

US 1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Tabea Hacheney
tabea.hacheney@tu-dortmund.de

Bastian Schuchardt
bastian.schuchardt@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.05.2022

Abgabe: 10.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Ausbreitung von Schallwellen	3
2.2	Erzeugung von Ultraschall	4
2.3	Ultraschallverfahren	4
2.4	Scan-Methoden	4
3	Durchführung	6
4	Auswertung	7
4.1	Vorbereitung	7
4.1.1	Vorbereitungsaufgaben	7
4.1.2	Kennenlernen und Einstellen des Programms	7
4.2	Ausmessen der verwendeten Acrylzyylinder	9
4.3	Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren	9
4.4	Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren	10
4.5	Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren	12
4.6	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	13
5	Diskussion	15
5.1	Wellenlänge und Frequenz einer 2 MHz Schwingung	15
5.2	Messungen der Schallgeschwindigkeit in Acryl	15
5.3	Messungen der Dämpfung in Acryl	15
	Literatur	16
6	Messwerte	17
6.1	Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren	17
6.2	Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren	17
6.3	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	17

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Funktionsweise der Ultraschalltechnik untersucht werden, da sie vor allem in der medizinischen und materialwissenschaftlichen Technik ihre Anwendung findet und deshalb für die Experimentalphysik von Relevanz ist.

2 Theorie

Den Frequenzbereich des Schalls lässt sich in vier Teilbereiche aufteilen. Einmal in den für das menschliche Ohr hörbare Bereich von ca. 16 Hz bis ca. 20 kHz, in den Teilbereich von ca. 20 kHz bis ca. 1 GHz, der auch Ultraschall genannt wird und in den Teilbereich ab 1 GHz, der auch Hyperschall genannt wird. Der Teilbereich unter dem hörbaren Bereich wird auch Infraschall genannt.

2.1 Ausbreitung von Schallwellen

Bei Schallwellen handelt es sich um longitudinale Wellen, die sich aufgrund von Druckschwankungen fortbewegt. Eine Schallwelle mit Ausbreitung in x-Richtung lässt sich mit

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

darstellen.

Dabei ist p_0 der Normaldruck, v_0 die Schallschnelle, und $Z = \rho c$ die Akustische Impedanz mit der Schallgeschwindigkeit c und der Dichte ρ des durchschallten Materials.

Die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten lässt sich in Abhängigkeit ihrer Kompressibilität κ und ihrer Dichte ρ durch

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

ausdrücken. Da in Festkörpern auch die transversalen Wellen aufgrund der Schubspannung mit berücksichtigt werden müssen, wird κ durch den Zusammenhang zum Elastizitätsmodul E ersetzt. Es ergibt sich

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

Im Normalfall geht immer ein Teil der Energie bei der Schallausbreitung durch Absorption verloren. Daraus bestimmt sich die Intensität zu

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

Dabei ist α der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude und I_0 die Intensität des ausgehenden Schallimpulses. Um den Absorptionskoeffizienten möglichst gering zu halten, wird aufgrund des hohen Absorptionskoeffizienten der Luft ein Kontaktmittel zwischen Schallgeber und Material verwendet.

Eine für den Versuch wichtige Eigenschaft von Schallwellen ist, dass diese reflektiert werden können. Der Reflexionskoeffizient ergibt sich in Abhängigkeit der akustischen Impedanzen Z_1 und Z_2 der Materialien durch

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

Für den Transmissionskoeffizienten ergibt sich

$$T = 1 - R.$$

2.2 Erzeugung von Ultraschall

Ultraschallwellen können durch den piezo-elektrischen Effekt erzeugt werden. Dazu wird ein piezo-elektrischer Kristall, z.B. Quarz, in ein elektrisches Wechselfeld gebracht. Der Kristall gerät dadurch in Schwingung und erzeugt Ultraschallwellen. Bei Resonanz werden große Ultraschallamplituden erreicht.

Umgekehrt kann bei angeregten Schwingungen ein elektrisches Wechselfeld gemessen werden, sodass die Quelle der Ultraschallwellen auch als Empfänger dienen kann.

2.3 Ultraschallverfahren

Es werden in der Ultraschalltechnik zwei Verfahren verwandt.

1. *Durchschallungsverfahren* - Beim Durchschallungsverfahren wird ein Sender und ein Empfänger verwendet. Dabei befindet sich die Probe zwischen dem Sender und dem Empfänger. Wenn der Sender nun einen Schallimpuls aussendet, bewegt sich dieser durch die Probe und verliert an Intensität. Weiterhin kann durch Störstellen die Intensität auch verringert werden bevor der Impuls zum Zeitpunkt t auf den Empfänger trifft.
2. *Impuls-Echo-Verfahren* - Beim Impuls-Echo-Verfahren wird der Sender gleichzeitig als Empfänger verwendet. Nach der Laufzeit t wird die Intensität des Schallimpulses gemessen. Aus der Schallgeschwindigkeit c und der Laufzeit t lässt sich der Abstand zur Störstelle in der Probe durch

$$s = \frac{ct}{2} \tag{2}$$

bestimmen.

2.4 Scan-Methoden

Um die Messungen mit den zwei Ultraschalltechniken auszuwerten, gibt es drei unterschiedliche Verfahren.

1. *A-Scan* - Dabei wird nur die Amplitude angezeigt, so dass auch Abschwächungen messbar sind.

2. *B-Scan* - Durch ein zweidimensionales Graubild lässt sich die Intensität der zurücklaufenden Welle bestimmen.
3. *TM-Scan* - Mit Hilfe einer hohen Wiederholungsfrequenz kann ein Video ähnliches Bild erzeugt werden.

3 Durchführung

Zur Messung wird eine 2 MHz-Sonde verwendet. Die Messwerte werden mit dem Programm EchoView dargestellt. Als Kontaktmittel wird bidestilliertes Wasser verwendet. Über ein Steuergerät lässt sich einstellen, ob das Durchschallungs- oder Impuls-Echo-Verfahren verwandt werden soll. Weiterhin lässt sich ein Verstärkungssignal hinzuschalten, dass die Sichtbarkeit von kleinen Amplituden gewährleistet.

