

V901

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Katharina Popp
katharina.popp@tu-dortmund.de

Nicolai Weitkemper
nicolai.weitkemper@tu-dortmund.de

Durchführung: 18.05.2021

Abgabe: 25.05.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Absorption von Ultraschallwellen	4
2.2 Erzeugung von Ultraschallwellen	4
2.3 Messung mit Ultraschallwellen	4
3 Vorbereitung	6
4 Durchführung	7
4.1 Messung eines Acrylblocks mit Fehlstellen	7
4.2 Messung der Abstände in einem Augenmodell	8
5 Auswertung	9
5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl	10
5.2 Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Acryl	12
5.3 Untersuchung eines Augenmodells	13
6 Diskussion	15
6.1 Abweichungen	15
6.2 Mögliche Fehlerquellen	16
Literatur	17

1 Zielsetzung

Dieser Versuch dient dazu, sich mit den Grundlagen der Ultraschalltechnik vertraut zu machen. Zu diesem Zweck werden zwei verschiedene Proben untersucht.

2 Theorie

In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen der Ultraschalltechnik erläutert.

Für die Ultraschalltechnik werden Frequenzen in einem Bereich von 20 kHz bis 1 GHz verwendet, wobei dieser Bereich oberhalb des hörbaren Frequenzspektrums von 16 Hz bis 20 kHz liegt. Ultraschallwellen können, im Gegensatz zu Schallwellen aus dem hörbaren Spektrum, Gewebe durchdringen und werden deshalb in der Medizin oft verwendet. Die Schallwellen sind longitudinale Wellen, die sich aufgrund von Druckschwankungen in der Luft nach der Gleichung

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

ausbreiten. Ihre Phasengeschwindigkeit ist im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen materialabhängig. Die Größe $Z = c \cdot \rho$ bezeichnet die akustische Impedanz, welche abhängig von der Schallgeschwindigkeit c im Medium und der Dichte ρ des Mediums ist.

Die Ausbreitung der Schallwelle verhält sich ebenfalls abhängig vom Medium. Es wird zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern unterschieden.

Die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten kann mit

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

beschrieben werden, wobei κ die Kompressibilität darstellt. In Flüssigkeiten und Gasen ist die Schallwelle ausschließlich longitudinal.

Schallgeschwindigkeit in Festkörpern kann mit

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

beschrieben werden, wobei der Elastizitätsmodul E gerade κ^{-1} ist. In Festkörpern ist die Schallgeschwindigkeit richtungsabhängig und kann sich aufgrund von Schubspannungen nicht nur longitudinal, sondern auch transversal ausbreiten.

2.1 Absorption von Ultraschallwellen

Wenn sich die Schallwelle im Medium ausbreitet, findet Absorption statt, was dazu führt, dass ein Teil ihrer Energie verloren geht. Die Intensität mit dem Absorptionskoeffizienten α

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

nimmt exponentiell mit der Strecke x ab. Zur Reduzierung der Absorptions in Luft wird ein Kontaktmittel zwischen Schallgeber und Material genutzt. Beim Auftreffen einer Schallwelle auf die Grenzfläche wird ein Teil der Welle reflektiert und ein Teil wird transmittiert. Für den Reflexionskoeffizienten R ergibt sich

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

wobei sich das Verhältnis von einfallendem und reflektiertem Anteil durch die akustischen Impedanzen darstellen lässt. Für den Transmissionskoeffizienten gilt

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

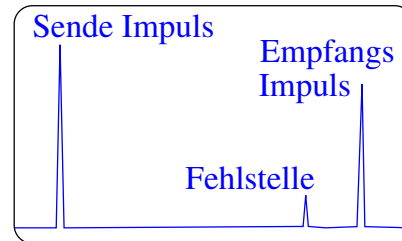
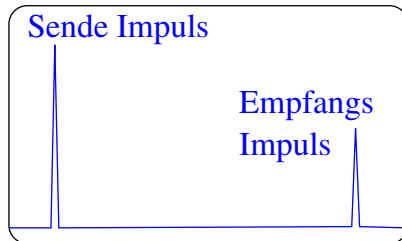
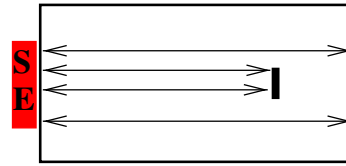
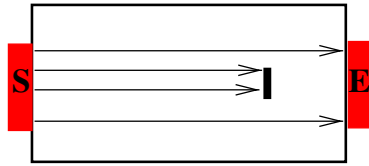
2.2 Erzeugung von Ultraschallwellen

