

Versuch US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Jonah Nitschke
lejonah@web.de

Sebastian Pape
sepa@gmx.de

Durchführung: 06.06.2017

Abgabe: 13.06.2017

1 Theorie

Die Ultraschalltechnik ist heutzutage ein wichtiges Element im Alltag. Vor allem in der Medizin spielt die Ultraschalltechnik eine grundlegende Methode in der Therapie und auch in der Diagnostik. In dem folgenden Versuch sollen grundlegende Eigenschaften und Definitionen der Ultraschallechographie kennengelernt und angewandt werden.

1.1 Theoretische Grundlagen

Der Ultraschall besitzt eine für den Menschen nicht wahrnehmbare Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 1 GHz. Im Allgemeinen ist Schall eine longitudinale Welle, die mittels Druckschwankungen weitergeleitet wird und durch folgende Formel beschrieben werden kann:

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

Bei dem Faktor Z handelt es sich um die akustische Impedanz, welche mithilfe der Dichte und der Schallgeschwindigkeit des vorliegenden Stoffes beschrieben wird:

$$Z = c \cdot \rho. \quad (2)$$

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.

Bei Schallwellen muss aufgrund von unterschiedlichen Eigenschaften zwischen gasförmigen oder flüssigen Medien und Festkörpern unterschieden werden. In Gasen und Flüssigkeiten treten lediglich Longitudinalwellen auf, sodass sich für die Schallgeschwindigkeit folgende Relation ergibt:

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}}. \quad (3)$$

κ beschreibt dabei die Kompressibilität des Mediums.

Im Gegensatz zu Gasen und Flüssigkeiten treten bei Festkörpern zusätzlich zu den Longitudinalwellen noch Transversalwellen auf, sodass die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern allgemein richtungsabhängig ist. Für die Schallgeschwindigkeit ergibt sich mit dem Elastizitätsmodul E damit folgender Zusammenhang:

$$c_{Fe} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4)$$

Es muss beachtet werden, dass c_{Fe} für Transversal- und Longitudinalwellen unterschiedlich aussieht.

Bei der Betrachtung von Schallwellen in einem Medium ist zu Berücksichtigen, dass im Allgemeinen immer ein Teil der Energie durch Absorption verloren geht. Deshalb ist die Intensität der Welle als eine Funktion des Ortes und des Absorptionskoeffizienten α beschreibbar:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}. \quad (5)$$

Luft besitzt einen sehr großen Absorptionskoeffizienten, weshalb bei dem folgenden Versuch immer ein Kontaktmittel verwendet wird. Bei dem Kontaktmittel handelt es sich um bidestilliertes Wasser oder Hydrogel.

Während des Experimentes werden zwei verschiedenen Messmethoden verwendet, wovon eine auf der reflektierten Welle und eine auf der transmittierten Welle basiert. Der Reflexionskoeffizient R beschreibt das Verhältnis der einfallenden und reflektierten Intensität und ist von den akustischen Impedanzen der beiden Medien ab, die die Grenzfläche bilden.

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2. \quad (6)$$

Der Transmittierende Anteil kann dann entsprechend aus $T = 1 - R$ berechnet werden.

Für die Erzeugung von Ultraschall wird in diesem Versuch der piezo-elektrische Effekt genutzt. Piezo-elektrische Kristalle können durch entsprechende Anregung eines äußeren elektrischen Felds in Schwingung versetzt werden. Die Amplitude der entstehenden Wellen und die daraus resultierende Energiedichte können maximiert werden, indem zwischen Anregerfrequenz und Eigenfrequenz des Kristalls Resonanz entsteht. Zudem können Piezokristalle durch Schallwellen angeregt werden, weshalb sie als Empfänger genutzt werden können. Quarz ist der meist verwendete Piezokristall, weil dieser gleichbleibende physikalische Eigenschaften besitzt. Jedoch ist der Piezo-Effekt dafür bei Quarzen relativ gering.

Wie bereits erwähnt kann mithilfe von Ultraschall Information über den Aufbau eines Stoffes gewonnen werden. Dies geschieht meist mit einer Laufzeitmessung, welche hierbei mithilfe zweier verschiedener Methoden durchgeführt wird. Im Allgemeinen basiert die Messung darauf, dass ein Ultraschallsignal losgeschickt wird und die Laufzeit auf einer definierten Messstrecke mittels eines Empfängers gemessen wird.