Zu Beginn werden mit einer Schieblehre die Maße der zu vermessenden Acrylzyylinder bestimmt.

Danach wird mit dem Impuls-Echo-Verfahren die Laufzeit des Echos für fünf unterschiedliche Konfigurationen bestimmt. Um die Zylinder aufeinander zu stellen wird das Kontaktmittel verwendet. Gleiches wird mit dem Durchschallungsverfahren noch einmal gemessen und anschließend überprüft.

Weiterhin wird mit dem Impuls-Echo-Verfahren die Amplituden der eingehenden und reflektierten Welle für die fünf Zylinderkonfigurationen gemessen und daraus die Dämpfung bestimmt.

Abschließend wird mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens die Abmessungen eines Augenmodells bestimmt. Dazu wird mit leichtem Druck der Einfallswinkel so verändert, dass ein Echo an der Retina erkennbar wird.

In Abbildung 1 ist eine schematische Darstellung des Modellauges zu finden. Die Schallgeschwindigkeit der Linse ist mit $c_L = 2.500 \text{ m/s}$ und die der Glaskörperflüssigkeit mit $c_{GK} = 1.410 \text{ m/s}$ gegeben [4].

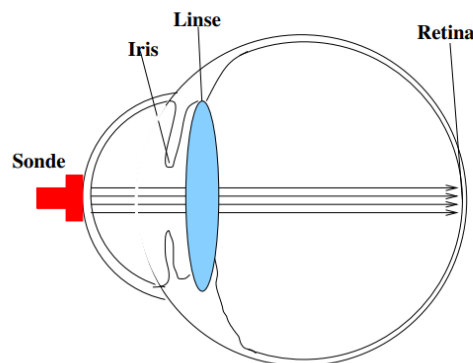


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Augenmodells.

4 Auswertung

4.1 Vorbereitung

4.1.1 Vorbereitungsaufgaben

Als Vorbereitung auf die Versuchsreihe, werden Literaturwerte zur Dichte und Schallgeschwindigkeit verschiedener Materialien recherchiert. Anschließend wird die Impedanz mithilfe von $Z = \rho \cdot c$ ausgerechnet.

Die Werte lassen sich in Tabelle 1 finden. Anschließend wird die Wellenlänge und die

Tabelle 1: Literaturwerte und akustische Impedanzen verschiedener Materialien.

Material	Schallgeschwindigkeit c / $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Dichte ρ / $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Akustische Impedanz Z / $\frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \cdot 10^6$
Luft	331 [1]	$1,300 \cdot 10^{-3}$ [1]	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Wasser	1492 [1]	0,9982 [1]	1,48
Blut	1530 [1]	1,03 [1]	1,56
Knochen	3600 [1]	1,7 [1]	6,12
Acryl	2730 [3]	1,189 [2]	3,25

Periode einer 2 MHz Schwingung in Acryl ausgerechnet.

$$\lambda = \frac{c}{f} = 1,365 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$T = \frac{1}{f} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

4.1.2 Kennenlernen und Einstellen des Programms

Mit der Schieblehre wird die Dicke einer gegebenen Acrylplatte gemessen. Diese beträgt $d = (9,95 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Anschließend wird ein A-Scan durchgeführt, welcher die Graphik in Abbildung 2 erzeugt.

In der Abbildung lassen sich fünf Schwingungen besonders gut erkennen. Von diesen Schwingungen wird die Laufzeit und Amplitude mittels importierter Daten aus dem Programm bestimmt und in Tabelle 2 aufgelistet. Aus den gemessenen Daten wird der

Tabelle 2: Laufzeiten und Amplituden der ersten fünf Schwingungen.

Schwingung	Laufzeit t / μs	Amplitude A / V
1	7,12	1,316
2	14,40	1,366
3	21,80	1,340
4	29,44	1,297
5	36,66	0,880

Mittelwert der Laufzeiten der einzelnen Impulsreflexionen (Zeitdifferenz zum vorherigen

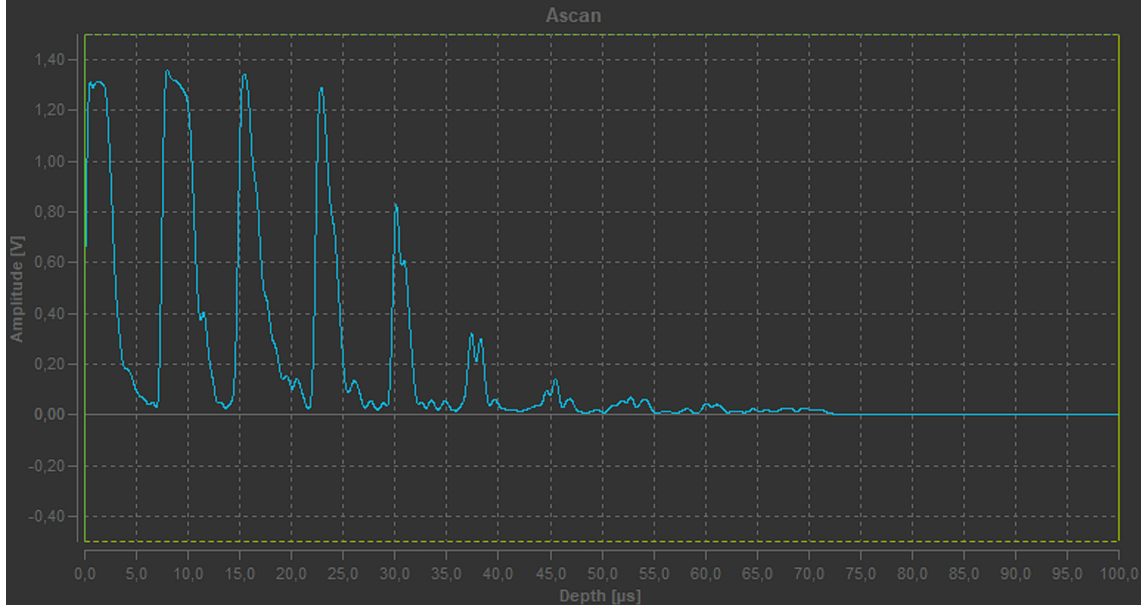


Abbildung 2: A-Scan der 1 cm dicken Acrylplatte.