Die hier verwendete Methode zur Erzeugung von Ultraschallwellen ist der reziproke piezoelektrische Effekt. Dazu wird ein Piezokristall in ein elektrisches Wechselfeld gebracht, welches den Kristall zu Schwingungen anregt und Ultraschallwellen erzeugt, für den Fall, dass das elektrische Feld in eine der Polarrichtungen des Kristalls zeigt. Werden Resonanzfrequenzen getroffen, können besonders große Schwingungsamplituden entstehen, sodass mit großen Schallenergiedichten gearbeitet werden kann.

Wenn der Piezokristall durch Schallwellen zum Schwingen angeregt wird, kann er auch als Empfänger dienen, indem aus einlaufenden Schwingungen eine elektrische Spannung erzeugt wird.

2.3 Messung mit Ultraschallwellen

Ein Messverfahren der Ultraschalltechnik ist – wie im Folgenden erläutert – die Laufzeitmessung: Es wird ein kurzzeitiger Schallimpuls ausgesendet, dessen Laufzeit gemessen wird, wenn er auf einen Empfänger trifft.



(a) Das Durchschallungs-Verfahren zur Messung mit Ultraschallwellen. [2] (b) Das Impuls-Echo-Verfahren zur Messung mit Ultraschallwellen. [2]

Die Abbildungen 1a und 1b zeigen zwei verschiedene Möglichkeiten, mithilfe von Ultraschalltechnik zu messen.

Das Durchschallungs-Verfahren misst einen kurzzeitigen Schallimpuls, welcher an einem Sender erzeugt wird und durch eine Probe fliegt. Es wird die gemessene Intensität des Impulses untersucht, welche genau dann absinkt, wenn die Schallwelle eine Fehlstelle passiert, wobei die genaue Position der Fehlstelle (in Schallrichtung) mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden kann.

Das Impuls-Echo-Verfahren misst einen Schallimpuls, welcher an einer Grenzfläche reflektiert wird, sodass der Sender gleichzeitig auch als Empfänger dient. Bei diesem Verfahren kann die Position der Fehlstelle in der Probe mithilfe der Gleichung

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

bestimmt werden, wobei c die Schallgeschwindigkeit und t die Laufzeit des Schallimpulses darstellt. Der Faktor $1/2$ kommt dadurch zustande, dass der Schall aufgrund der Reflexion die Strecke s zweimal zurücklegt, bevor er wieder an der Sonde registriert wird. In sogenannten A/B-Scans oder TM-Scans können die gemessenen Laufzeiten verschieden visualisiert werden.

3 Vorbereitung

Als Vorbereitung für diesen Versuch sollten die Schallgeschwindigkeiten und die akustischen Impedanzen für Luft, destilliertes Wasser, Blut, Knochen und Acryl recherchiert werden.

Er ergaben sich die folgenden Werte.

Tabelle 1: Literaturwerte für Schallgeschwindigkeit und akustische Impedanz verschiedener Materialien.

Medium	Schallgeschwindigkeit [m/s]	akustische Impedanz [$10^6 \cdot \text{N s/m}^3$]
Luft	331 [1]	0,000 43[1]
dest. Wasser	1492 [1]	1,49[1]
Blut	1570 [1]	1,6[1]
Knochen	3000 - 3600[1]	2,2 - 6,12[1]
Acryl	2730	—

4 Durchführung

In diesem Versuch werden Fehlstellen in einem Plexiglasquader lokalisiert und die Abstände in einem Augemodell gemessen.

