

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Lukas Rolf

lukas.rolf@tu-dortmund.de

Yannik Brune

yannik.brune@tu-dortmund.de

Durchführung: 23.05.2017

Abgabe: 30.05.2017

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Die Natur von Schallwellen in Medien	3
2.2 Die Erzeugung von hochfrequenten Ultraschallwellen	3
2.3 Das Durchschallungsverfahren	3
2.4 Das Impuls-Echo-Verfahren	4
3 Aufbau	4
4 Durchführung	5
5 Auswertung	6
5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Durchschallungs-Verfahren . .	6
5.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren	7
5.3 Bestimmung der Dämpfungskonstanten mit Impuls-Echo-Verfahren	8
5.4 Untersuchung des Cepstrums/Spektrums	9
5.5 Untersuchung der Abstände in einem Augenmodell	10
6 Diskussion	10
Literatur	12

1 Zielsetzung

Es soll die Schallgeschwindigkeit in Acryl, sowie die zugehörige Dämpfungskonstante mithilfe von zwei Ultraschalltechniken untersucht werden. Anschließend wird Ultraschall zur zerstörungsfreien Längenmessung verwendet.

2 Theorie

2.1 Die Natur von Schallwellen in Medien

Schallwellen sind longitudinale Wellen des Druckes. Innerhalb von Festkörpern besitzen Schallwellen aufgrund von Schubspannungen jedoch auch transversalen Schwingungskomponenten. Schallwellen oberhalb des hörbaren Bereiches von 22 kHz werden als Ultraschall, oberhalb von 1 GHz als Hyperschall bezeichnet. Aufgrund der Struktur eines Festkörpers ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_{Fe} in diesen im allgemeinen Richtungsabhängig. Für die von der Schallwelle im Medium mit konstanter Schallgeschwindigkeit c zurückgelegten Strecke Δx in Abhängigkeit von der vergangenen Zeit t gilt

$$\Delta x(t) = ct. \quad (1)$$

In der Regel kommt es zu einem Energieverlust der Schallwelle. Die Intensität nimmt daher mit

$$I(x) = I_0 \exp(\alpha x) \quad (2)$$

ab. Der Absorptionskoeffizient α beschreibt, wie schnell die Wellenintensität abnimmt. Da α für Luft nur sehr gering ist, wird in der Praxis ein Kontaktmittel zwischen Schallgeber und Beobachtungsmaterial eingesetzt. Ein weiterer Aspekt ist die Wellenreflexion. Trifft die Schallwelle auf eine Grenzfläche, kommt es zur teilweisen Reflexion der Welle.

2.2 Die Erzeugung von hochfrequenten Ultraschallwellen

Eine mögliche Methode zur Erzeugung der benötigten, hochfrequenten Schallwellen ist das Ausnutzen des piezo-elektrischen Effektes. Hierzu wird ein Piezo-Kristall z.B. ein Quarz in ein elektrisches Wechselfeld gebracht. Der Kristall dehnt sich infolge dessen mit der angelegten Frequenz des Wechselfeldes aus und zieht sich später wieder zusammen. Ausdehnung und Zusammenziehen mit der angelegten Frequenz des Wechselfeldes. Um ausreichend große Ausdehnungsamplituden zu erzielen muss die Anregungsfrequenz mit der Eigenfrequenz des Kristalls übereinstimmen. Letztere variiert je nach Kristall und Form des Einbaus. Umgekehrt können auch Ultraschallwellen mithilfe des Kristalls ausgewertet werden, da sie diesen zu Schwingungen im Wechselfeld anregen.

2.3 Das Durchschallungsverfahren

Beim Durchschallungsverfahren werden eine Sender und eine Empfängersonde an je einer Seite der Probe angebracht. Nun wird ein kurzzeitiger Schallimpuls ausgesendet, welcher anschließend vom Empfänger gemessen wird und im Graphen einen Peak abzeichnet. Aus