Impuls) und anschließend die Schallgeschwindigkeit mittels Gleichung 2 bestimmt. Mittelwert der Laufzeit:

$$\begin{aligned}
 t &= (7,33 \pm 0,09) \mu\text{s} \\
 c &= \frac{2s}{t} \\
 &= (2714,87 \pm 13,64) \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Die Unsicherheit wurde mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt. Die Schallgeschwindigkeit in Acryl lautet somit $c_{\text{Acryl}} = (2714,87 \pm 13,64) \text{ m/s}$.

Nun wird zwischen den Anzeigemodi *AM*, *HF* und *AM + HF* gewechselt und Bilder der Modi aufgezeichnet. Die Bilder sind in Abbildung 3 gezeigt.

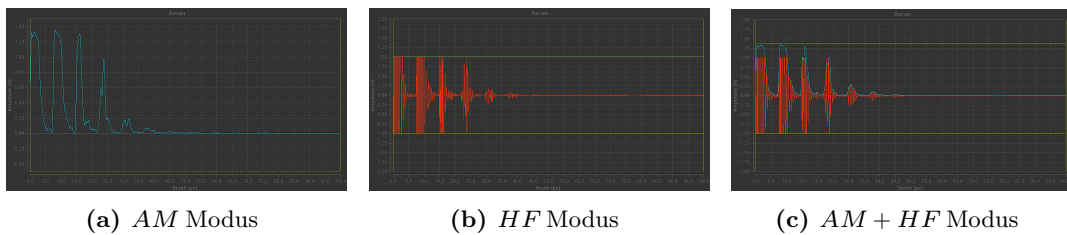


Abbildung 3: Alle drei verschiedenen Anzeigemodi

Es lässt sich erkennen, dass im *HF*-Modus jede einzelne Schwingung angezeigt wird, während im *AM*-Modus jeweils nur die positiven Amplituden jener Schwingungen angezeigt werden. Im *AM + HF*-Modus werden jene zwei Modi kombiniert ausgegeben.

Je nach Versuchsteil wird ein anderer Modus verwendet.

Als nächstes wird der $AM + HF$ -Modus eingeschaltet und bei einer 2 MHz Schwingung die Periode einer Schwingung ausgerechnet. Dafür wird über fünf Perioden hinweg gemittelt. Der verwendete Bereich ist mittels grünen Balken in Abbildung 4 eingezeichnet. Die fünf

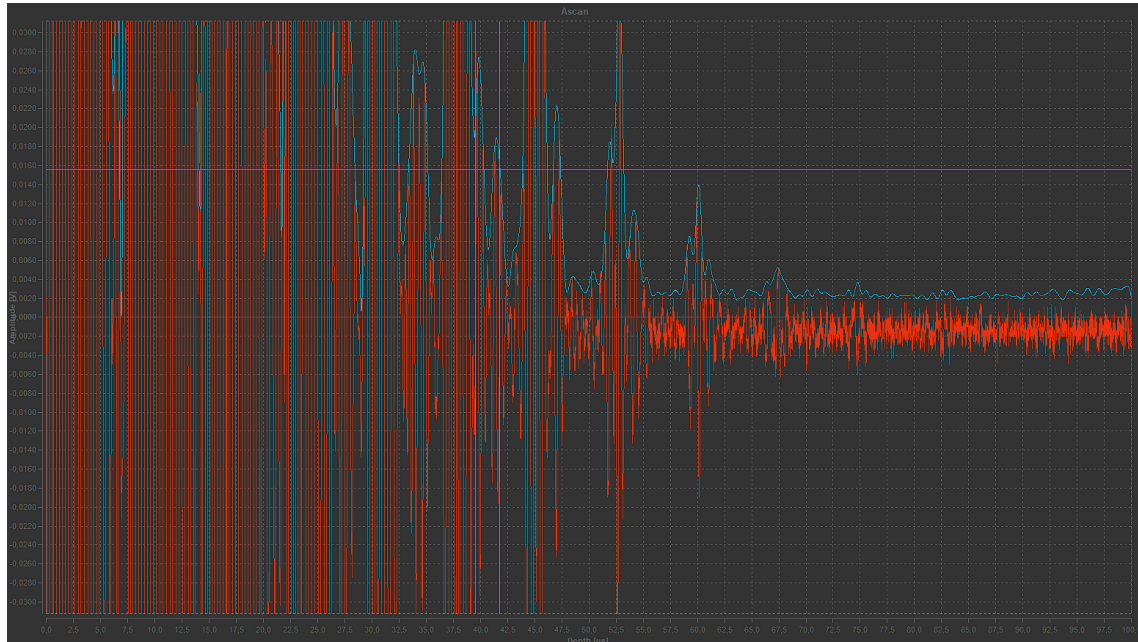


Abbildung 4: 2 MHz Schwingung im $AM + HF$ -Modus angezeigt.

Perioden zusammenaddiert haben eine Länge von $T_5 = 2,2 \mu\text{s}$. Dieser Messwert wird durch fünf geteilt, um die Länge einer Periode zu erhalten: $T_1 = \frac{2,2}{5} \mu\text{s} = 0,44 \mu\text{s}$. Daraus lässt sich nun die Wellenlänge und Frequenz der Schwingung in Acryl berechnen:

$$f = \frac{1}{T} = 2272727,27 \frac{1}{\text{s}} = 2,3 \text{ MHz}$$

$$\lambda = (1,19 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Mittels der Tiefenmessung des Programms wird für die Acrylplatte eine Dicke von 1 cm gemessen.

4.2 Ausmessen der verwendeten Acrylzyylinder

Insgesamt stehen vier verschiedene Größen von Acrylzyindern zur Verfügung. Diese werden alle mit einer Schieblehre ausgemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 3 eingetragen. Die Schieblehre hat eine Messungenauigkeit von 0,05 mm.

4.3 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

In dieser Versuchsreihe werden die vier Zylinder mittels Impuls-Echo-Verfahren beschallt. Zudem wird noch ein 10 cm großer Zylinder aus den einzelnen Zylindern gebaut und

Tabelle 3: Messwerte der vier verschiedenen Acrylzyylinder.

