

VERSUCH US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Lars Kolk
lars.kolk@tu-dortmund.de

Julia Sobolewski
julia.sobolewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 29.05.2018

Abgabe: 05.06.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Schall im Medium	3
2.2	Erzeugung von Ultraschall und Anwendung	4
2.2.1	Erzeugung	4
2.2.2	Anwendung	4
3	Durchführung	5
3.1	Messung der Dämpfung mittels Impuls-Echo-Verfahren	5
3.2	Schallgeschwindigkeitsbestimmung	5
3.2.1	Durchschallungs-Verfahren	5
3.2.2	Impuls-Echo-Verfahren	5
3.3	Spektrale Analyse und Cepstrum	5
3.4	Untersuchung eines Augenmodels	5
4	Auswertung	6
4.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl	6
4.1.1	Impuls-Echo-Verfahren	6
4.1.2	Durchschallungs-Verfahren	7
4.2	Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens	9
4.3	Bestimmung der Dicke zweier Acrylplatten mithilfe des Cepstrums und des A-Scans	10
4.4	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	12
5	Diskussion	13

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Schallgeschwindigkeit in Acryl mit verschiedenen Ultraschallmessmethoden bestimmt werden.

2 Theorie

2.1 Schall im Medium

Der in diesem Versuch verwendete Schall befindet sich im Frequenzbereich 20 kHz - 1 GHz. Schall in diesem Frequenzbereich wird als Ultraschall bezeichnet und ist vom menschlichen Gehör nicht wahrnehmbar.

Schallwellen pflanzen sich in Gasen und Flüssigkeiten durch Druckschwankungen longitudinal fort. Es handelt sich bei Schall also um eine Longitudinalwelle. Für die orts- und zeitabhängige Druckverteilung gilt:

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

$Z \hat{=}$ akustische Impedanz $= c\rho$, $c \hat{=}$ Schallgeschwindigkeit, $\rho \hat{=}$ Dichte des Mediums)

Eine weitere Eigenschaft von Schallwellen lässt sich aus Gleichung (1) entnehmen: Die Schallgeschwindigkeit ist abhängig vom Medium. Für die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten lässt sich der Zusammenhang

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

($\kappa \hat{=}$ Kompressibilität der Flüssigkeit)

aufstellen. Aufgrund auftretender Schubspannungen können in Festkörpern auch Transversalwellen auftreten, weshalb für die Schallgeschwindigkeit im Festkörper das Elastizitätsmodul E von wichtiger Bedeutung ist. Mit diesem ergibt sich für die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern der Zusammenhang

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

Jedoch ist nicht nur die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle vom Medium abhängig, sondern auch die abnehmende Intensität I im Medium. Für diese gilt:

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

($\alpha \hat{=}$ Absorptionskoeffizient)

Da Luft die Intensität von Schallwellen stark abschwächt, wird in diesem Versuch ein Kontaktmittel verwendet. Geht die Schallwelle von einem Medium mit akustischer Impedanz Z_1 in ein Medium akustischer mit Impedanz Z_2 über, so wird ein Teil der

Schallwelle reflektiert, während der andere Teil durch die Grenzfläche transmittiert. Für den Reflektionskoeffizienten gilt

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

während für den Transmissionskoeffizienten folglich

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

gilt.

2.2 Erzeugung von Ultraschall und Anwendung

2.2.1 Erzeugung

Ultraschall kann mit einem sogenannten piezoelektrischen Kristall erzeugt und gemessen werden. Zum Erzeugen von Ultraschallwellen wird dieser in einem, mit Wechselstrom betriebenden, E-Feld platziert. Der Kristall wird dort zu Schwingungen angeregt, wodurch Ultraschall entsteht. Wenn die Anregungsfrequenz mit der Eigenfrequenz übereinstimmt, kommt es zur Resonanz, wodurch sehr große Schwingungsamplituden erreicht werden. Der Kristall kann ebenso als Empfänger genutzt werden, da dieser auch durch Schall in Schwingungen versetzt werden kann.