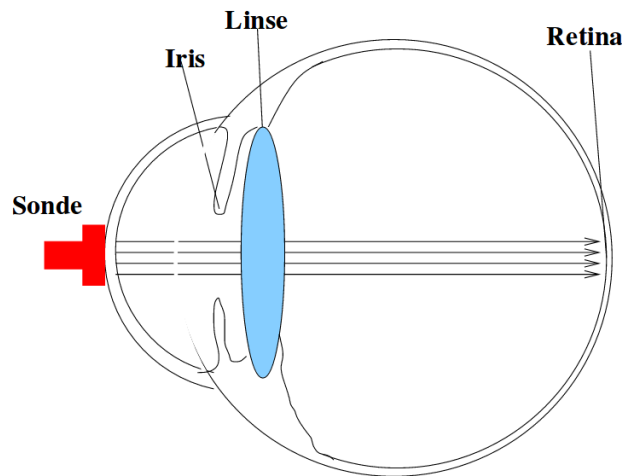
der messbaren Zeitdifferenz zwischen Start und Endpeak lässt sich die Schallgeschwindigkeit im Medium ermitteln. Aufgrund des Energieverlustes der Schallwelle fällt der Endpeak auch bei einer fehlerfreien Probe geringfügig kleiner aus. Fällt der Endpeak jedoch weitaus kleiner aus als es zu erwarten wäre, lässt dies auf eine Fehlstelle im Material schließen. Es lässt sich jedoch keine Aussage machen, an welcher Stelle sich die Fehlstelle befindet.

2.4 Das Impuls-Echo-Verfahren

Beim Impuls-Echo-Verfahren findet die benutzte Sonde sowohl als Sender als auch als Empfänger Verwendung. Es wird wieder ein kurzzeitiger Schallimpuls ausgesendet, welcher anschließend an Grenzflächen reflektiert wird und von der Sonde wieder aufgenommen wird. Die akustischen Impulse werden in der Sonde wieder in elektrische Signale umgewandelt und können gegen die Zeit aufgetragen werden. Diese graphische Darstellung heißt AScan. Der Graph besitzt bei einer fehlerfreien Probe zwei Peaks, zu deren Zeiten die Probenenden erreicht werden. Liegt eine Fehlstelle vor, ist deren Zeitpunkt als weiterer Peak im Graphen erkennbar. Ist zudem die Schallgeschwindigkeit im verwendeten Medium bekannt, kann aus den Peaks und Formel (1) auch die Tiefe der Fehlstelle ermittelt werden.

3 Aufbau

Abbildung 1: Der schematische Aufbau des verwendeten Augenmodells.[1]



Der Versuchsaufbau besteht aus 2 Messsonden, welche mit 2 MHz betrieben werden, einem Ultraschallechoskop und einem Computer zur Aufnahme der Daten. Am Ultraschallechoskop lässt sich einstellen ob die jeweilige Sonde als Sender, Empfänger oder beides fungieren soll. Zusätzlich kann eine Verstärkung der auftretenden Signale eingestellt werden. Dies geschieht sowohl über einen zeitlich konstanten Verstärkungsfaktor, welcher

über die Einstellung Gain justiert wird, als auch über einen zeitlich veränderlichen, den sogenannten TCG. Letzterer beschreibt eine zeitlich linear ansteigende Verstärkung und kann über die Parameter *Threshold*, *Wide*, *Slope* und *Start* modifiziert werden. Die gemessenen Signale werden mithilfe der Software AScan ausgewertet. Ein AScan ist die eindimensionale Darstellung der gemessenen Impulse gegenüber der Zeit, gibt also den in der Theorie beschriebenen Graphen aus. Ein neuer AScan lässt sich über den Menüpunkt AScan starten. Im oberen Graphen werden die auftretenden Peaks, im unteren der zugehörige TCG Wert dargestellt. Mithilfe von einblendbaren Cursern können die Peaks präziser vermessen werden. Über die Funktion FFT wird zusätzlich das Spektrum sowie ihr zugehöriges Cepstrum angezeigt. Für die dafür benötigten Berechnungen wird nur der Graphenabschnitt verwendet der sich zwischen zwei Cursern befindet. Für den letzten Versuchteil wird zusätzlich ein Augenmodell nach Abb. 1 mit Maßstab 3:1 verwendet.

