabschnitt 5.1 durchgeführt. Die Messwerte der Laufzeiten und Amplituden sind in Tabelle 4 dargestellt.

**Tabelle 4:** Laufzeit und Amplituden durch verschiedene Zylinder mit dem Durchschallungs-Verfahren.

Zylinder	Laufzeit $t/\mu\text{s}$	Amplitude $A/\text{V}$
1	13	1,24
2	15	1,32
3	30	1,18
4	38	0,60

Auch bei dieser Messung soll die Schallgeschwindigkeit  $c$  berechnet werden. Hier muss die nach  $c$  umgestellte Gleichung 1 allerdings modifiziert werden, da der Faktor 2 nicht mehr benötigt wird. Dies liegt daran, dass nun nicht mehr eine Sonde als Sender und Empfänger genutzt wird und die Strecke doppelt durchlaufen wird, sondern an beiden Seiten des Probestücks jeweils eine Sonde anliegt und somit eine Sonde als Empfänger und die andere als Sender fungiert. Die Berechnung erfolgt analog zu Abbildung 4 mithilfe einer Ausgleichsgerade. Diese ist in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6:** Darstellung der Zylinderdicken gegen die Laufzeiten zur Berechnung der Schallgeschwindigkeiten im Durchschallungsverfahren.

Die Parameter der linearen Regression und somit die bestimmte Schallgeschwindigkeit  $c$

und die Dicke der Ausgleichsschicht  $b$  betragen

$$c_D = (2791.47 \pm 76.34) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$b = (-3.75 \pm 2.00) \text{mm}.$$

### 5.3 Spektrale Analyse (FFT) und Cepstrum

Nun wird die Darstellung als FFT und Cepstrum verwendet. Die Messung wird nach Abschnitt 4 durchgeführt. Der erste Peak liegt bei ungefähr 7,5 mm, dieser bezieht sich auf die Dicke der ersten Platte, wobei die gemessene Dicke mit der Schieblehre 6,1 mm ist. Der zweite Peak liegt bei ungefähr 14 mm und bezieht sich auf die Dicken beider Platten, wobei die mit der Schieblehre gemessene Dicke 16,1 mm beträgt. Aus den Laufzeiten der Peaks ergibt sich eine Dicke der ersten Platte von ca. 6 mm was auch durch den Abstand der ersten beiden Peaks im Cepstrum (siehe Abbildung 7) abgelesen werden kann.

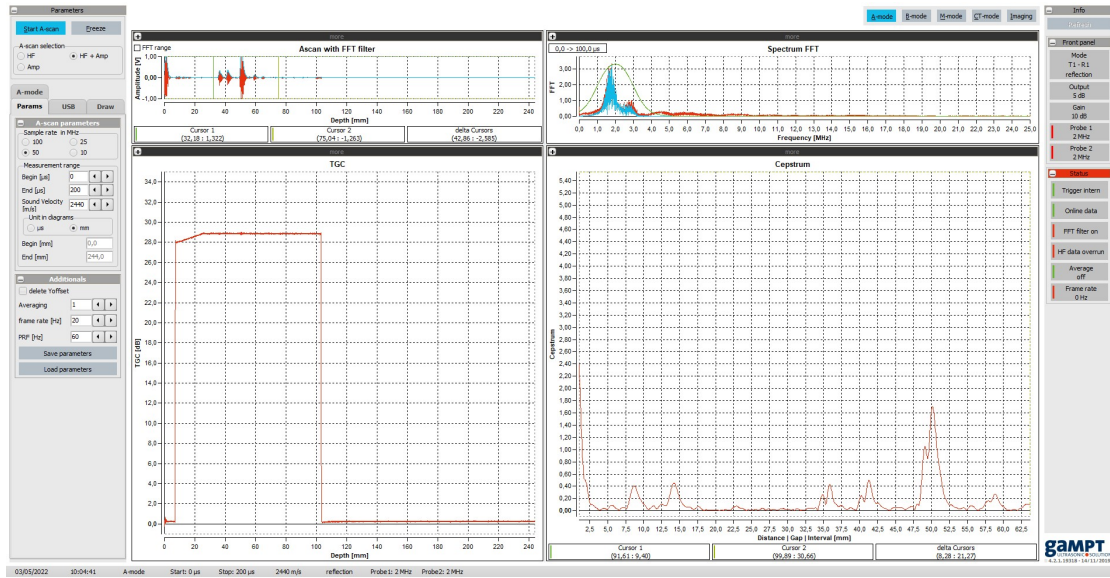


Abbildung 7: Spektrale Analyse und Cepstrum der Acrylelemente.