2.2.2 Anwendung

Es gibt zwei grundlegende Techniken, mit denen, unter Einsatz von Ultraschall, Informationen über das zu untersuchende Objekt erhalten werden können. Eine der Verfahrensweisen ist die Durchschallungs-Methode. Bei dieser liegen Sender und Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten der Probe. Der Sender sendet Schallimpulse aus, die durch den zu untersuchenden Körper wandern und schließlich zum Empfänger gelangen. Befinden sich Fehlstellen im Körper, so registriert der Empfänger eine verminderte Intensität. So können zwar Fehlstellen registriert, aber nicht lokalisiert werden. Um Fehlstellen zu lokalisieren, kann die zweite Verfahrensweise, das Impuls-Echo-Verfahren, verwendet werden. Bei dieser befinden sich Sender und Empfänger auf der gleichen Seite der Probe. Trifft der ausgesendete Schallimpuls auf eine Fehlstelle, so wird ein Teil der Welle reflektiert und gelangt zum Empfänger. Durch den Zusammenhang

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

kann die Fehlstelle lokalisiert werden, da durch den Messvorgang Schallgeschwindigkeit und Zeit bekannt sind.

3 Durchführung

3.1 Messung der Dämpfung mittels Impuls-Echo-Verfahren

Ein Acrylzyylinder wird auf ein Papiertuch gestellt und an eine 2 MHz-Sonde gekoppelt. Als Kopplungsmittel wird bidestilliertes Wasser verwendet. Die Sonde wird mit einem Echoskop im *REFLEC.*-Modus verbunden. Abstand und Betrag der ersten beiden Peaks werden mithilfe des Messprogramms bestimmt. Die Messung wird für 6 weitere Zylinder wiederholt.

3.2 Schallgeschwindigkeitsbestimmung

3.2.1 Durchschallungs-Verfahren

Ein bereits abgemessener Acrylzyylinder wird waagrecht in eine geeignete Halterung gelegt. An beide Enden wird eine 2 MHz-Sonde angelegt und als Kopplungsmittel Koppelgel verwendet. Die Sonden werden an das Echoskop angeschlossen. Dieses muss sich dabei im *TRANS.*-Modus befinden. Mithilfe des Messprogramms wird die Zeitdifferenz der Impulse gemessen. Dies wird für 6 weitere Zylinder wiederholt.

3.2.2 Impuls-Echo-Verfahren

Ein Acrylzyylinder wird auf ein Papiertuch gestellt und an eine 2 MHz-Sonde gekoppelt. Als Kopplungsmittel wird bidestilliertes Wasser verwendet. Mithilfe eines A-Scans wird die Laufzeit des Schalls bestimmt, indem im Auswertungsprogramm die Zeitdifferenz zwischen dem Sende- und Echoimpuls bestimmt wird. Der Vorgang wird für 6 Zylinder wiederholt.

3.3 Spektrale Analyse und Cepstrum

Zwei Acrylscheiben mit verschiedener Dicke d werden übereinander gelegt. Auf diese wird nun ein $4 \cdot 10^{-2}$ m langer Acrylzyylinder gestellt, welcher mit einer 2 MHz-Sonde verbunden wird. Zur Kopplung der Elemente wird bidestilliertes Wasser verwendet. Mithilfe des Auswertungsprogramms wird eine Mehrfachreflexion aufgenommen. Dazu wird die Verstärkung am Echoskop so eingestellt, dass 3 Mehrfachreflexionen zu sehen sind. Die zeitlichen Abstände zwischen den Echos werden mithilfe des Auswertungsprogramms ermittelt und das Cepstrum der Sonde mit der FFT-Funktion aufgezeichnet.

3.4 Untersuchung eines Augenmodells

In diesem Versuchsteil wird eine 2 MHz-Sonde an die Hornhaut eines Augenmodells gekoppelt. Als Kopplungsmittel wird dabei Koppelgel verwendet. Der Einschallwinkel wird solange leicht verändert, bis ein Echo an der Rückwand der Retina zu sehen ist. Mithilfe eines A-Scans wird der Abstand von Hornhaut, Iris, Linse und Retina bestimmt.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl

4.1.1 Impuls-Echo-Verfahren

In Tabelle 1 befinden sich die aufgenommenen Messwerte

Tabelle 1: Mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens aufgenommenen Messwerte

L / cm	Puls 1	Puls 2	$\Delta t / \text{s}$
	U / V	U / V	
12,0	1,405	0,663	88,7
10,2	1,405	0,646	76,4
8,0	1,401	1,268	59,5
7,1	1,401	1,318	46,5
6,2	1,417	1,396	46,3
4,0	1,401	1,446	29,4
3,1	1,392	1,355	23,6

In Graph 1 sind diese aufgetragen.