Bei der ersten Methode handelt es sich um das Durchschallungs-Verfahren (Abb. 1a). Hier wird von einem Ultraschallsender ein Signal durch einen Stoff geschickt und auf der anderen Seite von einem Empfänger aufgefangen. Werden nun die Amplituden der losgeschickten und der empfangenen Welle verglichen, kann eine Aussage darüber getroffen

werden, ob sich in der Probe eine Fehlstelle befindet. Über den Ort der Fehlstelle lässt sich jedoch keine Aussage tätigen.

Die zweite Methode ist das Impuls-Echo-Verfahren (Abb. 1b). Hier wird lediglich ein Schallkopf verwendet, welcher sowohl Schallwellen lossendet als auch die reflektierten Signale wahrnimmt. Mithilfe der Amplitude des Echos kann hier die Größe des Echos bestimmt werden. Mithilfe der Schallgeschwindigkeit und der Laufzeit kann die Lage der Fehlstelle bestimmt werden. Diese ergibt sich aus:

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

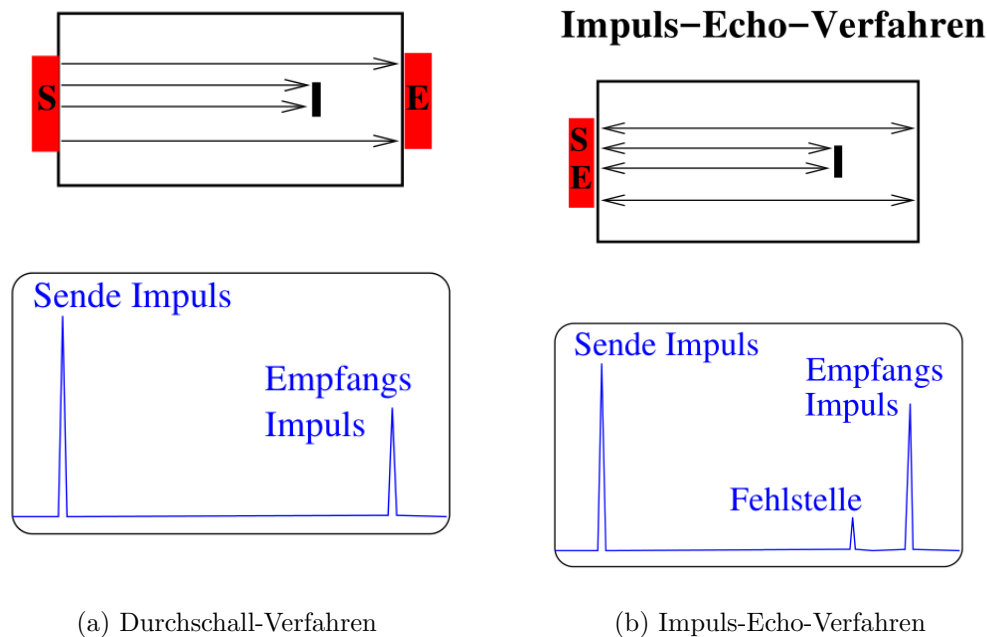


Abbildung 1: Die beiden Messmethoden für US1. [1]

Für beide Verfahren gibt es verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten, den A-Scan, den B-Scan und den TM-Scan. Bei dem A-Scan (Amplitude-Scan) wird auf einem Bildschirm die Amplitude der registrierten Welle dargestellt. Bei dem B-Scan (Brightness-Scan) wird hingegen die aufgenommene Amplitude in eine Helligkeitsstufe umgewandelt, sodass durch viele punktuelle Messungen ein 2-dimensionales Bild eines Mediums aufgenommen werden kann. Beim TM-Scan (Time-Scan) wird eine hohe Impulswiederholungsfrequenz verwendet, sodass zum Beispiel Bewegungen des Gewebes durch unterschiedliche Impulseschos registriert werden und zeitlich dargestellt werden können. Diese Scan-Methode wird häufig in der Medizin kombiniert mit dem B-Scan angewandt.