Für die Messung stehen ein Ultraschallechoskop, eine Ultraschallsonde mit einer Frequenz von 2 MHz und ein Computer mit einem Messprogramm zur Verfügung. Das Programm verfügt über die Einstellung der Laufzeit- und Tiefenmessung, wobei in diesem Versuch die Laufzeiten der Schallimpulse und die zugehörigen Spannungsamplituden gemessen werden. Mit einem Cursor können die Peaks der Spannung, welche bei Fehlstellen in der Probe entstehen, genau gemessen werden, wobei hier das Impuls-Echo-Verfahren verwendet wird, welches in Abbildung 1b in Abschnitt 2 dargestellt ist. Es wird ein A-Scan durchgeführt. Als Kontaktmittel dienen bidestilliertes Wasser oder Ultraschallgel, welche vor der Messung auf die Probe gegeben werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die empfindliche Sonde nicht zu stark auf die Probe gedrückt wird.

4.1 Messung eines Acrylblocks mit Fehlstellen

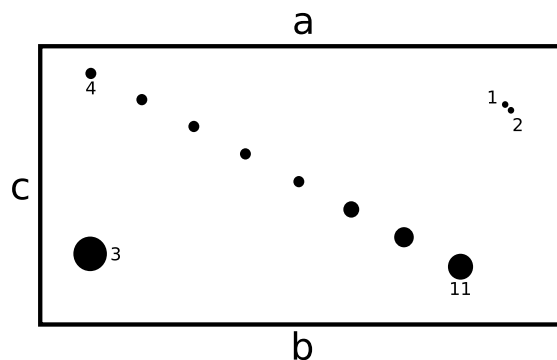


Abbildung 2: Schematische Draufsicht auf den vermessenen Acrylblock.

Zu Beginn wird der Acrylblock mithilfe einer Schieblehre ausgemessen, um später Vergleichswerte zur Ultraschallmessung zu haben. Es werden die Seitenlängen, sowie die Abstände der Fehlstellen in dem Block von den Seiten gemessen.

Anschließend wird destilliertes Wasser als Kontaktmittel auf eine Längs-Seite der Probe gegeben. Mit der Ultraschallsonde werden dann die Fehlstellen abgetastet, wobei die Laufzeit der Schallimpulse und die zugehörige Spannungsamplitude im Messprogramm abgelesen und notiert werden. Aus der Schallgeschwindigkeit von $c = 2730 \text{ m/s}$ in Acryl können die Positionen der Fehlstellen mithilfe der Gleichung 7 berechnet werden.

Dann wird die Messung für die gegenüberliegende Seite des Acrylblocks wiederholt. Durch die zusätzlichen Werte können die Messabweichungen verringert werden. Außerdem verdeckt beispielsweise bei der Messung auf Seite **b** Fehlstelle **3** die Fehlstelle **4**.

4.2 Messung der Abstände in einem Augenmodell

Für diesen Versuch steht ein Modell eines Auges zur Verfügung, welches in der folgenden Abbildung 3 vereinfacht dargestellt ist.

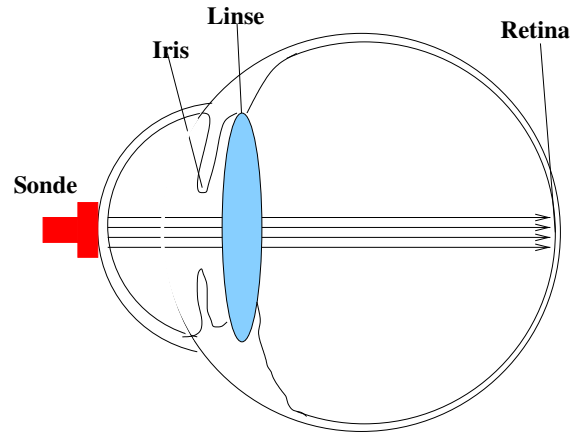


Abbildung 3: Der schematische Aufbau des Auges. [2]

Für die Messung mit der Ultraschallsonde wird Ultraschallgel verwendet, damit die Sonde leichter auf der Oberfläche des Auges bewegt werden kann. Es werden drei Peaks gemessen, die jeweils von der Iris, der Linse und der Retina verursacht werden, und die entsprechenden Laufzeiten und Amplituden der Schallimpulse notiert.

Nach Abschluss der Messungen müssen die Ultraschallsonde und die Proben mithilfe von weichen Tüchern und Wasser vorsichtig gereinigt werden.