4 Durchführung

Als erstes werden die Längen aller Acrylzyylinder mit einer Schieblehre vermessen. Der Gain wird so eingestellt, dass die resultierenden Peaks eines ASkans im Impuls Echo-Verfahren noch komplett sichtbar sind. Im Anschluss wird zunächst das Impuls-Echo-Verfahren an den Zylindern erprobt. Hierzu wird der Zylinder auf ein Papiertaschentuch gestellt. Anschließend wird eine Sonde mithilfe von bidestiliertem Wasser von oben angekoppelt. Das Ultraschallechoskop wird so eingestellt, dass die verwendete Sonde sowohl als Sender als auch als Empfänger fungiert. Nun wird ein AScan durchgeführt und die Zeit-Ordinaten der auftretenden Peaks, sowie der zugehörige TCG-Werte, werden mithilfe der Cursor bestimmt und anschließend notiert. Dies wird für die anderen fünf Zylinderlängen wiederholt. Falls die auftretenden Peaks zu gering oder zu hoch ausfallen muss die TCG-Einstellung gegebenenfalls nachjustiert werden. Aus diesen lässt sich sowohl die Dämpfungskonstante als auch die Schallgeschwindigkeit in Acryl bestimmen. Als nächstes wird der Versuch nochmals mit dem Durchschallungsverfahren wiederholt. Hierzu wird der jeweilige Zylinder in eine Halterung gelegt und von beiden Seiten mit Koppelgel an jeweils eine Sonde angekoppelt. Die Eingänge des Ultraschallechoscops werden entsprechend eingestellt. Auch hier wird ein AScan durchgeführt und die entsprechenden Daten werden notiert. Nun wird eine spektrale Analyse sowie eine Cepstrumbestimmung durchgeführt. Hierzu werden zwei Acrylscheiben unterschiedlicher Dicke mit bidestiliertem Wasser gekoppelt. Die dünnere Scheibe liegt ganz unten. Um die auftretenden Peaks besser vom Anfangspeak an der Grenzschicht von Sonde und Acryl zu trennen wird ein Zylinder zwischen Sonde und Platten gekoppelt. Der TCG wird so eingestellt, dass 3 Peaks zu erkennen sind. Die Curser werden so gesetzt, dass alle Peaks im Bereich zwischen ihnen liegen. Daraufhin wird eine FFT-Analyse über den entsprechenden Menüpunkt gestartet. Diese liefert Spektrum und Cepstrum. Auch hier werden die Koordinaten der Peaks notiert. Zuletzt wird ein Augenmodell untersucht. Hierzu wird wieder eine Sonde im Impuls-Echo-Verfahren mit Koppelgel an die künstliche Hornhaut des Modells angekoppelt und leicht bewegt bis ein Echo der Augenrückwand zu sehen ist. Es werden wieder die Positionsdaten der Peaks notiert. Es ist darauf zu achten, dass kein übermäßiger Druck

auf die Hornhaut ausgeübt wird, da das Augenmodell sonst beschädigt werden könnte.

5 Auswertung

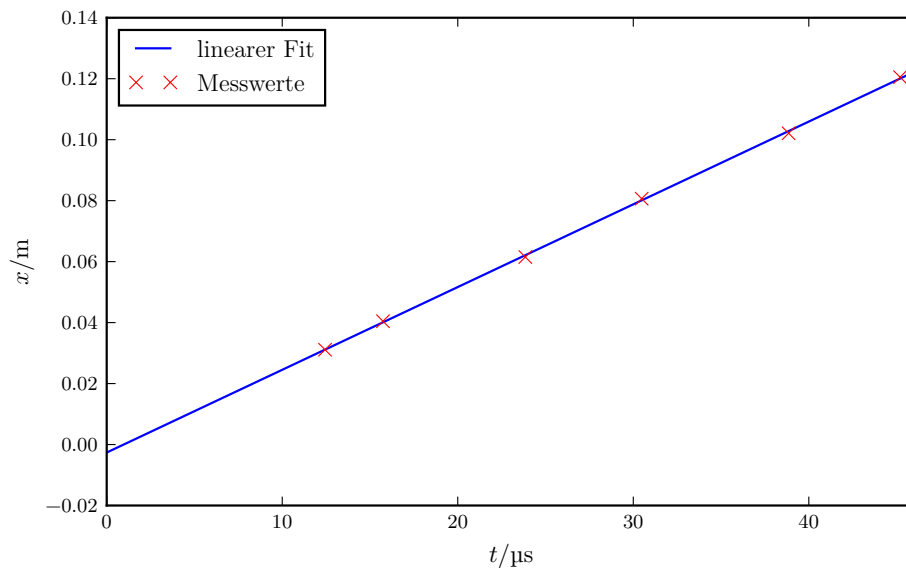
Die Graphen wurden sowohl mit Matplotlib [2] als auch NumPy [5] erstellt. Die Fehlerrechnung wurde mithilfe von Uncertainties [4] durchgeführt.

