

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Robin Pelkner
robin.pelkner@tu-dortmund.de

Joshua Althüser
joshua.althueser@tu-dortmund.de

Durchführung: 23.04.2019

Abgabe: 30.04.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
4 Auswertung	5
4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit	5
4.2 Bestimmung des Absorptionskoeffizienten	7
4.3 Biometrische Abmessung eines Augenmodells	8
5 Diskussion	9
6 Anhang	10
Literatur	15

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es die Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels einer Ultraschallmessung zu bestimmen. Außerdem wird ein Augenmodell mittels Ultraschall vermessen.

2 Theorie

Schallwellen sind longitudinale Wellen, welche sich durch Druckschwankungen in Medien fortbewegen. Diese Schwankung kann durch

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

beschrieben werden, wobei

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

die akustische Impedanz ist. Dabei ist ρ die Dichte des Mediums durch das sich der Schall bewegt und c die zugehörige Schallgeschwindigkeit des Materials. Hieran wird deutlich, dass Schallwellen im Vergleich zu elektromagnetischen Wellen nicht im Vakuum existieren können, also ein Medium zur Ausbreitung benötigen. Andere Eigenschaften elektromagnetischer Wellen, wie zum Beispiel Reflexion und Beugung werden aber auch von Schallwellen erfüllt. Die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern ist über das Elastizitätsmodul E und die Dichte ρ zu

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

definiert. Zu Beachten ist hier aber, dass sich der Schall in Festkörpern nicht nur longitudinal, sondern als Folge von Schubspannungen auch transversal ausbreitet. Des Weiteren nimmt die Intensität I_0 des Schalls bei Ausbreitung exponentiell in der Strecke x ab:

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

Dabei ist α der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude. Beim Auftreffen des Schalls an einer Grenzfläche wird ein Teil des Schalls reflektiert. Es wird daher ein Reflexionskoeffizient R als das Verhältnis von reflektierter zu eintreffender Schallintensität definiert. Der Reflexionskoeffizient

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

ist dabei Abhängig von den akustischen Impedanzen Z_i der beiden angrenzenden Materialien. Des Weiteren ist der transmittierte Anteil T durch

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

bestimmt.

Zur Erzeugung von Ultraschall kann der sogenannte piezo-elektrische Effekt genutzt werden. Dazu wird ein piezoelektrischer Kristall in ein elektrisches Wechselfeld gebracht

und wenn eine polare Achse des Kristalls in Richtung des elektrischen Feldes zeigt, wird dieser dadurch zu Schwingungen angeregt, wobei Ultraschall abgestrahlt wird. Falls die Ausgangsfrequenz mit der Eigenfrequenz des Kristalls übereinstimmt kommt es zur Resonanz und es können hohe Energiedichten erzeugt werden. Umgekehrt kann der Kristall auch als Empfänger für Ultraschall genutzt werden. Dabei treffen Schallwellen auf den Kristall und regen diesen zu Schwingungen an, die dann aufgenommen werden können.

Allgemein wird hier zwischen zwei Arten der Ultraschallmessung unterschieden. Es gibt einmal das Durchschallungsverfahren, bei dem mit einem Ultraschallsender ein Schallimpuls ausgesendet wird und am anderen Ende der Probe durch einen Empfänger gemessen wird. Falls eine Fehlstelle in der Probe existiert so wird das durch eine geringere Intensität deutlich. Mit dieser Methode ist es allerdings nicht möglich Aussagen über den Ort der Fehlstelle zu treffen.

Die zweite Methode ist das Impuls-Echo-Verfahren, bei dem der Ultraschallsender auch als Empfänger genutzt wird. Der ausgesendete Ultraschallimpuls wird an Grenzflächen reflektiert und vom Empfänger aufgenommen. Diese Methode erlaubt anderes als die vorherige Aussagen über die Position von Fehlstellen zu treffen. Wenn die Schallgeschwindigkeit im Material bekannt ist, kann die Position der Fehlstelle über

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

bestimmt werden. Bei der Ultraschallmessung wird zwischen verschiedenen Darstellungsmethoden unterschieden: Der A-Scan stellt den zeitlichen Verlauf, also die Eindringtiefe, gegen die Stärke des Echos aufgetragen dar. Der sogenannte B-Scan hingegen kann durch Bewegen der Sonde ein zweidimensionales Bild erzeugen, wobei die Echoamplituden als Helligkeitsabstufungen dargestellt werden. Der TM-Scan kann durch eine schnelle Abtastung eine zeitliche Bildfolge aufnehmen, um so zum Beispiel Bewegungen zu visualisieren. In diesem Versuch wird ausschließlich der A-Scan verwendet.