2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

2.1 Versuchsaufbau

Die grundlegenden Bestandteile des Aufbaus sind ein Echoskop, zwei Ultraschallsonden, ein PC zur Auswertung der Daten, sowie verschiedene Acrylplatten und -Zylinder. Das Echoskop kann ausschließlich im Impuls-Betrieb genutzt werden. Zwischen den beiden Scan-Einstellungen (siehe Abschnitt 1.1) kann mit einem Kipp-Schalter gewechselt werden, indem der Schalter auf **REFLEC.** oder **TRANS.** umgelegt wird. Für den Versuch werden zwei Ultraschallsonden mit 2 MHz verwendet, deren Empfangsleistung zwischen 0 und 35 dB liegen.

Bei der verwendeten Messsoftware handelt es sich um das Programm Echo-View, mit dem sowohl A-Scan, FFT Spektrum, Cepstrum und das Verstärkung TGC betrachtet werden kann. Mithilfe der beiden Cursor können Differenzen zwischen zwei Positionen auf der X-Achse bestimmt werden. Zudem geben diese beiden Cursor das Intervall an, welches für das Frequenzspektrum und das Cepstrum verwendet werden. Bei dem A-Scan kann das Signal sowohl als Funktion der Zeit (in μs) als auch als Funktion der Eindringtiefe (in mm) betrachtet werden. Mithilfe der Freeze- und Start-Taste kann die durchgehende Aktualisierung des A-Scan-Bildes zudem angehalten und wieder gestartet werden.

Mit der Time Gain Control kann die Verstärkung über die Parameter Treshhold, Wide, Slope und Start eingestellt werden. Die erstellte Grafik kann mit Export abgespeichert werden.

2.2 Versuchsdurchführung

Für den Versuch werden im Vorhinein schon die Schallgeschwindigkeiten von verschiedenen Medien recherchiert, unter anderem von Acryl. Als erstes wird die rausgesuchte Schallgeschwindigkeit in das Programm eingegeben und mittels Impuls-Echo-Verfahren die Tiefenmessung überprüft. Dafür wird die mit einer Schieblehre bestimmte Länge eines Acrylzylinders mit dem Wert aus der Tiefenmessung verglichen.

Anschließend wird mit dem Impuls-Echo-Verfahrens die Laufzeit von verschiedenen Acrylzylindern bestimmt. Dafür wird ein Zylinder auf ein Papiertuch gestellt und mit bidestilliertem Wasser an eine 2 MHz Sonde gekoppelt. Mittels eines A-Scans und den Cursors wird die zeitliche Distanz zwischen dem ausgesandten und dem reflektierten Signal gemessen. Des Weiteren werden die Amplituden der verschiedenen Peaks gemessen, um daraus die Dämpfung zu bestimmen. Um die Messung nicht zu verfälschen, wird dafür die Verstärkung bei dem Versuch komplett ausgeschaltet. Die Messung wird anschließend für 7 weitere Zylinder wiederholt.

Im nächsten Teil des Experimentes wird die Durchlaufzeit noch einmal mit der Durchschall-Methode gemessen. Dafür wird der Zylinder auf eine Schiene gelegt und an beide Enden

werden mit Hydrogel Ultraschallsonden gekoppelt. Auf dem A-Scan wird dann wieder die Laufzeit abgelesen, indem erneut der zeitliche Abstand zwischen den Peaks mit den Cursor ausgemessen wird.

Im weiteren Verlauf des Versuchs werden zwei Acrylscheiben verschiedener Dicke auf ein Papiertuch gelegt und mit bidestilliertem Wasser gekoppelt. Anschließend wird noch ein Zylinder auf beide Scheiben gestellt und eine Sonde angekoppelt. Um die Mehrfachreflexion mittels des Impuls-Echo-Verfahren deutlich erkennen zu können, wird die Verstärkung solange erhöht, bis mindestens drei Reflexionen erkennbar sind. Mittels der Cursor wird wieder der zeitliche Abstand zwischen den Peaks gemessen. Zusätzlich werden das Spektrum und das Cepstrum erstellt und abgespeichert.