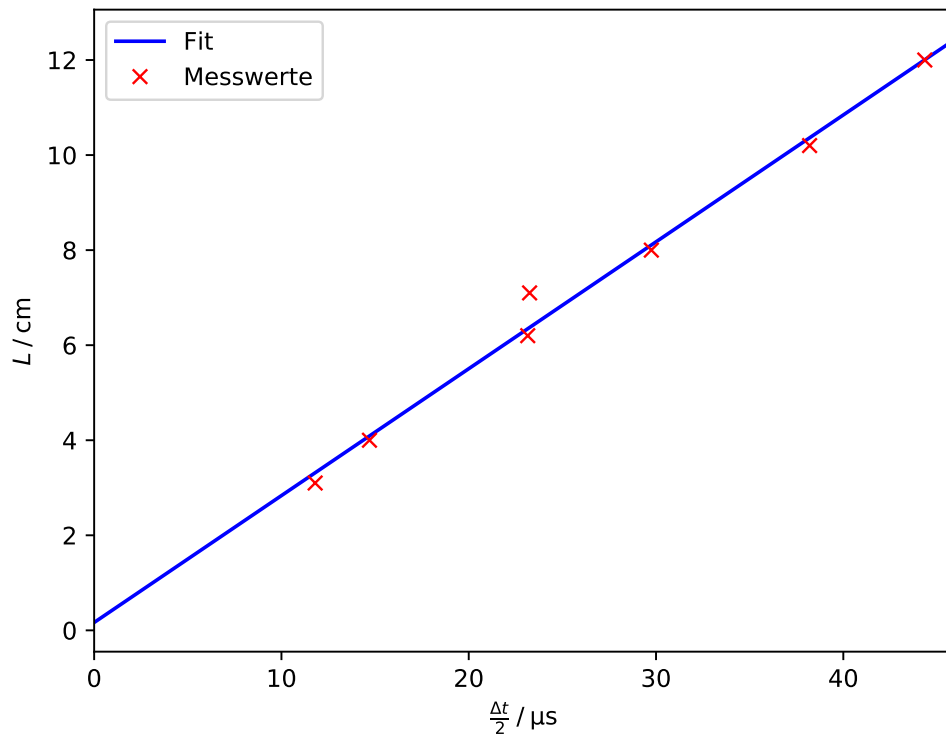


Abbildung 1: Es ist die Länge des Acrylzyllinders L gegen die Zeit $\Delta t/2$, die der Schall benötigt um diesen beim Impuls-Echo-Verfahren einmal zu durchqueren, aufgetragen.

Eine lineare Regression $f(x) = a \cdot x + b$ liefert die Werte

$$a = (2669,59 \pm 123,55) \frac{\text{m}}{\text{s}} = c_{\text{Echo}}$$

$$b = (0,17 \pm 0,35) \text{ cm}.$$

Dabei ist die Steigung a die Geschwindigkeit, mit der sich der Schall durch Acryl bewegt und der y-Achsenabschnitt b ist die Dicke der Anpassungsschicht. Der Theoriewert [3] ist $c_{\text{Acryl, theo}} = 2730 \text{ m/s}$, die Abweichung beträgt 2,21 %.

4.1.2 Durchschallungs-Verfahren

In Tabelle 2 befinden sich die aufgenommenen Messwerte

Tabelle 2: Mithilfe des Durchschallungs-Verfahrens aufgenommenen Messwerte

L / cm	$\Delta t / \text{s}$
12,0	45,7
10,2	39,2
8,0	31,4
7,1	27,7
6,2	23,8
4,0	15,7
3,1	12,4

Aufgetragen sind diese in Graph 2.