Zylindernummer	Höhe h / mm	Durchmesser d / mm
1	120,90	40,00
2	80,50	40,10
3	61,55	40,45
4	40,45	40,15

beschallt. Die Messwerte lassen sich in Tabelle 4 finden.

Tabelle 4: Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren aufgenommene Messwerte.

Höhe l / mm	Ausges. Imp. U_A / V	Startzeit t_0 / μs	Reflekt. Imp. U_R / V	Endzeit t_R / μs
40,45	1,318	1,260	1,250	30,26
61,55	1,318	1,280	0,619	46,04
80,50	1,319	1,240	0,304	59,50
102,00	1,318	1,260	0,068	75,34
120,90	1,319	1,260	1,193	88,56

U_A ist die Amplitude des ausgesendeten Impulses, t_0 der Zeitpunkt, wo die Amplitude des ausgesendeten Impulses gemessen wird, U_R die Amplitude des reflektierten Impulses und t_R der Zeitpunkt, wo die Amplitude des reflektierten Impulses gemessen wird. Mittels dieser Messwerte wird eine lineare Ausgleichsrechnung mit Python durchgeführt. Die Theoriekurve ergibt sich aus Gleichung 2 und einer Anpassungsschicht d für die Sonde. Die Geradengleichung lautet also

$$2l = c \cdot t + d.$$

l ist die jeweilige Länge des Zylinders und $t = t_R - t_0$ die Laufzeit der Schwingung.

Mittels Python ergibt sich dann die Steigung und der y-Achsenabschnitt der Geraden. Die Steigung entspricht der Schallgeschwindigkeit in Acryl c_{Acryl} und der y-Achsenabschnitt entspricht der Anpassungsschicht d .

$$\begin{aligned} c_{\text{Acryl}} &= (2,75895 \pm 0,01631) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} &= (2758,95 \pm 16,31) \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ d &= (0,26 \pm 1,02) \text{ mm} &= (0,26 \pm 1,02) \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Die Messwerte und Ausgleichsfunktion sind in Abbildung 5 dargestellt.

4.4 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren

Für diese Versuchsreihe werden alle 4 Zylindergrößen horizontal platziert und mittels zwei Sonden durchschallt.

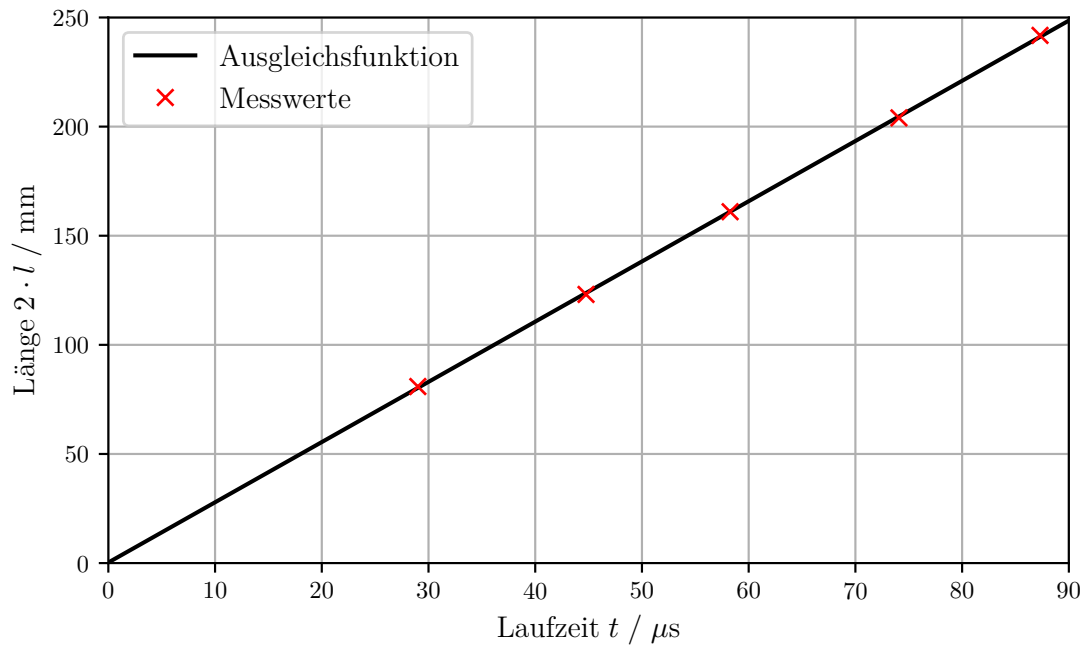


Abbildung 5: doppelte Zylinderhöhe l geplottet gegen die Laufzeit t beim Impuls-Echo-Verfahren.

Mit diesem Verfahren ergibt sich für die Strecke die Gleichung

$$l = c \cdot t + d,$$

da der Weg bis zur Singnalempfangung nur einmal zurückgelegt wird.

Mittels A-Scan wird die Laufzeit des Impulses gemessen und in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren aufgenommene Messwerte.

Höhe l / mm	Startzeit $t_0 / \mu s$	Endzeit $t_R / \mu s$
40	0,2	15,48
60	0,2	23,78
80	0,2	30,22
120	0,2	44,76

Es wird mit der obigen Gleichung eine Ausgleichsrechnung in Python durchgeführt. Mit Python wird nun erneut Steigung und y-Achsenabschnitt bestimmt. Die Steigung entspricht erneut der Schallgeschwindigkeit in Acryl c_{Acryl} und der y-Achsenabschnitt der