3 Durchführung

In allen Versuchsteilen wird eine 2 MHz Ultraschallsonde verwendet. Im ersten Versuchsteil werden fünf verschieden große Zylinder mittels Impuls-Echo-Verfahren vermessen. Dabei soll die Schallgeschwindigkeit von Acryl bestimmt werden. Hierzu wird zunächst eine Ultraschallsonde mit bidestilliertem Wasser an die Acrylzylinder gekoppelt. Ein Kontaktmittel ist notwendig, da Ultraschall sehr stark von Luft absorbiert wird. Es werden die Amplituden, sowie die Laufzeiten der ersten beiden reflektierten Pulse bestimmt und aufgenommen. Zusätzlich wird die Länge der Acrylzylinder mit einer Schieblehre bestimmt. Des Weiteren lässt sich aus den Daten des zweiten gemessenen Impulses die Dämpfung bestimmen. Zur Weiteren Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl wird die vorrangegangene Messung für zwei weitere Zylinderlängen durchgeführt, wobei die zu messenden Zylinder nun aus zwei Zylindern zusammengesetzt werden.

Anschließend wird die Messung der ersten fünf Zylinder ein weiteres Mal durchgeführt, wobei dieses Mal das Durchschallungsverfahren angewandt wird. Dazu werden die Zylinder

und die Ultraschallsonden jeweils in eine Halterung gebracht und mit Koppelgel als Kontaktmittel angekoppelt. Neben den mit einer Schieblehre zu bestimmenden Längen der Zylinder sind die Laufzeiten der Ultraschallimpulse aufzunehmen.

Im letzten Versuchsteil wird ein Augenmodell mithilfe der Ultraschallsonde durch das Impuls-Echo-Verfahren vermessen. Dazu wird die Ultraschallsonde mit Koppelgel auf die Mitte der Hornhaut gesetzt. Der Einschallwinkel wird jetzt so gewählt, dass das Echo der Retina zu sehen ist. Die Laufzeiten der Echso an Iris und Retina werden aufgenommen, woraus sich die Abmessungen des Auges bestimmen lassen.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit c_{Schall} mittels der Impuls-Echo-Methode werden die Daten in Tabelle 1 geplottet. Über diese Werte wird ein linearer Fit der Form

$$d = c_{\text{Schall},1} \cdot t + x_{0,1} \quad (8)$$

gelegt. Dabei ist zu beachten, dass d den doppelten Betrag der Länge der Zylinder hat, da der Schall erst zu der Rückwand dieser und dann zurück zum Detektor laufen muss. Der entstehende Graph ist in Abbildung 1 zu sehen.

Tabelle 1: Daten der Durchschallung von verschiedenen Acrylzyklindern mit der Impuls-Echo-Methode.

d / cm	U_1 / V	$t_1 / \mu\text{s}$	U_2 / V	$t_2 / \mu\text{s}$	$\Delta t / \mu\text{s}$
3,11	1,37	0,7	1,37	23,4	22,7
4,05	1,36	0,7	1,36	30,2	29,5
8,05	1,36	0,7	1,32	59,6	58,9
10,21	1,37	0,7	0,46	76,4	75,7
12,05	1,36	0,7	0,90	88,8	88,1
16,10	1,36	0,7	1,34	30,2	29,5
18,26	1,35	0,8	0,55	76,4	75,6

Zur Berechnung der Koeffizienten werden die letzten beiden Werte nicht betrachtet, da diese eine ungewöhnliche und sehr große Abweichung von der Geraden aufweisen. Somit werden jene mittels Python 3.7.0 als

$$c_{\text{Schall},1} = (0,271 \pm 0,002) \frac{\text{cm}}{\text{s}} = (2,71 \pm 0,02) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$x_{0,1} = (0,1 \pm 0,1) \text{ cm}$$

ermittelt.