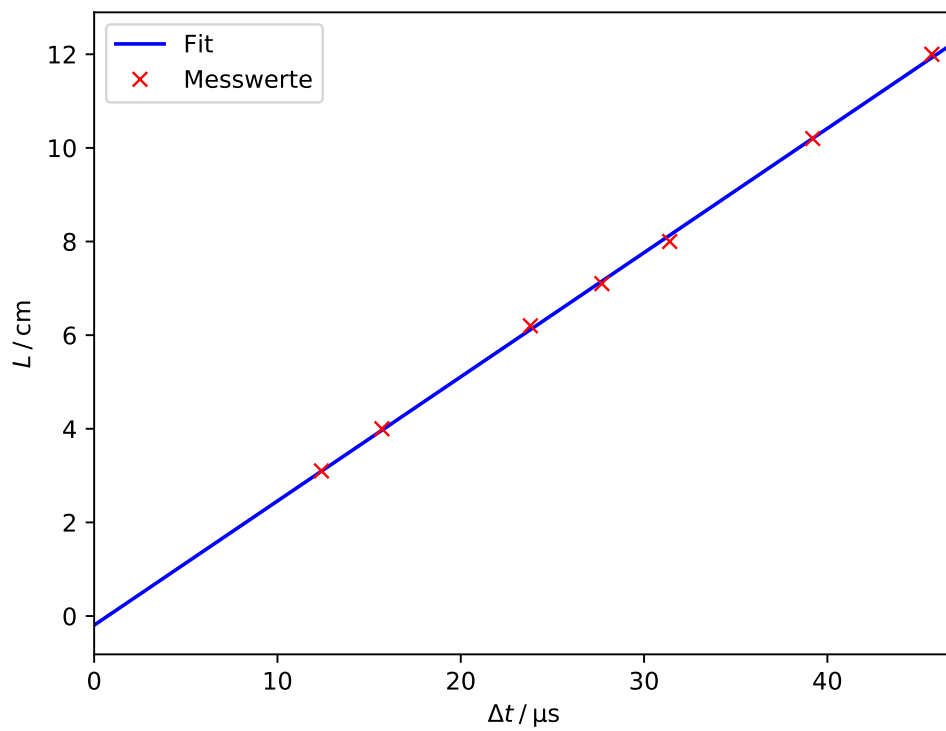


Abbildung 2: Es ist die Länge des Acrylzyllinders L gegen die Zeit Δt , die der Schall benötigt um diesen beim Durchschallungs-Verfahren einmal zu durchqueren, aufgetragen.

Eine lineare Regression $f(x) = a \cdot x + b$ liefert die Werte

$$a = (2652,62 \pm 27,96) \frac{\text{m}}{\text{s}} = c_{\text{Durch}}$$

$$b = (-0,19 \pm 0,08) \text{ cm.}$$

Dabei ist die Steigung a wieder die Geschwindigkeit, mit der sich der Schall durch Acryl bewegt und der y-Achsenabschnitt b ist die Dicke der Anpassungsschicht. Die Abweichung zum Theoriewert [3] beträgt 2,83 %.

Der Mittelwert beträgt

$$\bar{c}_{\text{Acryl}} = \frac{c_{\text{Echo}} + c_{\text{Durch}}}{2} = (2661,10 \pm 63,34) \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Der Fehler ergibt sich aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_{\bar{c}_{\text{Acryl}}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\sigma_{c_{\text{Echo}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\sigma_{c_{\text{Durch}}}\right)^2}$$

Der Mittelwert weicht um 2,52 % vom Theoriewert [3] ab.

4.2 Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens

In Abbildung 3 sind die Werte aus Tabelle 1 aufgetragen.