Im letzten Teil des Experimentes wird noch einmal das Auge (Abb. 2) untersucht. Dafür wird erneut das Impuls-Echo-Verfahren genutzt. Die 2 MHz Sonde wird mit dem Hydrogel an das Auge gekoppelt und solange leicht verschoben, bis auf dem A-Scan-Bild mehrere Peaks erkennbar sind. Anschließend werden wieder die zeitlichen Abstände mittels der Cursor vermessen und notiert, sowie ein A-Scan-Bild exportiert.

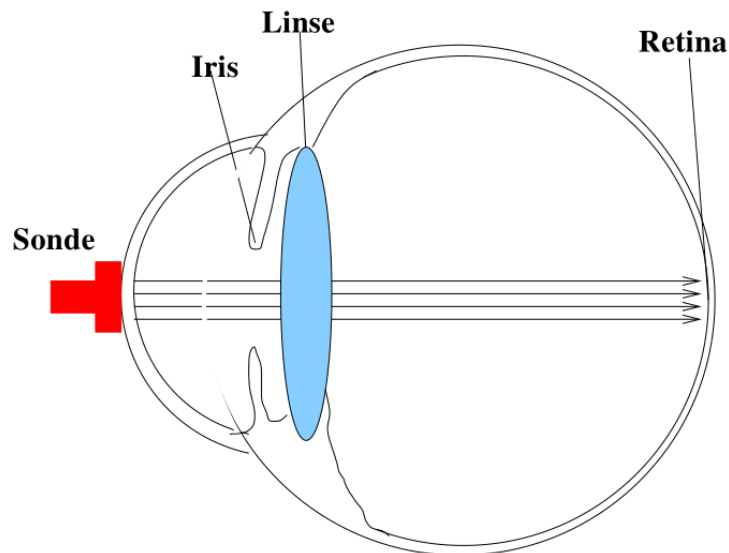


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des zu untersuchenden Augenmodells [1].

3 Auswertung

Die verwendeten Zylinder wurden mithilfe einer Schieblehre vermessen und hatten die folgenden Längen. Dabei werden die Werte als fehlerfrei angenommen.

Zylinder 1 40,35 mm

Zylinder 2 80,55 mm

Zylinder 3 80,45 mm

Zylinder 4 102,1 mm

Zylinder 5 31,1 mm

Zylinder 6 39,7 mm

Zylinder 7 61,5 mm

3.1 Bestimmung der Dämpfungskonstante und der Schallgeschwindigkeit mit dem Impuls–Echo–Verfahren

Die Dämpfungskonstante α aus (5) lässt sich aus den genommenen Daten berechnen. Dafür werden die Messdaten in die Formel (5) eingesetzt und wie folgt nach α aufgelöst.

$$\alpha = -\frac{1}{x_1} \ln \left(\frac{I'_0}{I_0} \right) \quad (8)$$

Dabei ist I'_0 die Amplitude an der Stelle $x_1 > 0$ und I_0 die Amplitude an der Stelle $x = 0$.

Die Messdaten sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Werte für Zylinder 4 und den zusammengesetzten Zylinder mit dem achten Messwert wurden für die Berechnung der Dämpfungskonstante nicht verwendet, weil die Peaks nur bei Verstärkung ausgemessen werden konnten. Auf das Herausrechnen des Verstärkungsfaktors wurde der Einfachheit halber verzichtet. Im Mittel ergibt sich die Dämpfungskonstante zu:

$$\alpha = (21,257 \pm 0,301) \frac{1}{\text{m}}. \quad (9)$$

Der Fehler ist die Standardabweichung des Mittelwertes. Eine Darstellung der Dämpfung in Acryl ist in dem Diagramm 3 einzusehen. Dabei sind die Messdaten der Anfangs- und Endamplituden ebenfalls eingetragen.