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit der Durchschall-Methode wird analog zu der Impuls-Echo-Methode vorgegangen: Es werden die Daten aus Tabelle 2 geplottet und über diese wird erneut ein linearer Fit der Form

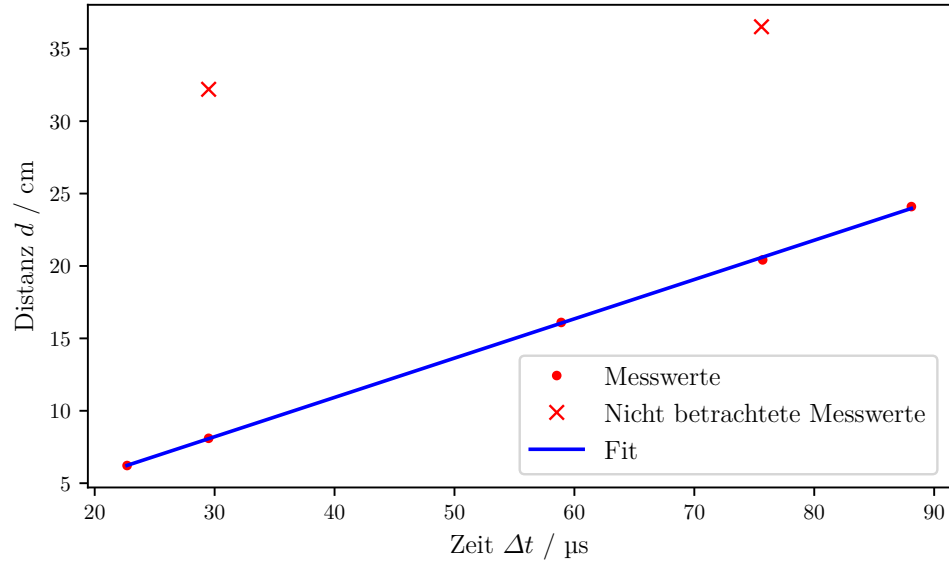


Abbildung 1: Plot und Fit der Messwerte der Impuls-Echo-Methode zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, wobei die zwei letzten Messwerte nicht betrachtet werden.

Tabelle 2: Daten der Durchschallung von verschiedenen Acrylzyclindern mit der Durchschallmethode.

d / cm	t / μs	U / V
3,11	12,6	0,3
4,05	15,5	0,3
8,05	30,3	0,2
10,21	38,6	0,2
12,05	45,4	0,2

$$d = c_{\text{Schall},2} \cdot t + x_{0,2} \quad (9)$$

Hier entspricht d genau der Länge der Zylinder. Der entsprechende Plot ist in Abbildung 2 zu finden.

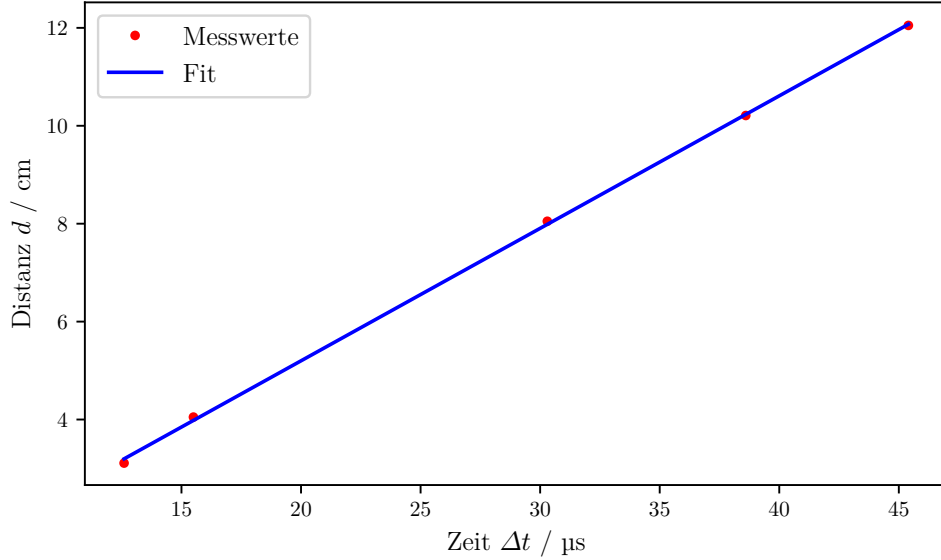


Abbildung 2: Plot und Fit der Messwerte der Durchschall-Methode.