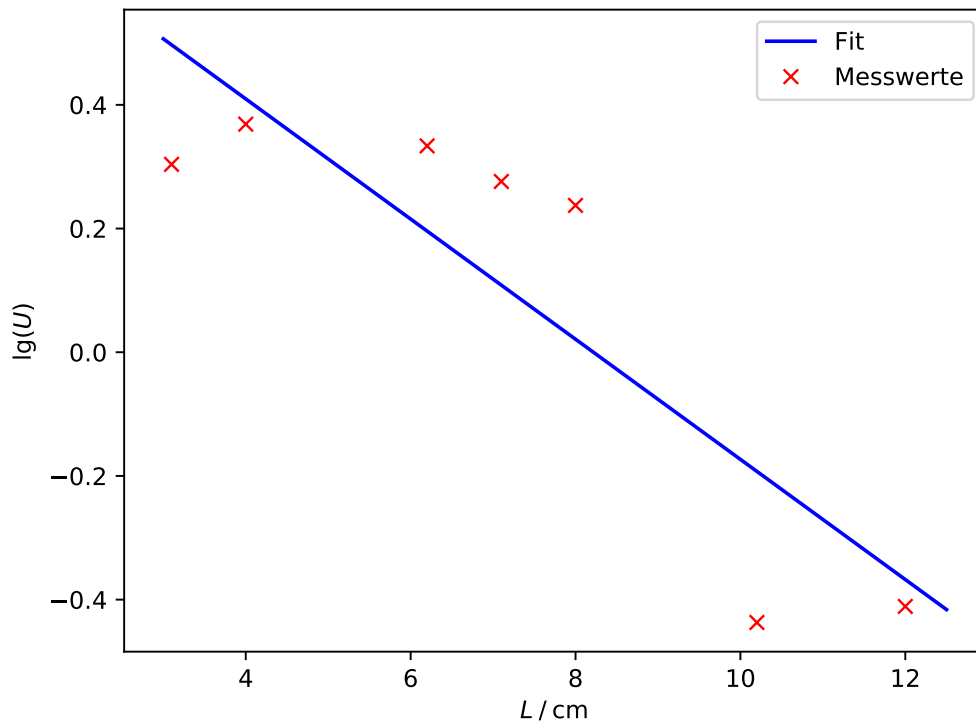


Abbildung 3: $\ln(U)$ - L -Diagramm zur Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten

Eine lineare Regression $f(x) = -a \cdot x + b$ liefert folgende Werte

$$a = (-9,71 \pm 0,28) \frac{1}{\text{m}} = -\alpha$$

$$b = 0,8 \pm 0,2.$$

Der Dämpfungsfaktor in Acryl ist somit $\alpha = (9,71 \pm 0,28)/\text{m}$. Der Theoriewert [2] beträgt $\alpha_{\text{theo}} = 57/\text{m}$, wodurch sich eine Abweichung von 82,96 % ergibt.

4.3 Bestimmung der Dicke zweier Acrylplatten mithilfe des Cepstrums und des A-Scans

Die aufgenommenen Messwerte befinden sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Aus dem Cepstrum und A-Scan bestimmte Laufzeiten durch zwei Acrylplatten

	$\Delta t_{\text{Cep}} / \text{s}$	$\Delta t_{\text{Scan}} / \text{s}$
Δt_1	4,90	4,8
Δt_2	8,74	8,6
Δt_3	13,21	13,4

In Abbildung 4 sind Das FTT und das Cepstrum zu sehen.