5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Durchschallungs-Verfahren

Tabelle 1: Die gemessenen Laufzeiten T für die Acryl-Zylinder der Länge l bei dem Durchschallungs-Verfahren.

l/cm	$T/\mu\text{s}$
3,110	12,44
4,045	15,74
6,150	23,85
8,065	30,48
10,210	38,85
12,050	45,20

Abbildung 2: Die bei einer Laufzeit t zurückgelegte Strecke x des Schalls im Zylinder bei dem Durchschallungs-Verfahren gegen die Laufzeit t aufgetragen.



In der Abbildung 2 sind die Messwertepaare aus Tabelle 1 aufgetragen und durch einen linearen Fit der Form $x = at + b$ genähert worden. Es folgt für die Schallgeschwindigkeit

im Zylinder durch Vergleich mit Formel (1)

$$c_1 = a = (2714 \pm 21) \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (3)$$

Nun lässt sich unter anderem in dem Graphen in Abbildung 2 erkennen, dass die Ausgleichsgerade nicht wie nach Formel (1) zu erwarten im Ursprung beginnt sondern leicht unterhalb, also dass $b \neq 0$ ist. Dies ist durch die Strecke, die der Schall vor Eintritt in und nach Austritt aus dem Zylinder zurücklegen muss zu erklären. Die dafür benötigte Zeit Δt entspricht der Nullstelle der Ausgleichsgeraden. Für die mittlere benötigte Zeit T_{A1} um eine dieser Strecken zurückzulegen gilt somit

$$T_{A1} = \frac{\Delta t}{2} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{b}{a} = (0,5 \pm 0,1) \mu\text{s}. \quad (4)$$

5.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Impuls-Echo-Verfahren

Tabelle 2: Die gemessenen Laufzeiten T , Spannungen U , TGC-Werte und die daraus berechneten ursprünglichen Spannungen U_n für die Acryl-Zylinder der Länge l bei einem Gain von 10 dB bei dem Impuls-Echo-Verfahren.

l/cm	$T/\mu\text{s}$	U/V	TGC/dB	U_n/V
3,110	23,81	0,857	0,84	$2,46 \cdot 10^{-1}$
4,045	30,37	0,756	3,66	$1,57 \cdot 10^{-1}$
6,150	46,28	0,880	17,22	$3,83 \cdot 10^{-2}$
8,065	59,99	0,576	22,06	$1,44 \cdot 10^{-2}$
10,210	76,50	0,231	28,79	$2,66 \cdot 10^{-3}$
12,050	89,03	0,155	28,91	$1,76 \cdot 10^{-3}$

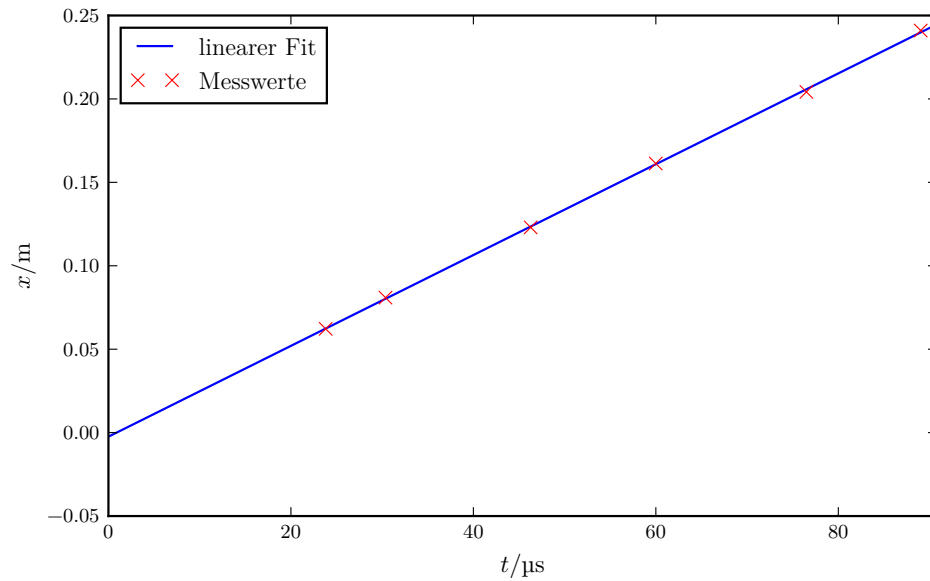
In der Abbildung 3 sind die Messwertepaare aus Tabelle 2 aufgetragen und durch einen linearen Fit der Form $x = at + b$ genähert worden. Es folgt für die Schallgeschwindigkeit im Zylinder durch Vergleich mit Formel (1)