Die Schallgeschwindigkeit ist aus den Laufzeiten zwischen den gemessenen Peaks und den vermessenen Zylinderlängen mithilfe von (7) zu berechnen. Dafür wurde mit dem

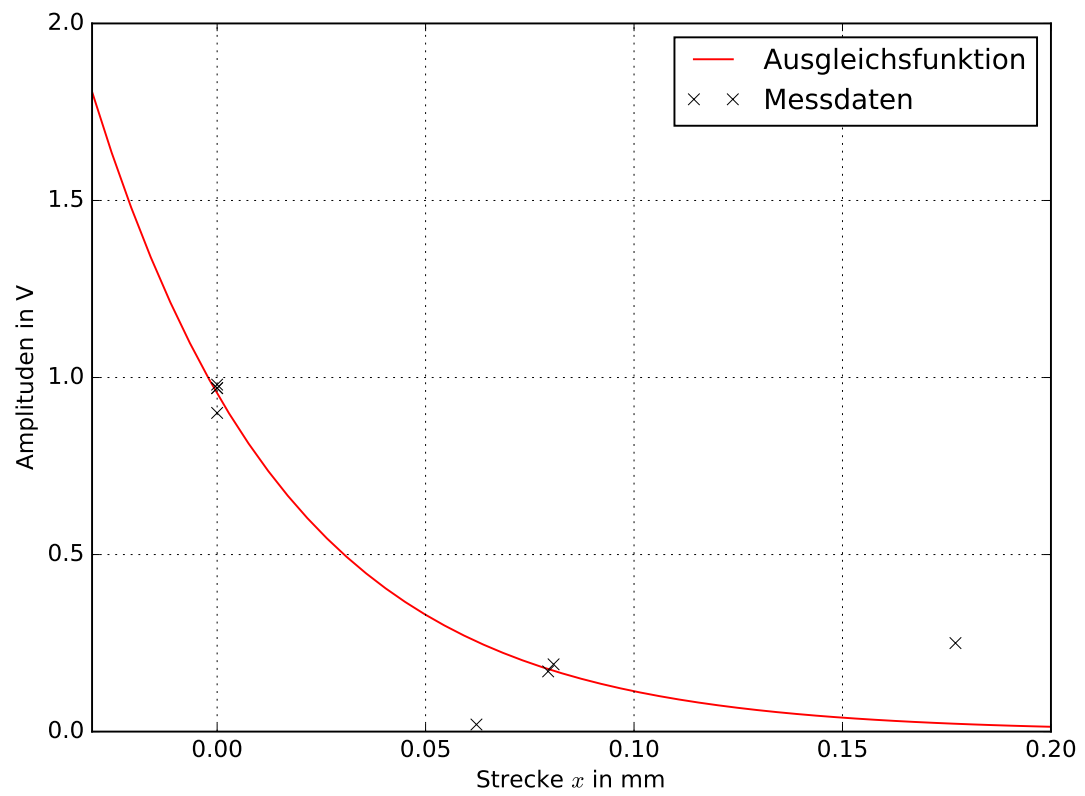


Abbildung 3: Darstellung der Dämpfung der Amplitude mit Zunahme der Strecke.

Python-Packet *curve_fit* eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Der systematische Fehler der Sonde ist der Ordinaten-Abschnitt der Ausgleichgeraden und die Schallgeschwindigkeit ist in der Steigung wiederzufinden.

Die Werte ergeben sich zu:

$$c_{\text{Acryl,echo}} = 2880,943 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (10)$$

$$\Delta_{\text{Sonde,echo}} = -3,862 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (11)$$

Das zugehörige Diagramm der Messung ist im Folgenden dargestellt.