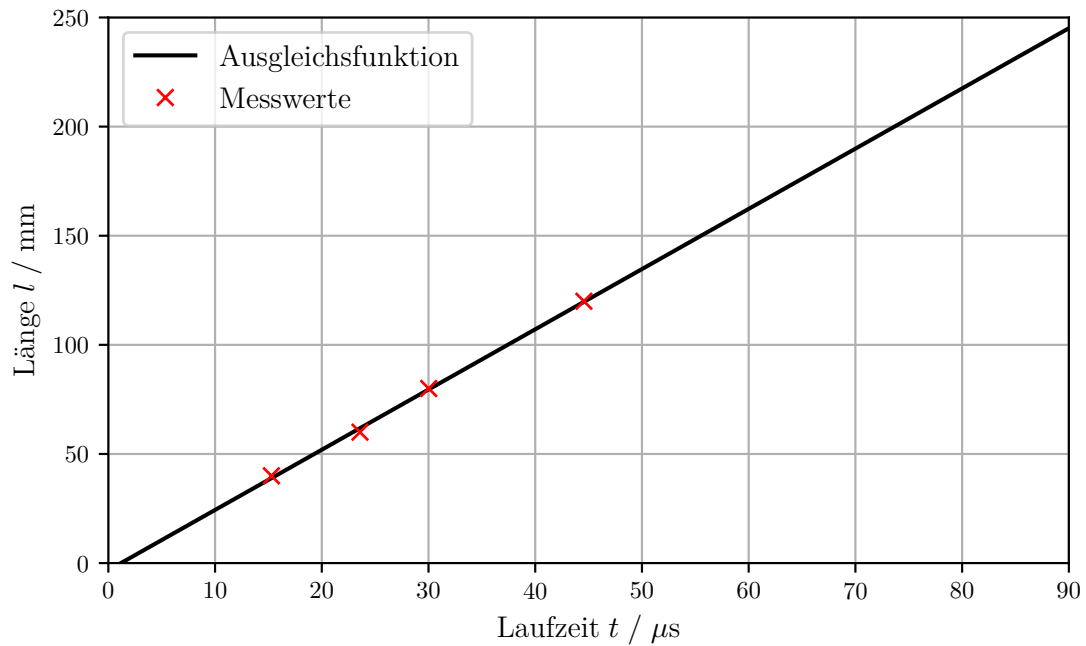


Abbildung 6: Zylinderhöhe l geplottet gegen die Laufzeit t beim Durchschallungs-Verfahren.

Anpassungsschicht d .

$$c_{\text{Acryl}} = (2,75913 \pm 0,07181) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} = (2759,13 \pm 71,81) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d = (-3,25 \pm 2,18) \text{ mm} = (-3,25 \pm 2,18) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Die Messwerte und Ausgleichsfunktion sind in Abbildung 6 dargestellt.

4.5 Bestimmung der Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Für die Bestimmung der Dämpfung der Ultraschallwellen in Acrylglas, werden die Messwerte aus Tabelle 4 verwendet.

Zwischen Dämpfung und Amplituden besteht der Zusammenhang aus Gleichung 1. Diese Gleichung wird zu

$$\log \frac{U}{U_0} = -\alpha \cdot 2 \cdot l$$

umgestellt, damit eine Ausgleichsrechnung mittels Python durchgeführt werden kann. Der letzte Messwert der Amplituden wird ignoriert, da dieser stark von den anderen abweicht und auf einen Messfehler hindeutet.

Mittels Python wird die Steigung, die Dämpfung, bestimmt und anschließend in Abbildung 7 geplottet. Die Dämpfung beträgt somit $\alpha = (23,2 \pm 3,2) \text{ 1/m}$.

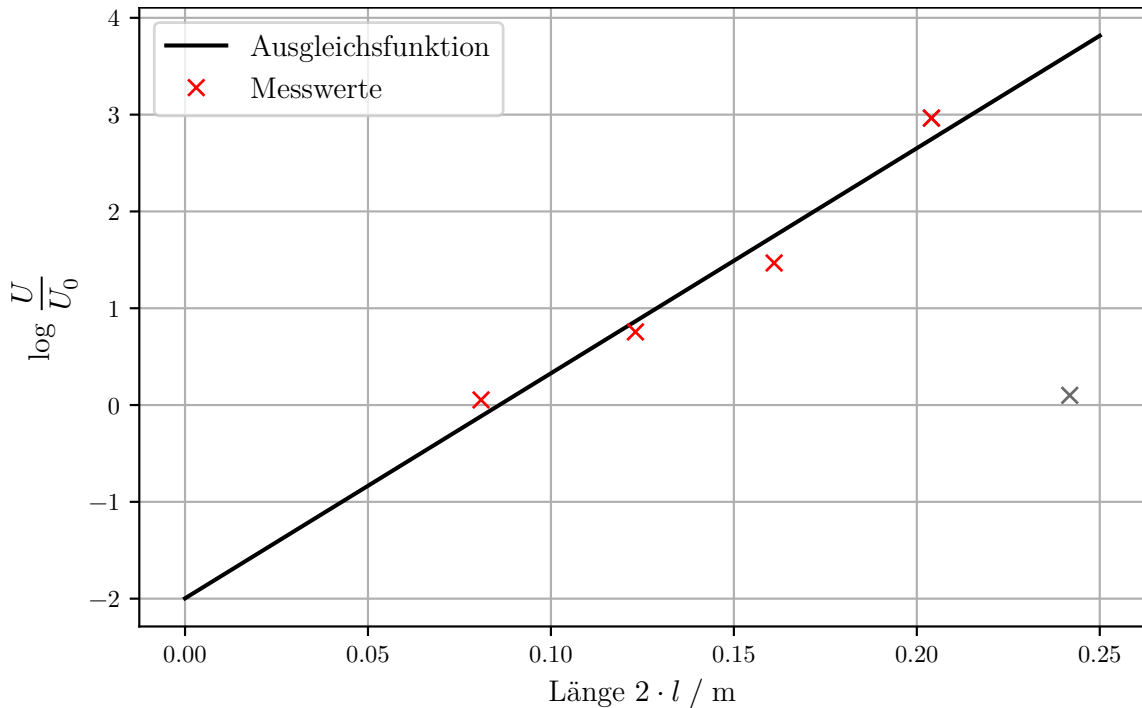


Abbildung 7: Halblogarithmische Darstellung der Amplitudenverhältnisse gegen die zurückgelegte Strecke innerhalb der Acrylzylinder.