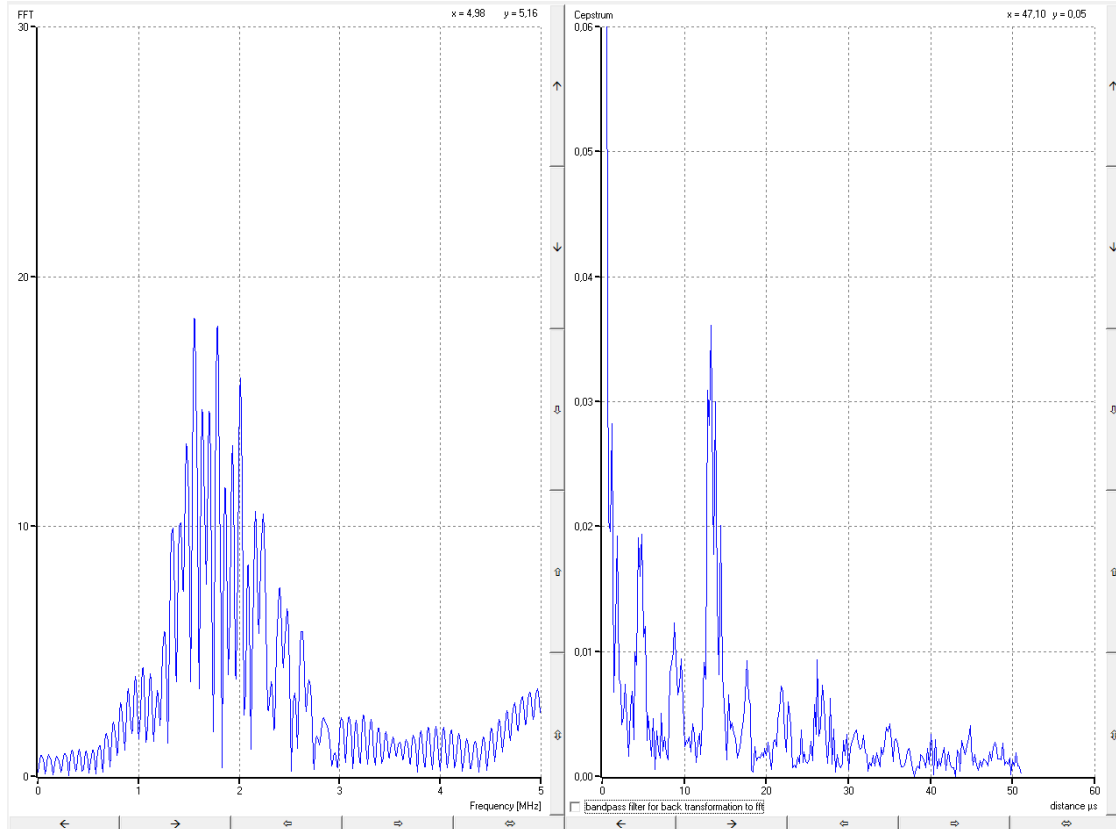


Abbildung 4: Screenshot des aufgenommenen FTT und Cepstrum

Aus den gemessenen Laufzeiten werden nun die Dicken der einzelnen Platten und deren Gesamtdicke nach Gleichung (8) berechnet.

$$d = \frac{\Delta t}{2} \bar{c}_{\text{Acryl}} \quad (8)$$

Für die aufgenommenen Zeiten ergibt sich:

$$\begin{aligned} d_{1,\text{Cep}} &= (0,652 \pm 0,016) \text{ cm} & d_{1,\text{Scan}} &= (0,639 \pm 0,015) \text{ cm} \\ d_{2,\text{Cep}} &= (1,163 \pm 0,028) \text{ cm} & d_{2,\text{Scan}} &= (1,144 \pm 0,027) \text{ cm} \\ d_{3,\text{Cep}} &= (1,76 \pm 0,04) \text{ cm} & d_{3,\text{Scan}} &= (1,78 \pm 0,04) \text{ cm} \end{aligned}$$

Die Mittelwerte und ihre Fehler ergeben sich aus den Gleichungen (9) und (10).

$$\bar{d} = \frac{d_{\text{Cep}} + d_{\text{Scan}}}{2} \quad (9)$$

$$\sigma_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{1}{1 \cdot 2} ((\bar{d} - d_{\text{Cep}})^2 + (\bar{d} - d_{\text{Scan}})^2)} \quad (10)$$

Die Mittelwerte sind somit

$$\begin{aligned} \bar{d}_1 &= (0,645 \pm 0,015) \text{ cm} \\ \bar{d}_2 &= (1,154 \pm 0,027) \text{ cm} \\ \bar{d}_3 &= (1,77 \pm 0,04) \text{ cm}. \end{aligned}$$

Die Abweichungen von den mithilfe der Schiebelehre bestimmten Werte

$$\begin{aligned} d_{1,\text{theo}} &= 0,6 \text{ cm} \\ d_{2,\text{theo}} &= 1,2 \text{ cm} \\ d_{3,\text{theo}} &= 1,8 \text{ cm} \end{aligned}$$

liegen bei 7,55 % für d_1 , 3,87 % für d_2 und 1,65 % für d_3 .

4.4 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

Die aufgenommenen Messwerte befinden sind

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= 12,1 \text{ } \mu\text{s} \\ \Delta t_2 &= 17,8 \text{ } \mu\text{s} \\ \Delta t_3 &= 26,9 \text{ } \mu\text{s} \\ \Delta t_4 &= 70,5 \text{ } \mu\text{s} \end{aligned}$$

Die jeweiligen Schallgeschwindigkeiten betragen

$$\begin{aligned} c_K &= 1483 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ c_L &= 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ c_{\text{GK}} &= 1410 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Dabei ist c_L die Schallgeschwindigkeit in der Linse [1, S. 6], c_{GK} die Schallgeschwindigkeit im Glaskörper [1, S. 6] und c_K die Schallgeschwindigkeit in der vorderen und hinteren Augenkammer, die mit der Schallgeschwindigkeit für Wasser [4] angenähert wird. Die berechneten Werte sind:

Hornhaut - Iris:	$d_1 = \frac{\Delta t_1}{2} c_K = 0,90 \text{ cm}$
Iris - Linsenanfang:	$d_2 = \frac{\Delta t_2}{2} c_K = 0,42 \text{ cm}$
Linsenanfang - Linsenende:	$d_3 = \frac{\Delta t_3}{2} c_L = 1,14 \text{ cm}$
Linsenende - Retina:	$d_4 = \frac{\Delta t_4}{2} c_{GK} = 3,07 \text{ cm}.$

5 Diskussion

Die Abweichungen vom Literaturwert in Kapitel 4.1 sind mit 2,21 % und 2,83 % sehr gering. Wobei die Abweichung beim Impuls-Echo-Verfahren etwas geringer ist. Die unterschiedlichen Anpassungsschichten ergeben sich daraus, dass beim Durchschallungs-Verfahren Ultraschallgel und beim Impuls-Echo-Verfahren bidestilliertes Wasser als Koppelgel verwendet werden. In Kapitel 4.3 liegen die dem Cepstrum und dem A-Scan entnommene Werte mit Abweichungen von 7,55 %, 3,87 % und 1,65 % auch sehr Nahe an den mithilfe der Schiebelehre bestimmten Werten. Einzig und allein die Abweichung des Dämpfungskoeffizienten in Kapitel 4.2 ist mit 82,96 % sehr groß, obwohl alle Werte bei der gleichen Verstärkung von 35 dB aufgenommen worden sind.

V202 - Aktivierung von Neutronen

Nullmessung: $\Delta t = 900s$, $N = 225$

Individuell: $\Delta t = 240s$

N | 2.572 | 2.265 | 2.120 | 2.110 | 2.069 | 1.946 | 1.868 | 1.636 | 1.540
| 1.383 | 1.375 | 1.293 | 1.278 | 1.205 | 1.097

Rhodium $\Delta t = 18s$

N | 602 | 507 | 371 | 287 | 232 | 201 | 172 | ¹¹⁵155 | 122 | 87 | 79 | ⁵⁷74 | 57
| 55 | 46 | 50 | 40 | 48 | 32 | 40 | 34 | 31 | 16 | 26 | 38 | 25 | 34 | 34 | 25
| 20 | 23 | 17 | 15 | 24 | 14 | 18 | 22 | 19 | 18 | 20 | 17 | 17

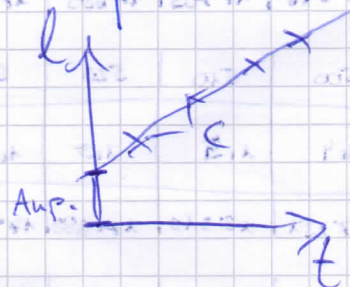
22.05.18

K. Wendland

Ultraschall-Grundlagen der Ultraschalltechnik

Progr. Läng./cm	vorher Läng./cm	U/V	t/ μs	U/V	t/ μs	Δt / μs	c/ $\frac{m}{s}$
40	4	1,122	0,4	1,207	30,6	130,2	2649
	8		0,4		60,1	59,7	
	12						
120	12	1,405	0,5	0,663	89,2	88,7	2705,7
102,1	10,2	1,405	0,4	0,646	76,9	76,4	2670,2
80	8	1,401	0,4	1,268	60,0	59,5	2689,1
70,9	7,1	1,401	0,4	1,318	46,9	46,5	3053,8
62	6,2	1,417	0,5	1,396	46,8	46,3	2678,2
42	4	1,401	0,5	1,446	29,9	29,4	2857,1
30,5	3,1	1,392	0,5	1,355	24,1	23,6	2627,1

Länge/cm	$\Delta t/\mu s$
12	45,7
10,2	39,2
8	31,4
7,1	27,7
6,2	23,8
4	15,7
3,1	12,4



t/ μs : 4,9 ; 8,74 ; 13,21

4,8 ; 8,6 ; 13,4

Cepstrum

A-Scan

Plattendicke: 0,6cm

1,2cm

$\Delta t_1 = 42,2 \mu s$

$\Delta t_2 = 17,8 \mu s$

$\Delta t_3 = 26,9 \mu s$

$\Delta t_4 = 20,5 \mu s$

800

Gain 35dB
Output 30dB

Impuls-
Echo

Durchschallung

Spekt.

Auge