Ebenfalls mittels Python 3.7.0 werden die Koeffizienten ermittelt:

$$c_{\text{Schall},2} = (0,271 \pm 0,003) \frac{\text{cm}}{\text{s}} = (2,71 \pm 0,03) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$x_{0,2} = (-0,21 \pm 0,08) \text{ cm.}$$

4.2 Bestimmung des Absorptionskoeffizienten

Zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten α werden die Werte aus Tabelle 1 geplottet. Dabei wird die $U(x)$ -Achse logarithmisiert, um so eine Gerade zu erhalten. Über diese wird ein Fit der Form

$$\ln \left(\frac{U}{1V} \right) = \ln \left(\frac{U_0}{1V} \right) - \alpha x$$

gelegt. Erneut ist darauf zu achten, dass d den doppelten Betrag der Länge der Zylinder hat. Der so entstehende Plot ist in Abbildung 3 zu sehen.

Aufgrund starker Abweichungen der Werte bei $d = 10,21 \text{ cm}$ und $d = 16,10$, werden diese in der Ausgleichsrechnung nicht näher betrachtet. Somit ermitteln sich die Werte mittels Python 3.7.0 als

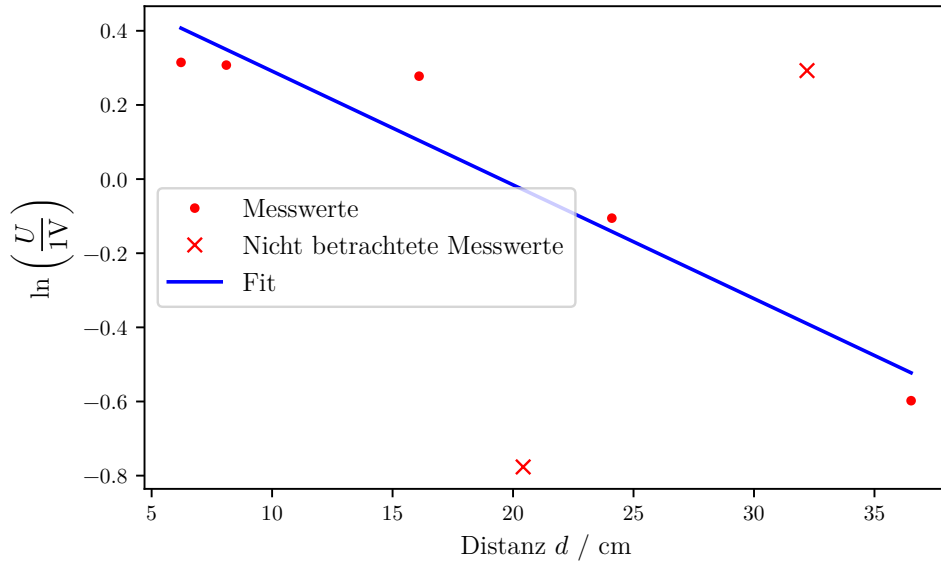


Abbildung 3: Plot und Fit der Messwerte der Impuls-Echo-Methode zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten, wobei zwei Messwerte nicht betrachtet werden.

$$\ln\left(\frac{U_0}{1V}\right) = (0,6 \pm 0,1)$$

$$\alpha = (0,031 \pm 0,005) \frac{1}{\text{cm}} = (3,1 \pm 0,5) \frac{1}{\text{m}}$$

bestimmt.

4.3 Biometrische Abmessung eines Augenmodells

Bei der Vermessung des Augenmodells werden mehrere ausgeprägte Peaks gemessen. Die Daten sind in Tabelle 3 zu finden. Der nullte bei $t \approx 0$ s entsteht an der Grenzfläche Sonde-Hornhaut. Die weiteren relevanten Peaks sind Peak Nummer 1 (Augenkammer-Linse), 2 (Linse-Glaskörper) und 5 (Retina). Peak Nummer 3 und 4 entstehen durch Reflexionen im Auge selbst, beispielsweise durch zweimalige Reflexionen in der Linse selbst.

Die Schallgeschwindigkeiten innerhalb der verschiedenen Materialien variieren. Diese werden aus der Literatur entnommen:

$$c_{\text{Augenkammer}} = 1532 \frac{\text{m}}{\text{s}} [1, \text{S. 63}]$$

$$c_{\text{Linse}} = 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}} [2]$$

$$c_{\text{Glaskörper}} = 1410 \frac{\text{m}}{\text{s}} [2].$$

Damit lassen sich die Distanzen berechnen wie folgt bestimmen:

Tabelle 3: Zeitabstände der detektierten Pulse bei der Durchschallung eines Augenmodells mit der Impuls-Echo-Methode.