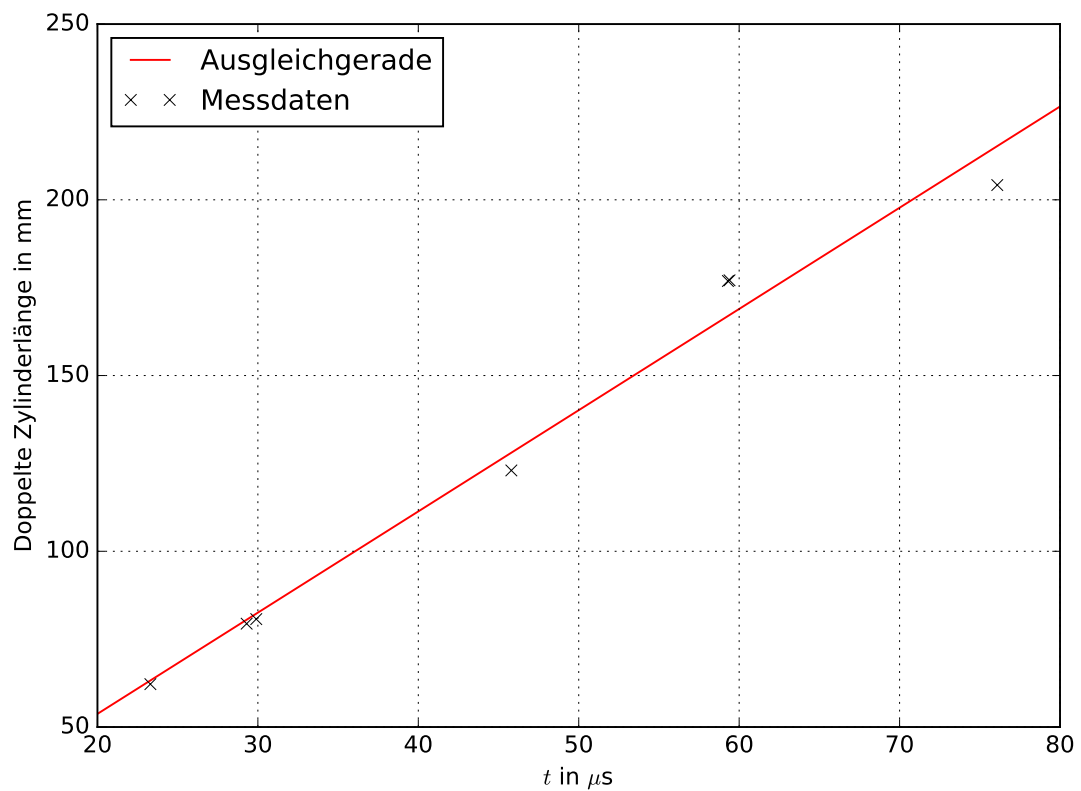


Abbildung 4: Schallgeschwindigkeit in Acryl, bestimmt über das Impuls-Echo-Verfahren.

Tabelle 1: Messdaten zu dem Impuls-Echo-Verfahren. Die Werte sind den Zylindern 1 - 7 der Reihe nach zuzuordnen. Der achte Messwert entspricht einem Zylinder der Länge $Z_1 + Z_7$.

U_1 in V	t_1 in μs	U_2 in V	t_2 in μs
0,90	0,40	0,17	30,30
0,97	0,40	0,02	59,80
0,98	0,50	0,01	59,80
1,00	0,40	0,12	76,49
0,97	0,40	0,25	23,70
0,98	0,50	0,19	29,80
0,97	0,40	0,04	46,20
1,00	0,50	0,12	75,70

3.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungsverfahren

Die Messdaten zum Durchschallungsverfahren sind in Tabelle 2 dargestellt. Es wurde gleich verfahren wie bei dem Impuls-Echo-Verfahren.

Die Werte ergeben sich zu:

$$c_{\text{Acryl,durch}} = 2878,377 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (12)$$

$$\Delta_{\text{Sonde,durch}} = -2,946 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (13)$$

Das zugehörige Diagramm der Messung ist im Folgenden dargestellt.

Tabelle 2: Messdaten zu dem Durchschallungsverfahren. Die Messdaten sind der Reihe nach den Zylindern 1 - 7 zuzuordnen.