5 Auswertung

Zunächst wurde der Acrylblock mit einer Schieblehre vermessen, um später Kontrollwerte zu haben. Breite und Höhe lauten

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$h = 80 \text{ mm} .$$

Der Abstand von der **c**-Seite wird vor allem bestimmt, um den Block später besser visualisieren zu können. Die Tiefe beträgt 40 mm, wird aber für die folgenden Rechnungen ebenfalls nicht benötigt.

Die Messwerte finden sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Mit der Schieblehre aufgenommene Abstandsmessungen.

Nr.	von a -Seite	von b -Seite	von c -Seite
1	17,7	61,2	133,0
2	19,5	60,2	134,6
3	55,3	15,1	10,0
4	6,9	70,9	13,4
5	15,0	62,9	28,5
6	23,0	55,0	43,7
7	31,0	46,8	58,7
8	38,0	38,7	73,6
9	46,4	30,5	88,0
10	54,0	22,0	102,5
11	61,5	13,3	117,4

In Tabelle 3 sind die mit der Ultraschallsonde aufgenommenen Messwerte angegeben, welche in den folgenden Abschnitten ausgewertet werden. Die zwei fehlenden Einträge kommen dadurch zustande, dass **4** von **3** von **b** aus betrachtet vollständig verdeckt wird.

Tabelle 3: Mit der Ultraschallsonde aufgenommene Messwerte.

Nr.	Laufzeit Δt [μs]		Amplitude U_A [V]	
	von a -Seite	von b -Seite	von a -Seite	von b -Seite
1	14,0	45,5	0,261	0,067
2	15,2	44,2	0,218	0,067
3	41,3	12,2	0,115	0,591
4	6,0	-	0,496	-
5	11,7	46,5	0,437	0,078
6	17,6	40,8	0,291	0,123
7	23,3	35,1	0,207	0,165
8	29,2	29,0	0,193	0,171
9	34,6	22,9	0,193	0,275
10	40,0	16,7	0,129	0,395
11	45,5	10,7	0,115	0,669

5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl

Die Geschwindigkeit c einer Schallwelle in Acryl kann mit den vorliegenden Messinstrumenten leicht aus dem in Gleichung 7 beschriebenen Zusammenhang von Weg d und Zeit Δt bestimmt werden.

Aus den in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgelisteten Werten für Abstand und Zeit wird die Schallgeschwindigkeit in Acryl mittels linearer Regression somit zu $(2763,38 \pm 10,46) \text{ m/s}$ bestimmt. Messwerte und Regressiongerade sind in Abbildung 4 dargestellt.

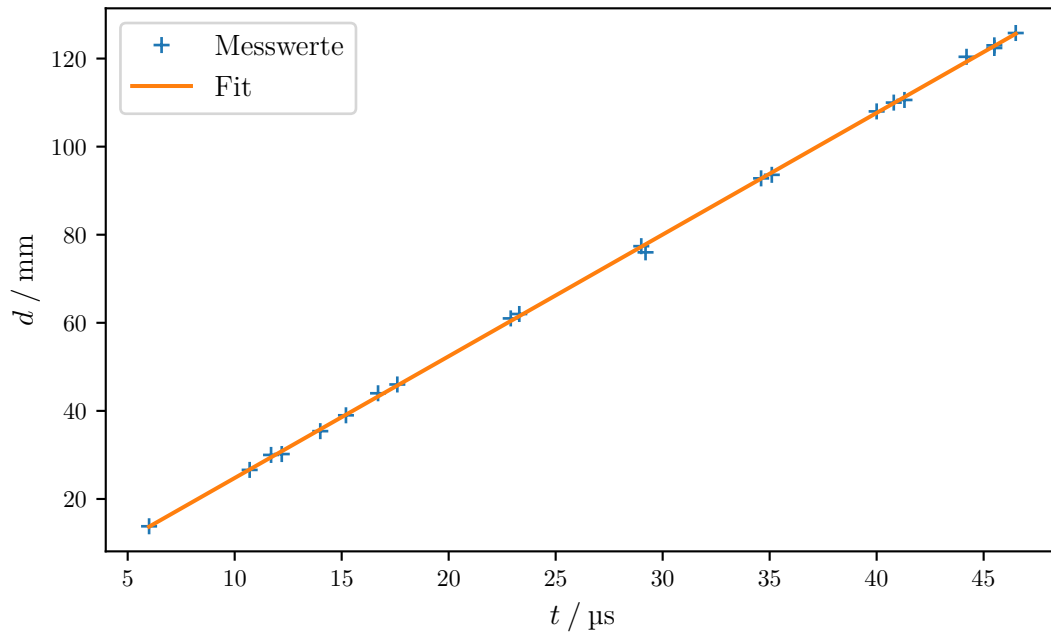


Abbildung 4: Zurückgelegte Strecke, aufgetragen gegen die Zeit zum Echo.