Peak Nr	$t / \mu\text{s}$
1	15,8
2	23,5
3	32,3
4	38,6
5	72,9

$$\begin{aligned}
\text{Hornhaut - Anfang Linse: } s_1 &= \frac{1}{2}c_{\text{Augenkammer}}t_1 = 1,21 \text{ cm}, \\
\text{Hornhaut - Ende Linse: } s_2 &= \frac{1}{2}c_{\text{Linse}} + s_1 = 4,14 \text{ cm} \\
&\text{und} \\
\text{Hornhaut - Retina: } s_3 &= \frac{1}{2}c_{\text{Glaskörper}} + s_2 = 9,29 \text{ cm}.
\end{aligned}$$

5 Diskussion

Die errechneten Werte für die Schallgeschwindigkeit von $c_{\text{Schall},1} = (2,71 \pm 0,02) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $c_{\text{Schall},2} = (2,71 \pm 0,03) \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ liegen beide im Rahmen der Literaturwerte von $c_{\text{Acryl}} = 2670 \text{ bis } 2760 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [3]. Da beide Werte auch eine ähnliche Standardabweichung aufweisen, scheinen beide Methode gute Werte zu liefern. Dies ist auch gut an den Plots zu sehen: Die Messwerte liegen ziemlich genau auf dem jeweiligen Fit. Es ist jedoch zu beachten, dass die gestapelten Zylinder bei der Impuls-Echo-Methode offensichtlich fehlerhafte Werte geliefert haben, welche in der Rechnung nicht beachtet werden dürfen. Zur Bestimmung des Abschwächungskoeffizienten $\alpha = (3,1 \pm 0,5) \frac{1}{\text{m}}$ ist zu bemerken, dass einige Werte ebenfalls weit von der Erwartung abweichen. Diese wurden daher bei der Berechnung nicht beachtet. Jedoch auch die beachteten Werte weichen verglichen mit der Schallgeschwindigkeitsmessung stark von der Ausgleichsgeraden ab. Daraus entsteht die vergleichsweise hohe Standardabweichung von circa 16,1%. Auch kann der Wert durch diese starken Schwankungen nicht als genau betrachtet werden. Der Theoriewert beträgt hier $\alpha_{\text{Theorie}} = 57 \frac{1}{\text{m}}$, wobei eine starke Abweichung auffällt.

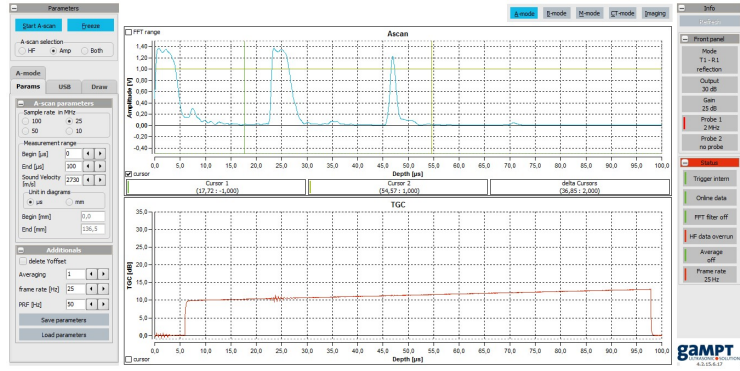
Die Messung selbst gestaltet sich als einfach, da ein statisches System betrachtet wird. Bei der biometrischen Ausmessung des Augenmodells fällt jedoch auf, dass selbst kleine Veränderungen im Einfallswinkel des Schalls die Form des Graphen stark verändern können. Ebenfalls wirken sich Reflexionen im Inneren des Modells auf die Form dessen aus. Das Gesamtbild ergibt sich dennoch realistisch mit den äußeren Abmessungen des Modells.

In einem echten Auge nehmen die Augenkammer und die Linse mit je circa 3,6 mm $\sim 16\%$ des gesamten Auges ein. Der Glaskörper nimmt die restlichen 68% ein. In dem Modell nimmt die Augenkammer $\sim 13\%$ und die Linse $\sim 31,5\%$ ein. Es fällt auf, dass die Augenkammer ein ähnliches Größenverhältnis hat, die Linse jedoch circa doppelt so groß ist. Der Glaskörper nimmt im Modell $\sim 55,5\%$ ein.