Laufzeiten in μs
15,21
29,78
30,18
38,48
11,98
15,21
23,27

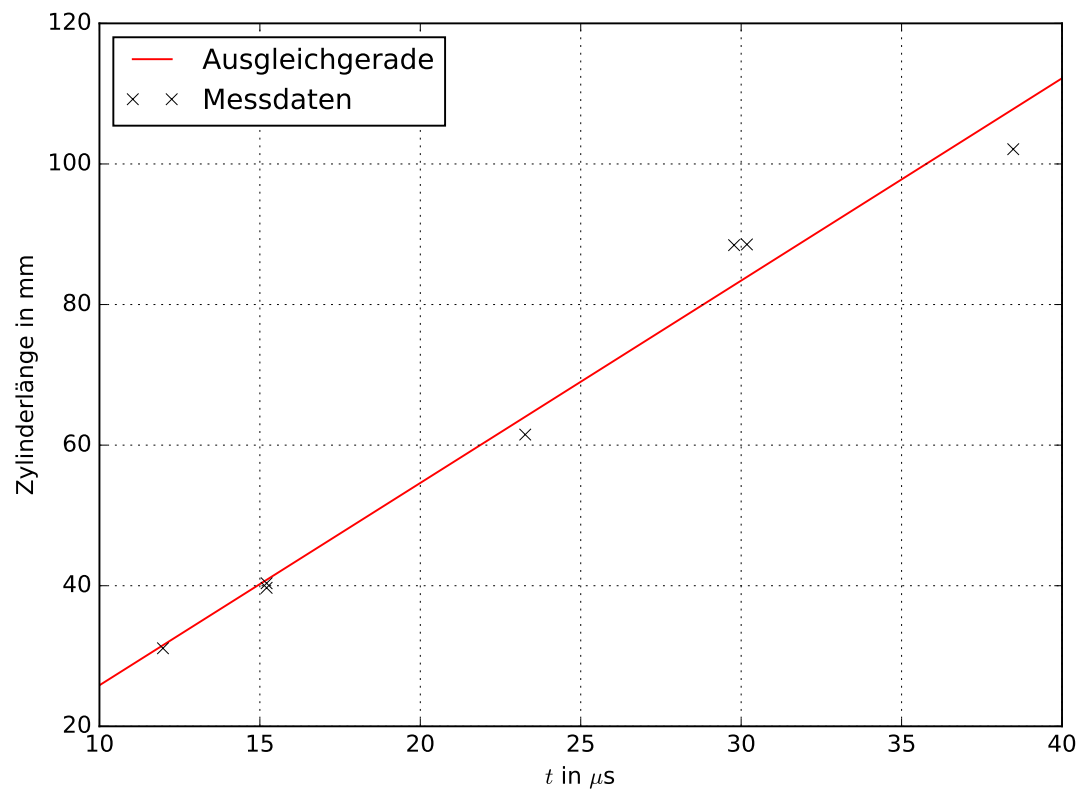


Abbildung 5: Schallgeschwindigkeit in Acryl, bestimmt über das Durchschallungsverfahren.

3.3 Spektrale Analyse und Cepstrum

Die verwendeten Acrylplatten wurde mit einer Schieblehre vermessen. Die Dicken wurden ebenfalls als fehlerfrei angenommen.

Platte 1 $d_1 = 9,9 \text{ mm}$

Platte 2 $d_2 = 6 \text{ mm}$

Das Durchschallungsverfahren ergab die folgenden Werte.

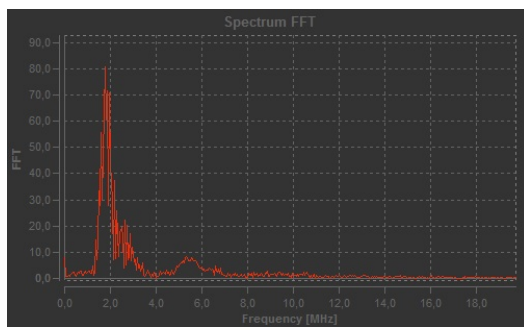
Platte 1 $d_1 = 10,51 \text{ mm}$

Platte 2 $d_2 = 6,48 \text{ mm}$

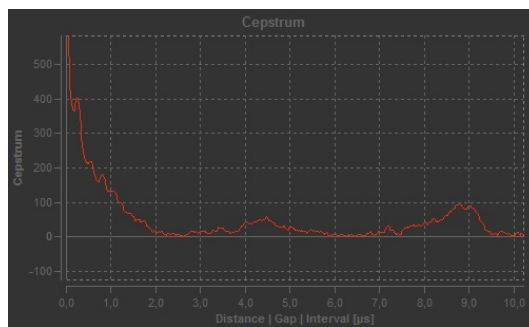
Die bestimmten Werte weichen um $\Delta_{\text{Platte1}} = 0,61 \text{ mm}$ und $\Delta_{\text{Platte2}} = 0,48 \text{ mm}$ von den mit der Schieblehre vermessenen Werten ab.

Die Fehler aus dem systematische Fehler der Sonde sind vernachlässigbar klein.

Das Spektrum und das Cepstrum wurden aufgenommen. Die genommenen Diagramme sind im Folgendem dargestellt.



(a) Aufgenommenes Spektrum.



(b) Aufgenommenes Cepstrum.