4.6 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

In dieser Versuchsreihe wird ein Augenmodell mittels Impuls-Echo-Verfahren durchschallt. Im Programm zur Visualisierung des Schalls lassen sich vier deutliche Haupt-Peaks erkennen. Diese sind der Iris, Ein- und Austreten der Linse und der Retina zuzuordnen. Bei der Auswertung muss darauf geachtet werden, dass in dem Glaskörper, der Augenkammer und der Linse jeweils unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten herrschen. Das Kammerwasser der Augenkammer kann mit Wasser angenähert werden $c_{\text{Wasser}} = 1492 \text{ m/s}$ [1]. Die Schallgeschwindigkeit in der Linse beträgt $c_L = 2500 \text{ m/s}$ und in der Glaskörperflüssigkeit $c_{\text{GK}} = 1410 \text{ m/s}$ [4], wie bereits in der Durchführung erwähnt. Die Messwerte sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Beim Untersuchen des Augenmodells aufgenommene Daten.

Peak	Laufzeit t / μs	Amplitude U / V
1	10,38	0,7614
2	15,74	0,7179
3	22,50	0,1633
4	72,04	0,1088

Mittels der Gleichung 2 und Python werden nachfolgende Distanzen bestimmt.

Hornhaut zu Iris = 0,77 cm
Iris zu Anfang Linse = 0,39 cm
Dicke Linse = 1,65 cm
Ende Linse bis Retina = 2,27 cm

5 Diskussion

5.1 Wellenlänge und Frequenz einer 2 MHz Schwingung

Es wurde eine 2 MHz Schwingung in der Geräteeinstellung der Sonde eingestellt und mittels des Visualisierungsprogramms die Länge einer Periode vermessen und damit die Wellenlänge und Frequenz der Schwingung bestimmt.

Dieses Verfahren führte zu einer Frequenz von $f = 2272727,27 \text{ Hz}$ und einer Wellenlänge von $\lambda = (1,19 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Zuvor wurde mittels Literaturwerte durch dieselben Gleichungen ebenfalls die Frequenz und Wellenlänge einer 2 MHz Schwingung ausgerechnet. Dies ergab eine Frequenz von $f_{\text{lit}} = 2000000,00 \text{ Hz}$ und eine Wellenlänge von $\lambda_{\text{lit}} = 1,365 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Wenn man nun Literaturwert und Messergebnis der Wellenlänge vergleicht, erhält man eine Abweichung von 14,71 %.

Die Messung der fünf Perioden im Programm wurde visuell nach Augenmaß durchgeführt und erzeugt somit eine unbekannte Messungenauigkeit. Daher ist eine Abweichung von 14,71 % in einem akzeptablen Bereich und verifiziert die Messmethode.

5.2 Messungen der Schallgeschwindigkeit in Acryl

Um die Schallgeschwindigkeit in Acryl zu messen, wurden drei Versuchsreihen durchgeführt.

Zweimal wurde das Echo-Impuls-Verfahren benutzt, einmal bei einem Acrylblock und einmal bei mehreren Acrylzylindern. Die Acrylzylinder wurden dann erneut für die Durchschallungs-Messmethode verwendet.

Der Acrylblock ergab eine Geschwindigkeit von $c_{\text{Block}} = (2714,87 \pm 13,64) \text{ m/s}$, die Acrylzylinder mit Echo-Impuls-Verfahren $c_{\text{Zyl-EcIm}} = (2758,95 \pm 16,31) \text{ m/s}$ und die Acrylzylinder mit Durchschallungs-Verfahren $c_{\text{Zyl-Durch}} = (2759,13 \pm 71,81) \text{ m/s}$. Die drei Messergebnisse haben insgesamt eine mittlere Abweichung von 1,09 %.

Da diese Abweichung sehr gering ist, lässt sich die Theorie durch die Versuchsreihe bestätigen.

5.3 Messungen der Dämpfung in Acryl

Die Messergebnisse liefern eine Dämpfung von $\alpha = (23,2 \pm 3,2) 1/\text{m}$. In diesem Ergebnis ist ein Messergebnis nicht mit einbezogen worden, da dieses starke Abweichungen von den anderen aufzeigte. Hätte man das Messergebnis mit einbezogen, wäre die Messungenauigkeit sehr hoch gewesen. Wahrscheinlich sogar höher als das α selbst.

Dieser fehlerhafte Messwert lässt sich entweder durch Beschädigungen im Acrylglas oder durch einen systematischen Fehler bei der Messung selbst, durch falsches Messen erklären. Eine Bestätigung der Dämpfung würde eine neue Messreihe ohne fehlerhafte Werte erfordern, kann jedoch im Rahmen des Anfängerpraktikums als akzeptabel angenommen

werden.

Literatur

- [1] Medizinphysik TU Dortmund. *verschiedene Dichten*. URL: https://qnap.e3.physik.tu-dortmund.de/suter/Vorlesung/MedizinphysikII_15/14_Ultraschall.pdf. (besucht am 06.05.2022).
- [2] imeter.de. *Dichte Acryl*. URL: https://www.imeter.de/images/ART/M9/imeter_Dichtemessung_PMMA_Ausdehnung.pdf. (besucht am 06.05.2022).
- [3] Olympus. *Schallgeschwindigkeit Acryl*. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/>. (besucht am 06.05.2022).
- [4] *US 1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2014.

6 Messwerte

6.1 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Impuls-Echo-Verfahren



Abbildung 8: A-Scan des 4 cm hohen Zylinders mittels Echo-Impuls.