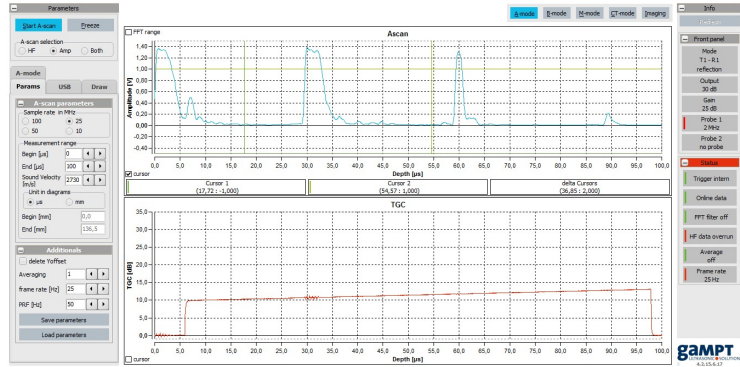
Die Abweichungen lassen sich durch die oben beschrieben schnell entstehenden Messfehler erklären.

6 Anhang

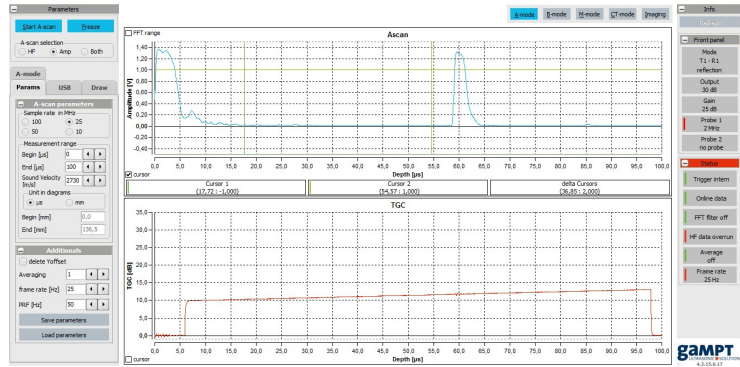
Hier sind die Graphen aufgeführt.