Zur besseren Anschauung wurden in Abbildung 5 außerdem die Abstandsmessungen mit Schieblehre und Ultraschall (mittels der Schallgeschwindigkeit) in eine schematische Darstellung des Acrylblocks eingezeichnet. Dabei wurden die Löcher (schwarz) anhand der jeweils drei Messungen mit der Schieblehre (grün) gezeichnet.

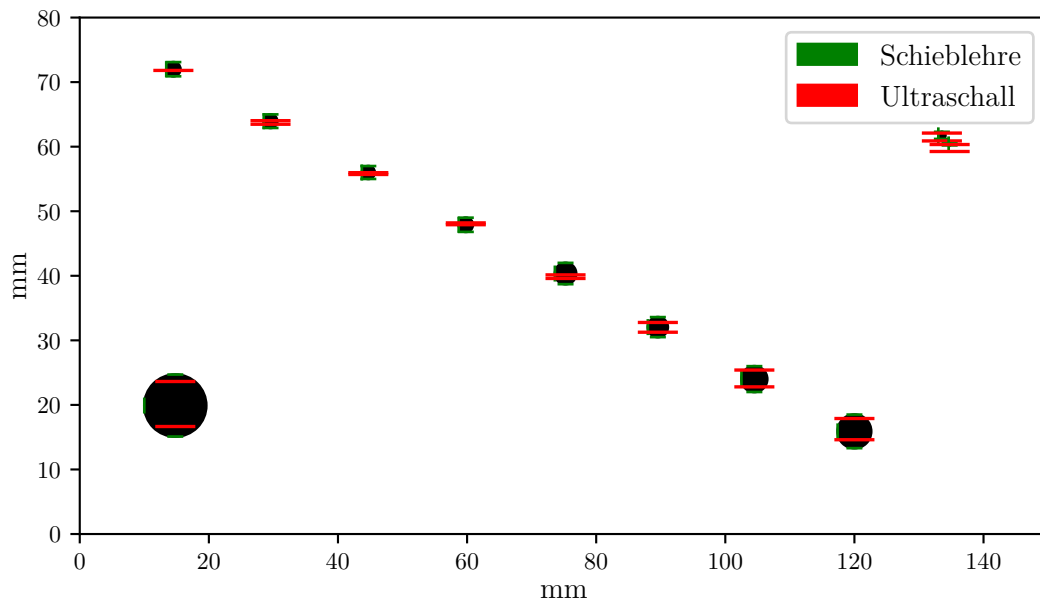


Abbildung 5: Darstellung aller gemessenen Distanzen.

5.2 Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Acryl

Aus Gleichung 4 ist bekannt, dass die Intensität des Ultraschalls exponentiell mit der Eindringtiefe und einem Parameter α abfällt. Daher kann mittels Logarithmieren und linearer Regression α schnell zu

$$\alpha = (17,6 \pm 2,7) \frac{1}{\text{m}}$$

bestimmt werden. Hierbei kommen die mit der Schieblehre gemessenen Distanzen und die mit der Ultraschallsonde gemessenen Echo-Zeiten zum Einsatz. Ein Plot von Messwerten und Regressiongerade ist in Abbildung 6 zu sehen.