$$c_2 = a = (2722 \pm 19) \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (5)$$

Nun lässt sich in dem Graphen in Abbildung 3 erkennen, dass die Ausgleichsgerade nicht wie nach Formel (1) zu erwarten im Ursprung beginnt sondern leicht unterhalb, also dass $b \neq 0$ ist. Dies ist wieder durch die Strecke, die der Schall vor Eintritt in und nach Austritt aus dem Zylinder zurücklegen muss zu erklären. Die dafür benötigte Zeit Δt entspricht der Nullstelle der Ausgleichsgeraden. Für die mittlere benötigte Zeit T_{A2} um eine dieser Strecken zurückzulegen gilt somit

$$T_{A2} = \frac{\Delta t}{2} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{b}{a} = (0,4 \pm 0,2) \mu\text{s}. \quad (6)$$

Abbildung 3: Die bei einer Laufzeit t zurückgelegte Strecke x des Schalls im Zylinder bei dem Impuls-Echo-Verfahren gegen die Laufzeit t aufgetragen.

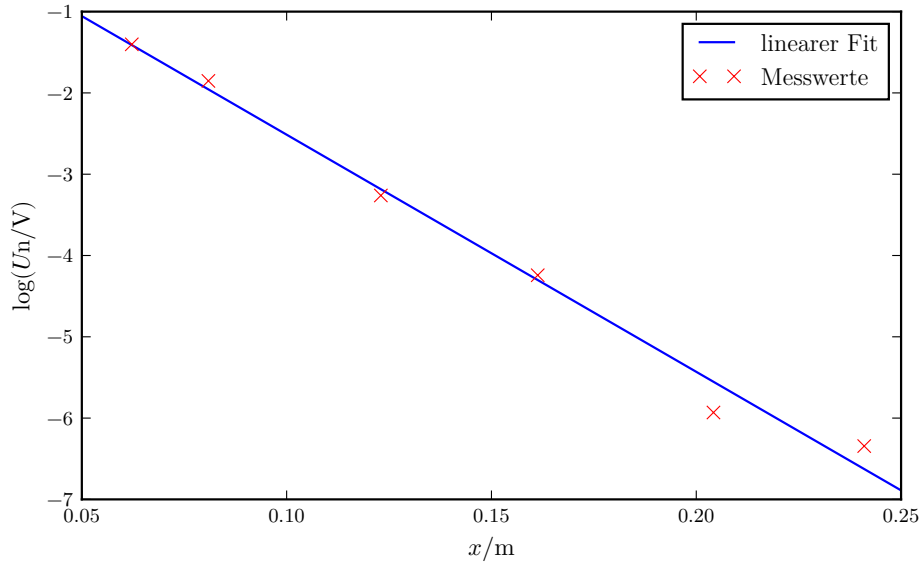


5.3 Bestimmung der Dämpfungskonstanten mit Impuls-Echo-Verfahren

In der Abbildung 4 ist der Logarithmus von der ursprünglichen Spannung U_n gegen die zurückgelegte Strecke x des Schalls im Zylinder mit den Werten aus Tabelle 2 aufgetragen und durch einen linearen Fit der Form $x = at + b$ genähert worden. Für den Dämpfungsfaktor α gilt, da die Intensität I proportional zu U_n^2 ist, nach Formel (2)

$$\alpha = -2a = (58 \pm 3) \frac{1}{\text{m}}. \quad (7)$$

Abbildung 4: Der Logarithmus von der ursprünglichen Spannungen U_n bei dem Impuls-Echo-Verfahren gegen die nach der Zeit t zurückgelegten Strecke x des Schalls im Zylinder aufgetragen.