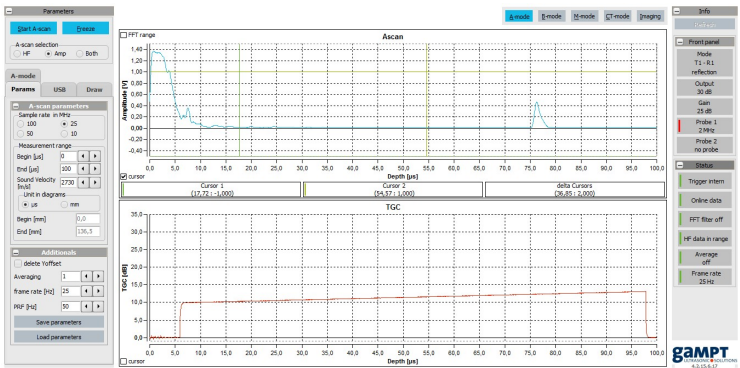
(a) $d = 3, 11$ cm



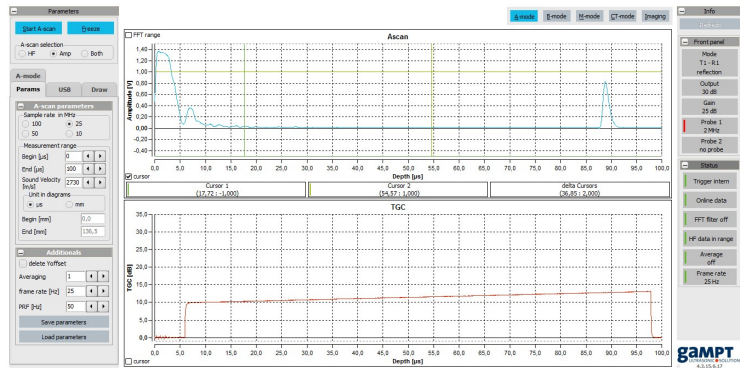
(b) $d = 4, 05^\circ$ cm



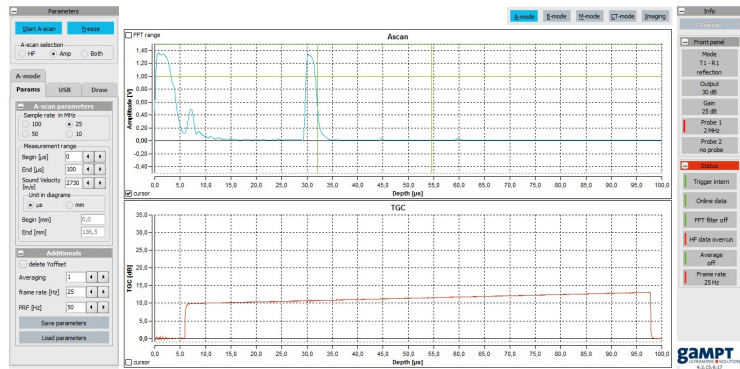
(c) $d = 8, 05^\circ$ cm



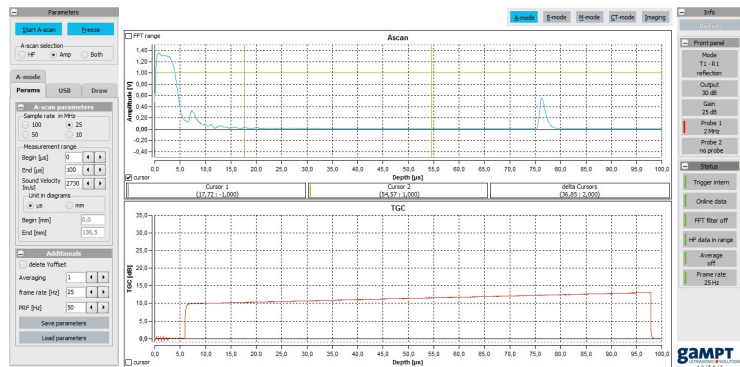
(d) $d = 10, 21$ cm



(a) $d = 12,05$ cm

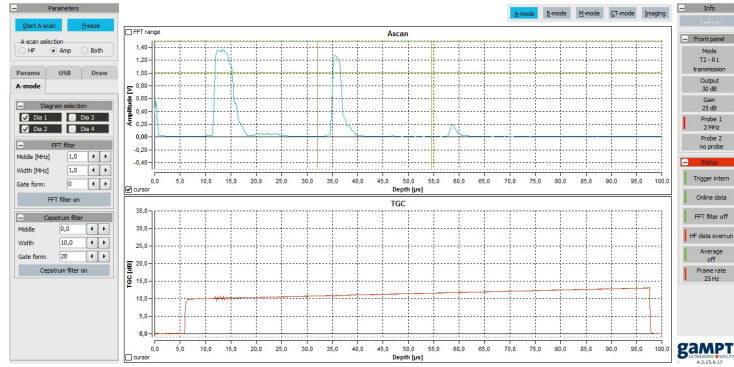


(b) $d = 16,10$ cm

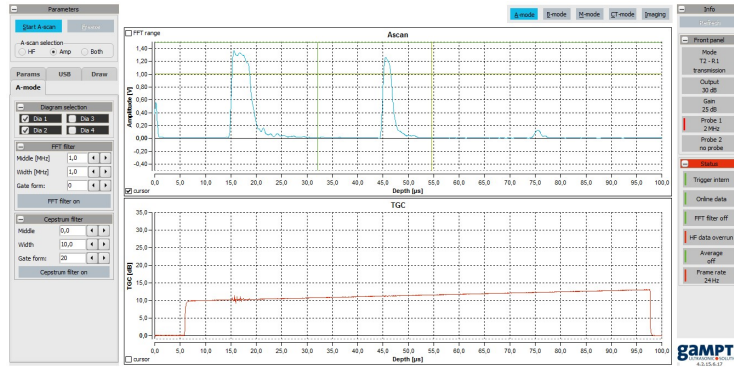


(c) $d = 18,26$ cm

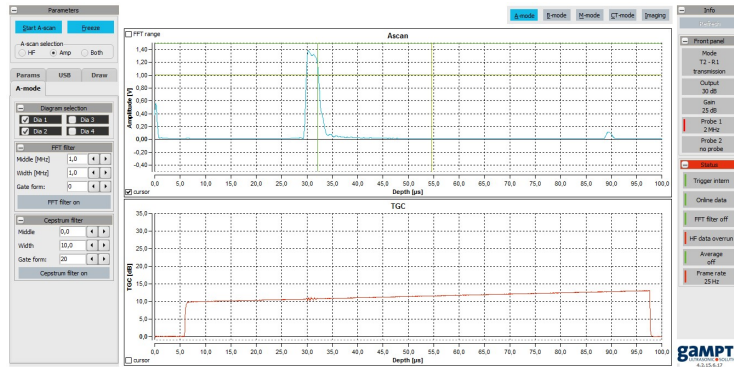
Abbildung 5: Screenshots des Programms bei der Impuls-Echo-Methode.



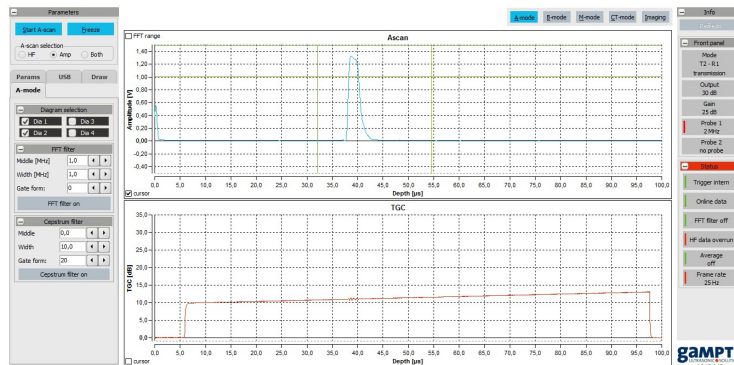
(a) $d = 3, 11$ cm



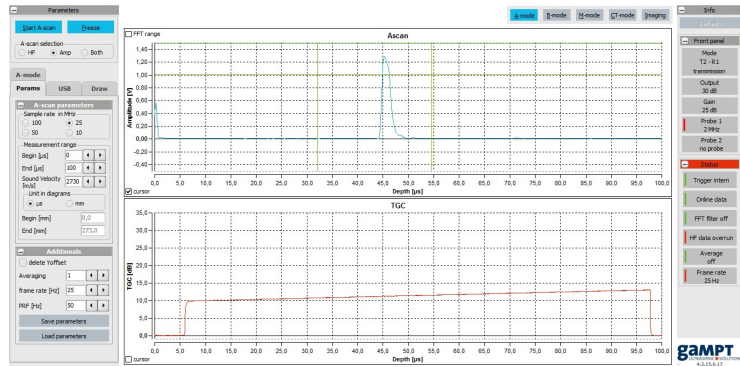