3.4 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

Es wurde ein Auge wie aus Abb. 2 untersucht. Insgesamt wurden fünf Peaks aufgenommen die den folgenden Bestandteilen des Auges zuzuordnen sind.

1. Hornhaut
2. Iris
3. Linseneingang
4. Linsenausgang
5. Retina

Die Peaks spiegeln der Aufzählung entsprechend die Bestandteilen des Auges wieder. Für die Bereiche zwischen Hornhaut und Linseneingang, sowie Linsenausgang und Retina wurde die Schallgeschwindigkeit für Glaskörper verwendet ($c_{\text{Glaskörper}} = 1410 \text{ m/s}$ [1]). Für den Bereich zwischen Linseneingang und Linsenausgang wurde eine Schallgeschwindigkeit von $c_{\text{Linse}} = 2500 \text{ m/s}$ angenommen.

Die Bestandteile des Auges haben die folgenden Tiefen.

Hornhaut 0 mm

Iris $(4,385 \pm 0,011) \text{ mm}$

Linseneingang $(7,635 \pm 0,018) \text{ mm}$

Linsenausgang $(14,835 \pm 0,021) \text{ mm}$

Retina $(44,23 \pm 0,09) \text{ mm}$

Die dazugehörigen Fehler entstehen durch den systematischen Fehler der Sonde.

Die Messdaten sind in der Tabelle 3 einzusehen.

Tabelle 3: Messdaten zur biometrischen Untersuchung des Auges. Die Messdaten sind der Reihe den Bestandteilen des Auges zuzuordnen.

Peakabstand Δ_{peak} in μs	Absoluter Abstand
0,20	0,20
6,22	6,64
4,61	11,05
5,76	16,81
41,70	70,26

4 Diskussion

Als Literaturwert der Schallgeschwindigkeit in Acryl wurde $c_{\text{Acyl,lit}} = 2730 \text{ m/s}$ [2] angenommen. Die Schallgeschwindigkeit in Acryl wurde über zwei verschiedenen Ultraschallverfahren ermittelt. Die berechneten Werte unterscheiden sich um $\Delta_{\text{c,gemessen}} = (1,740 \pm 0,917) \text{ m/s}$. Hingegen liegt der Unterschied des gemittelten Wertes zum Literaturwert bei $(149,246 \pm 3,404) \text{ m/s}$. Da beide Verfahren einen deutlichen Unterschied zu dem Literaturwert aufweisen, aber untereinander kaum verschieden sind, wird ein weiterer systematischer Fehler, der von dem systematischen Fehler der Sonde verschieden ist angenommen. Die Dicke der Acrylplatten wurden einmal über eine Schieblehre und zum anderen über das Durchschallungsverfahren ermittelt. Die Dicken, die sich aus dem Durchschallungsverfahren ergeben, sind ca. einen halben Millimeter größer als die

ausgemessenen Werte. Mit dem Literaturwert für die Schallgeschwindigkeit von Acryl ergeben sich die Plattendicken zu:

Platte 1 $d_1 = 9,96 \text{ mm}$

Platte 2 $d_2 = 6,14 \text{ mm}$.

Damit ist die Abweichung der Plattendicken auf den systematischen Fehler der Schallgeschwindigkeit zurückzuführen.

Die Diagramme aus der Spektralen Analyse (6a, 6b) werden im Folgenden diskutiert. In dem Diagramm des Cepstrums sind nicht die Lagen der tatsächlich beobachteten Peaks erkenntlich, hingegen werden Peaks dargestellt, die nicht beobachtet wurden. Das Spektrum zeigt einen Peak bei ca. 1,8 MHz. Die Eingangsfrequenz betrug hingegen 2 MHz. Die weiteren Peaks sind durch Reflexionen der Eingangswelle zu erklären.

Die biometrische Untersuchung des Auges ergab Werte, die mit den Erwartungswerten übereinstimmen. Hierbei muss der systematische Fehler ebenfalls bedacht werden, weshalb davon auszugehen ist, dass die tatsächlichen Werte kleiner als die bestimmten Werte sind.

Literatur

- [1] TU-Dortmund. *US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. 7. Juni 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf>.
- [2] Olympus-ims. *Schallgeschwindigkeit in Material*. 7. Juni 2017. URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>.