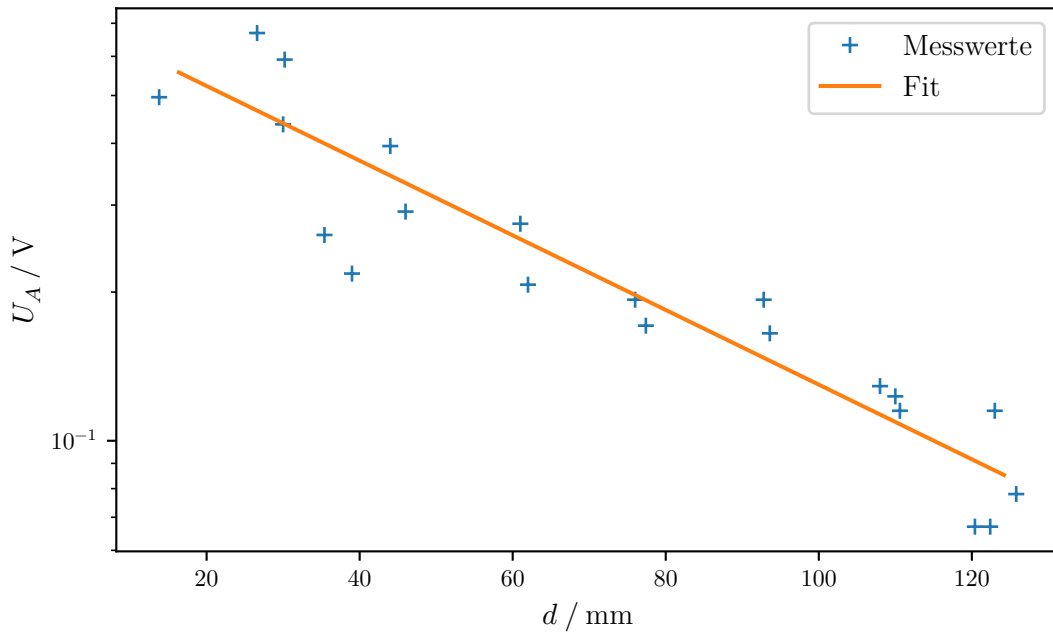


Abbildung 6: Intensität des Echos ausgedrückt durch die Spannung, logarithmisch aufgetragen gegen den Abstand der Fehlstelle.

5.3 Untersuchung eines Augenmodells

Mit dem schon zuvor verwendeten Impuls-Echo-Verfahren wird schließlich ein Augenmodell untersucht. Es wurden die Echo-Zeiten für die erkennbaren Peaks im Zeit-Spektrum festgehalten. Aus diesen und den bekannten Schallgeschwindigkeiten für Linse

$$c_L = 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

und Glaskörperflüssigkeit

$$c_{\text{GK}} = 1410 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

sowie den Daten des A-Scans lassen sich dann die Abmessungen des Augenmodells berechnen. Die Resultate sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Echo-Zeiten und berechnete Abmessungen des Augenmodells unter Angabe der jeweils verwendeten Schallgeschwindigkeit.

Strecke	Zeit [μ s]	Schallgeschwindigkeit	rel. Distanz [mm]	abs. Distanz [mm]
Hornhaut – Linse	11,7	c_{GK}	8,249	8,249
Innerhalb der Linse	4,5	c_{L}	5,625	13,874
Linse – Retina	6,6	c_{GK}	4,653	18,527

6 Diskussion

6.1 Abweichungen

Die Schallgeschwindigkeit in Acryl wurde in Unterabschnitt 5.1 zu $(2763,38 \pm 10,46)$ m/s bestimmt. Ausgehend vom Literaturwert 2730 m/s entspricht das einer Abweichung von 33,38 m/s beziehungsweise 1,22 %. Es ist jedoch anzumerken, dass sich diese Angabe auch von Quelle zu Quelle unterscheidet.

Abbildung 7 stellt die Abweichungen von Schieblehre und Ultraschall aus Abbildung 5 nochmals anders dar. Der aus den Messungen mit Schieblehre berechenbare Mittelpunkt der jeweiligen Fehlstelle wird zentriert, und sämtliche Messungen werden relativ zu diesem geplottet. Weil ein Messwert für 4 fehlt, ist dort kein Balken für die Ultraschall-Messung eingezeichnet.