(b) $d = 4, 05^\circ$ cm



(c) $d = 8, 05^\circ$ cm



(d) $d = 10, 21$ cm



(a) $d = 12,05$ cm

Abbildung 7: Screenshots des Programms bei der Durchschall-Methode.

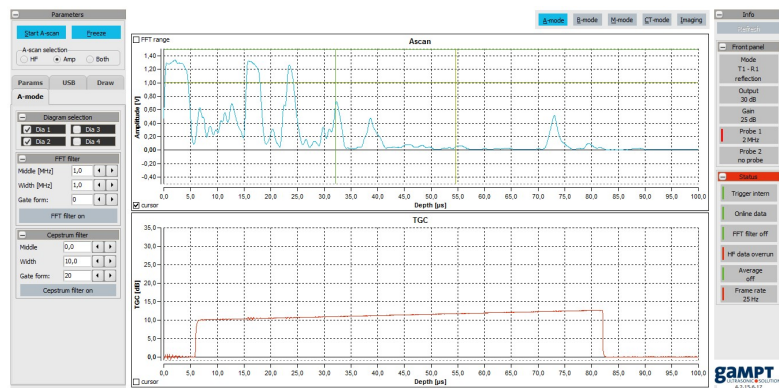


Abbildung 8: Screenshot des Programms bei der Vermessung des Augenmodells.

Literatur

- [1] Antonio Bergua. *Das menschliche Auge in Zahlen*. Springer-Verlag, 2017.
- [2] TU Dortmund. *US1 - Grundlagen der Ultraschalltechnik*. 2019.
- [3] KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG. Apr. 2019. URL: http://www.karldeutsch.de/KD_GENERAL_Tabelle_AcMatSpec_DE_M1.html.