6.2 Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit Durchschallungs-Verfahren

6.3 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

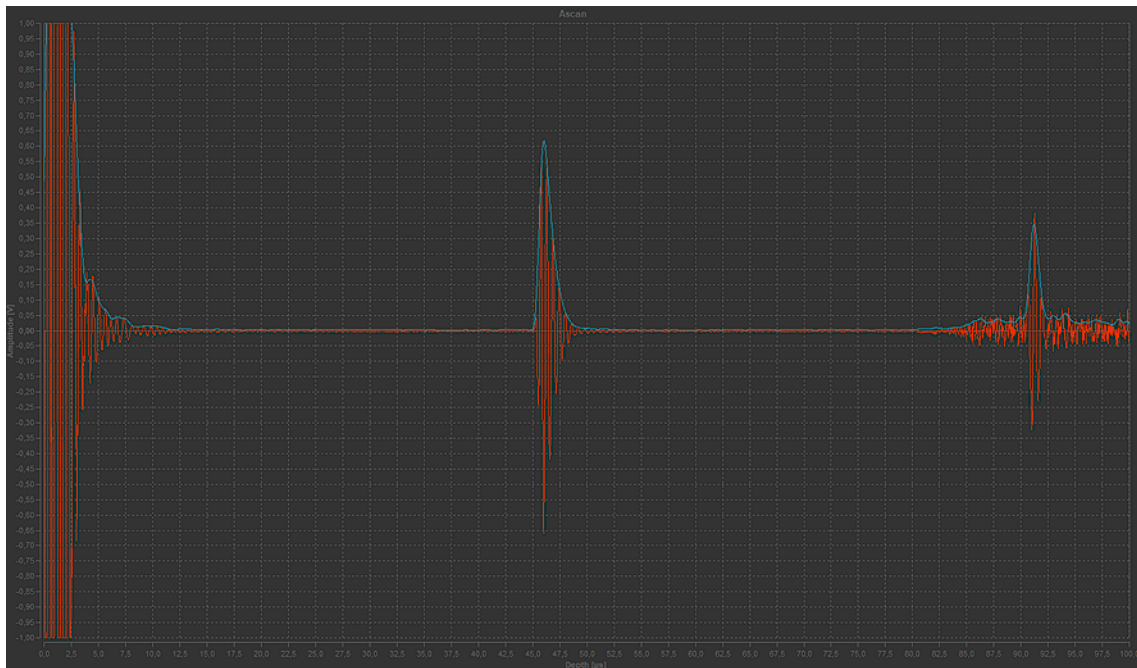


Abbildung 9: A-Scan des 6 cm hohen Zylinders mittels Echo-Impuls.



Abbildung 10: A-Scan des 8 cm hohen Zylinders mittels Echo-Impuls.



Abbildung 11: A-Scan des zusammengesetzten 10 cm hohen Zylinders mittels Echo-Impuls.

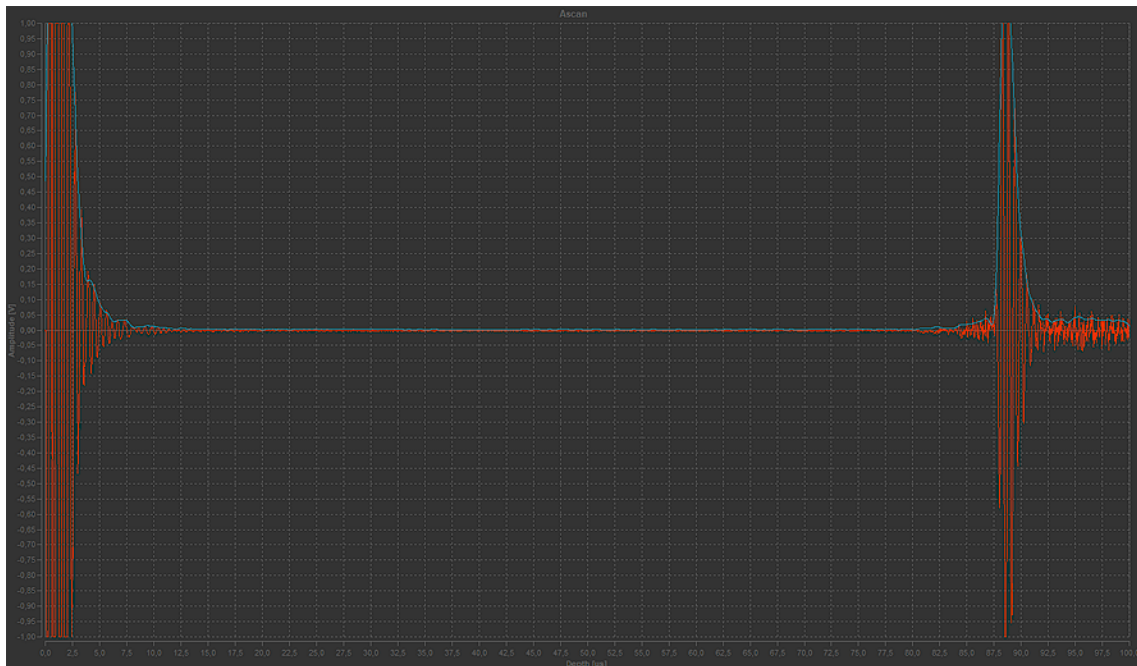


Abbildung 12: A-Scan des 12 cm hohen Zylinders mittels Echo-Impuls.