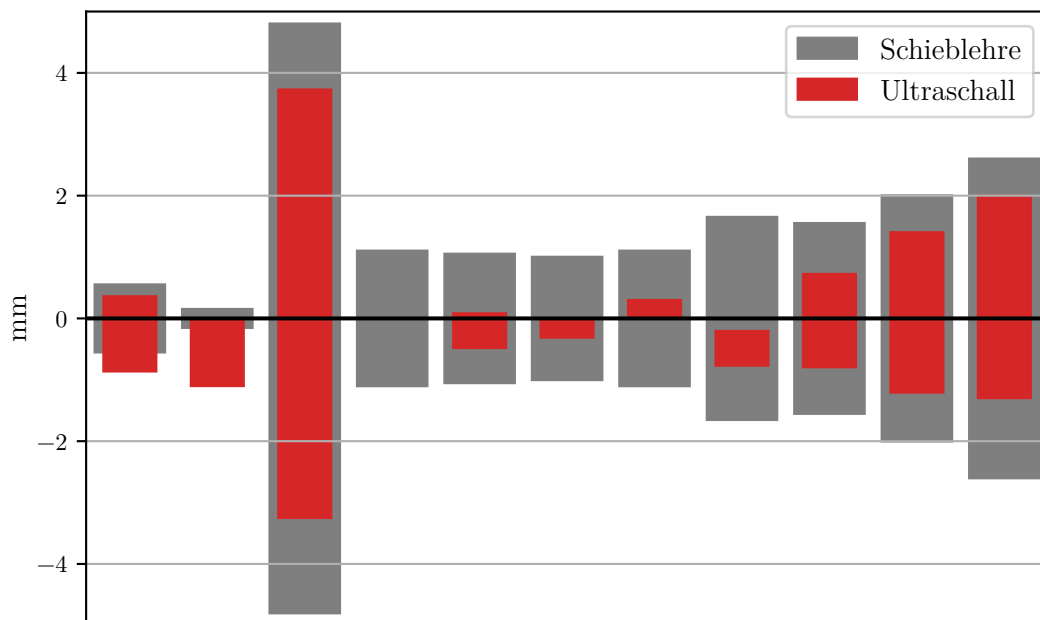


Abbildung 7: Visualisierung der Unterschiede der Messungen mit Schieblehre bzw. Ultraschall.

Insgesamt handelt es sich offenbar um sinnvolle Messwerte, welche jedoch fast immer etwas zu große Distanzen angeben, beziehungsweise umgerechnet eine kleinere als die mit der Schieblehre gemessene Lochgröße ergeben. Daher liegt die Vermutung nahe, dass ein systematischer Fehler vorliegt.

Mangels zuverlässiger Literaturwerte wird auf einen Vergleich der experimentell bestimmten Schallgeschwindigkeit in Acryl verzichtet. Es lässt sich jedoch sagen, dass die Abweichung des bestimmten Wertes mit $\pm 10,46 \text{ m/s}$ klein ausfällt.

Zum Augenmodell liegen ebenfalls keine Referenzwerte vor.

6.2 Mögliche Fehlerquellen

Sofern für die Schallgeschwindigkeit signifikante Abweichungen festzustellen sind, ist eine wahrscheinliche Erklärung, dass die Amplitude des Echos nicht nur von der Eindringtiefe, sondern aufgrund der endlichen Breite der Schallwelle und der Sonde auch von der Größe der Fehlstelle abhängt. Da die Lochgröße von **4** bis **11** stets zunimmt, ist nicht damit zu rechnen, dass sich dieser Effekt kompensiert.

Das Vermessen des Augenmodells war dadurch erschwert, dass das resultierende Spektrum empfindlich von der Positionierung der Ultraschallsonde abhing. Die Position der Peaks in der Zeit-Dimension sollte dadurch jedoch nur unwesentlich beeinflusst worden sein.

Beim Vermessen des Acrylblocks trat hingegen das Problem auf, dass sich die Sonde nicht präzise über die Oberfläche bewegen ließ, da sie aufgrund des verwendeten bidestillierten Wassers als Kontaktmittel daran haftete. Dadurch wurden Maxima weniger genau getroffen. Beim Augenmodell wurde hingegen Ultraschallgel verwendet, welches deutlich bessere Gleiteigenschaften besitzt.

Literatur

- [1] URL: http://biofiz.semmelweis.hu/run/dl_t.php?id=2276&tid=91 (besucht am 23.05.2021).
- [2] *Versuchsanleitung zum Versuch US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. TU Dortmund.