## 5.4 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

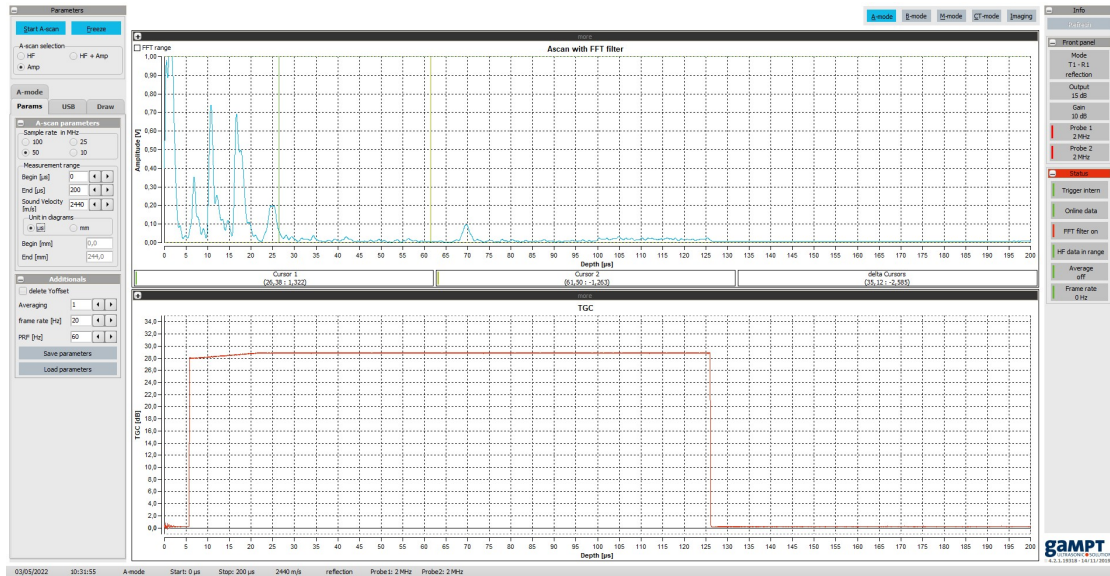


Abbildung 8: A-Scan des Augenmodells.

Bei der Untersuchung des Augenmodells werden im A-Scan (siehe Abbildung 8) mehrere Peaks beobachtet. Diese lassen sich der Iris, dem Ein- und Austritt aus der Linse und der Retina zuordnen und sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 5: Laufzeiten im Auge.

Augenbestandteil	Laufzeit $t/\mu\text{s}$
Iris	11
Linseneintritt	17
Linsenaustritt	25
Retina	69

Mithilfe von Gleichung 1 werden die Maße des Augenmodells berechnet. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass sich die Schallgeschwindigkeit in der Linse  $c_L = 2500 \text{ m/s}$  und die Schallgeschwindigkeit in der Glaskörperflüssigkeit  $c_{GK} = 1410 \text{ m/s}$  unterscheiden.

**Tabelle 6:** Abstände im Auge.

Augenbestandteil	Standort $s/\text{mm}$
Iris	7,76
Linseneintritt	11,99
Linsenaustritt	21,99
Retina	60,77

## 6 Diskussion

Die durch Messungen bestimmten Schallgeschwindigkeiten in Acryl werden mit dem Theoriewert verglichen. Die Abweichung vom Theoriewert  $c_{\text{theo}} = 2750 \text{ m/s}$  [1] wird durch

$$a = \frac{|c - c_{\text{theo}}|}{c_{\text{theo}}} \cdot 100$$

berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

**Tabelle 7:** Abweichungen der ermittelten Schallgeschwindigkeiten vom Literaturwert[1].

	Schallgeschwindigkeit $c/\text{m/s}$	Abweichung /%
$c_{\text{IE-Platte}}$	$2592,50 \pm 241,12$	5,72
$c_{\text{IE-Zylinder}}$	$2740,76 \pm 40,50$	0,34
$c_{\text{D}}$	$2791,47 \pm 76,34$	1,51

Anhand Tabelle 7 ist zu bemerken, dass die Abweichungen bei beiden Messmethoden sehr gering ausfallen, weshalb anzunehmen ist, dass der Versuch gut geeignet ist um eine Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl durchzuführen. Die geringe Abweichung, sowie die Tatsache, dass die Messergebnisse auch voneinander geringfügig abweichen, kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen ist auch der Literaturwert nur eine ungefähre Angabe und variiert je nach genauer Zusammensetzung des Materials. Außerdem hat die Messung nicht unter optimalen Bedingungen stattgefunden und die Probestücke können kleine Beschädigungen aufweisen, welche das Messergebnis beeinflussen. Zudem kann es zu Ablesefehlern gekommen sein, da die Skala nicht sehr genau ist.