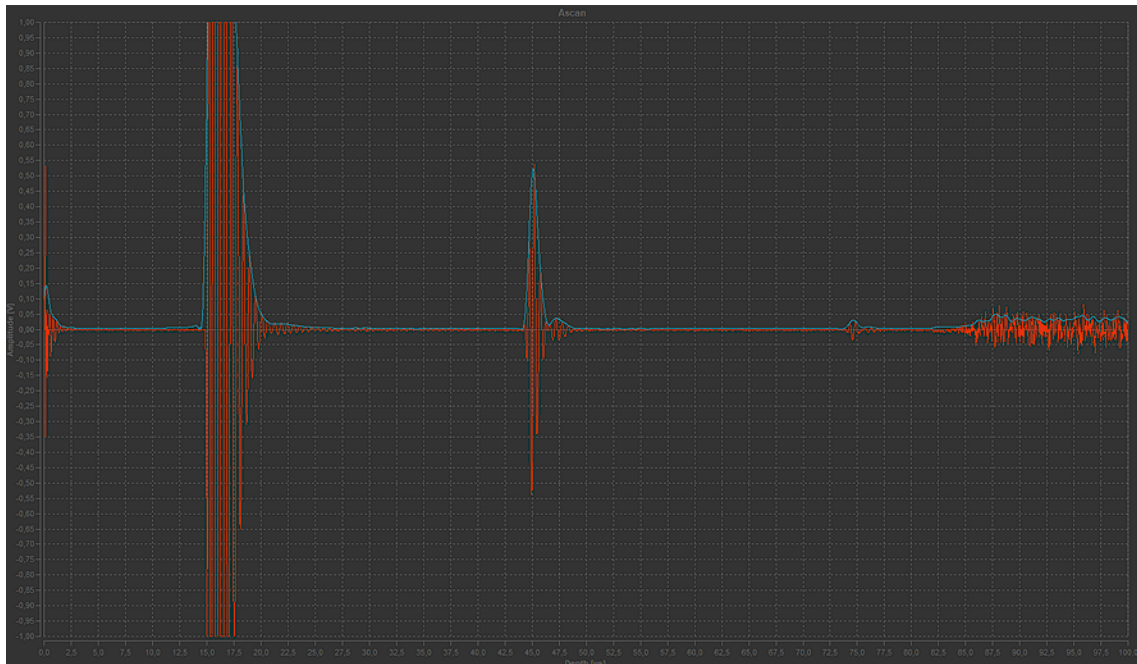


Abbildung 13: A-Scan des 4 cm hohen Zylinders mittels Durchschallung.



Abbildung 14: A-Scan des 6 cm hohen Zylinders mittels Durchschallung.



Abbildung 15: A-Scan des 8 cm hohen Zylinders mittels Durchschallung.

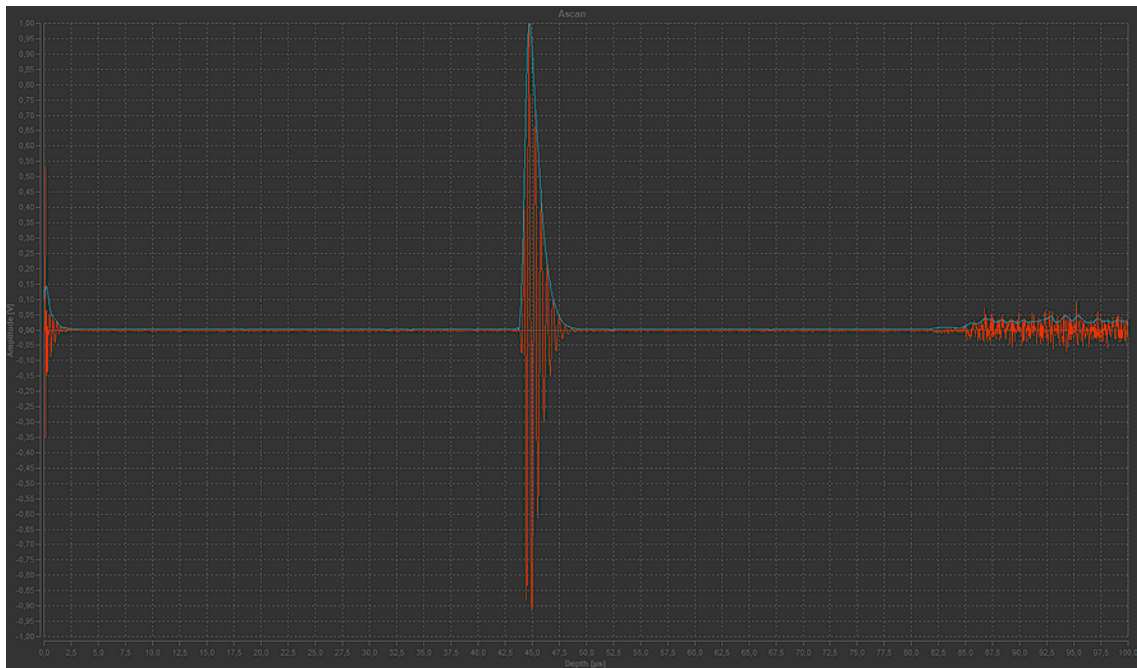


Abbildung 16: A-Scan des 12 cm hohen Zylinders mittels Durchschallung.

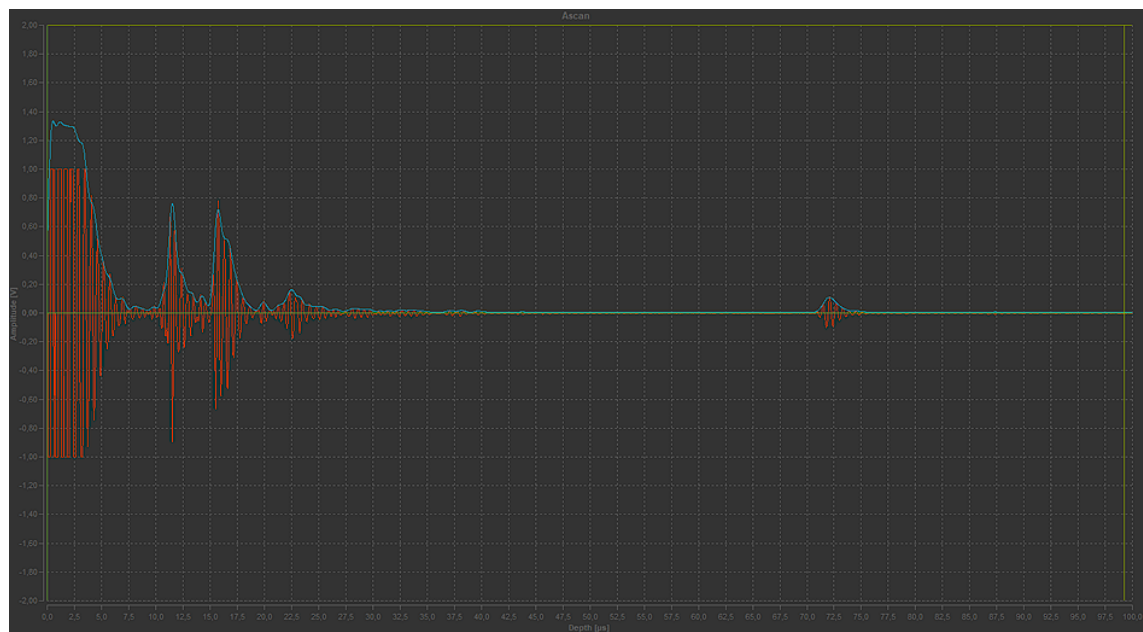


Abbildung 17: A-Scan des Augenmodells mittels Echo-Impuls.