Die experimentell bestimmten Werte für die Frequenz und Wellenlänge des Ultraschalls

$$\begin{aligned}\bar{f} &= (1.98 \pm 0.19)\text{MHz}, \\ \bar{\lambda} &= (1.346 \pm 0.158)\text{mm}\end{aligned}$$

liegen sehr nah an dem von der Sonde erzeugten 2 MHz-Signal. Auch bei dieser Messung kann es durch oben genannte Ursachen zu Messunsicherheiten kommen.

Bei der Tiefenmessung um die Dicke der ersten Platte zu bestimmen, gibt es eine absolute Abweichung von 0,1 mm zur zuvor mit der Schieblehre bestimmten Dicke. Diese Unsicherheit ist auch durch menschliche Ablesefehler zu erklären. Außerdem wurde in das Programm der erste berechnete Wert für die Schallgeschwindigkeit aus der vorangegangenen Messung eingesetzt. Dieser Wert entspricht nicht dem Mittelwert, also kann es auch deswegen zu weiteren Ungenauigkeiten kommen.

Die Messung der Dicke der Platte durch die Spektrale Analyse bringt ein Ergebnis identisch zur vorherigen Tiefenmessung hervor. Es kann von den gleichen Ursachen für Messunsicherheiten ausgegangen werden, allerdings kommt hier erschwerend hinzu, dass die Peaks nicht deutlich ablesbar waren.

Bei der Vermessung des Augenmodells werden folgende Werte für die Abstände am Augenmodell ermittelt.

**Tabelle 8:** Abstände im Auge.

Augenbestandteil	Standort $s/\text{mm}$
Iris	7,76
Linseneintritt	11,99
Linsenaustritt	21,99
Retina	60,77

Die Werte scheinen realistisch im Bezug auf das Augenmodell bzw. die schematische Darstellung eines Auges (Abbildung 2) zu sein. Ungenauigkeiten entstehen hier dadurch, dass es sehr schwierig ist den richtigen Winkel mit der Ultraschallsonde zu treffen um alle Bestandteile des Auges als deutliche Peaks abzubilden. Außerdem muss bei der Berechnung der Abstände mit verschiedenen Schallgeschwindigkeiten gerechnet werden. Auch hier kann es zu Abweichungen von den realen Schallgeschwindigkeiten kommen.



## 7 Anhang

US 1: Grundlagen der Ultraschalltechnik

Abmessungen	Dicke	Höhe	Durchmess.
Platte 1	0,61 cm	—	—
Platte 2	1,00 cm	—	—
Zylinder 1	—	3,10 cm	4,05 cm
Zylinder 2	—	3,97 cm	4,01 cm
Zylinder 3	—	3,03 cm	4,01 cm
Zylinder 4	—	10,20 cm	4,05 cm
Zylinder 5	—	12,05 cm	4,00 cm

1. Schallgeschwindigkeit	Amplitude	Zeit	v	Gain	Output
				5 dB	5 dB
Platte 1	0,54	5 $\mu$ s	2440	—	—
	0,21	10 $\mu$ s	2210	—	—
	0,49	14	3050	—	—
	0,25	19	—	—	—

Amplitude	Zeit	
0,489	5,2	$\Rightarrow f = 2,5 \text{ MHz}$
0,410	5,6	$\Rightarrow f = 1,7$
0,38	6,2	$\Rightarrow f = 2,4 \text{ MHz}$
0,4	6,8	$\Rightarrow f = 1,7 \text{ MHz}$
7,3	7,3	$\Rightarrow f = 2,1 \text{ MHz}$
7,9	7,9	$\Rightarrow f = 1,7 \text{ MHz}$

Tiefenmessung: 1.P. 2.P.  $\Rightarrow$  dicke 0,6 cm

Zylindermessung	Impuls - Echo	Amplitude
Laufzeit in $\mu$ s		
Zylinder 1	24	1,24
Zylinder 2	30	1,24
Zylinder 3	59	0,24
Zylinder 4	76	0,08

Ausgesendet: 1,78

Durchschallungsverfahren	Amplitude
Laufzeit	
Zylinder 1	1,24
Zylinder 2	1,32
Zylinder 3	1,18
Zylinder 4	0,16

Cepstrum

$\rightarrow$  Abstand im Cepstrum

Augen	Laufzeit	
Peak 1	14 mm	21 mm
Peak 2	21 mm	30 mm
Peak 3		
Peak 4		

7  $\mu$ s  
11  $\mu$ s  
17  $\mu$ s  
25  $\mu$ s

Abbildung 9: Messwerte zum Versuch.

## 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 08.05.2022).

- [2] 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/>.
- [3] *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. US1 Grundlagen der Ultraschalltechnik*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.