5.4 Untersuchung des Cepstrums/Spektrums

Im Spektrum wurde ein Peak bei 1,78 MHz aufgenommen. In Tabelle 3 fällt auf, das sich

Tabelle 3: Die gemessenen zeitliche Differenz T zu dem ersten Peak im Cepstrum der gemessenen Peaks und die daraus berechneten zeitlichen Abstände ΔT zwischen diesen und dem jeweils vorherigem.

$T/\mu\text{s}$	$\Delta T/\mu\text{s}$
0,00	0,00
4,48	4,48
11,74	7,26
23,33	11,59

die Werte für die gemessenen und bestimmten zeitlichen Differenzen durch Kombination der zeitlichen Differenzen von $T'_1 = 4,48 \mu\text{s}$ und von $T'_2 = 7,26 \mu\text{s}$ darstellen lassen. Da es sich hierbei um die zusätzlichen Laufzeiten der Reflexe in den Acrylplatten handelt lässt dies vermuten, dass diese die Laufzeiten des Schalls in den jeweiligen Acrylplatten sind. Mit der bekannten Schallgeschwindigkeit in Acryl $c_2 = a = (2722 \pm 19) \text{ m/s}$ ergeben sich somit für die Dicken der Platten

$$D_1 = \frac{T'_1}{2} c_2 = (6,10 \pm 0,04) \text{ mm} \quad (8)$$

und

$$D_2 = \frac{T'_2}{2} c_2 = (9,88 \pm 0,07) \text{ mm.} \quad (9)$$

5.5 Untersuchung der Abstände in einem Augenmodell

Tabelle 4: Die gemessenen Werte für die Laufzeiten T des Schalls und die unter Einbeziehung der Laufzeiten außerhalb des Augenmodells T_{A1} berechneten Werte für die Laufzeit des Schalls T_I im Augenmodell.

$T/\mu\text{s}$	$T_I/\mu\text{s}$
11,41	$10,4 \pm 0,2$
17,67	$16,7 \pm 0,2$
24,97	$24,0 \pm 0,2$
71,72	$70,8 \pm 0,2$

Mit den Werten für die Laufzeiten des Schalls im Auge aus Tabelle 4 lässt sich mit den bekannten Schallgeschwindigkeiten von $c_{\text{GK}} = 1410 \text{ m/s}$ außerhalb der Linse und von $c_L = 2500 \text{ m/s}$ in der Linse die Abstände im Augenmodell berechnen. Für den Abstand zwischen der Hornhaut und der Iris ergibt sich

$$A_1 = \frac{T_{I1}}{2} c_{\text{GK}} = (7 \pm 2) \text{ mm}, \quad (10)$$

für den Abstand zwischen Iris und Linse

$$A_2 = \frac{T_{I2} - T_{I1}}{2} c_{\text{GK}} = 4,413 \text{ mm}, \quad (11)$$

für die Dicke der Linse

$$A_3 = \frac{T_{I3} - T_{I2}}{2} c_L = 9,125 \text{ mm} \quad (12)$$

und für den Abstand zwischen Linse und Retina

$$A_4 = \frac{T_{I4} - T_{I3}}{2} c_{\text{GK}} = 32,96 \text{ mm.} \quad (13)$$

6 Diskussion

Die in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse aus der Auswertung sollen nun diskutiert werden. Die bestimmte Schallgeschwindigkeit in Acryl c_2 , welche mit dem Impuls-Echo-Verfahren bestimmt wurde weicht um $(0,3 \pm 0,7) \%$ vom Literaturwert [6] ab. Die mit dem Durchschallungs-Verfahren bestimmte Schallgeschwindigkeit in Acryl c_1 weicht stärker (um $(0,6 \pm 0,8) \%$) von dem Literaturwert [6] ab. Eine Ursache hierfür ist unter anderem, dass die im Acrylzylinder zurückgelegte Strecke beim Impuls-Echo-Verfahren doppelt so groß ist wie beim Durchschallungs-Verfahren und dadurch Schwankungen in

Tabelle 5: Die in der Auswertung bestimmten Werte mit zugehörigen Vergleichswerten und die relative Abweichung von diesen.

Wert	gemessen	Literaturwert[6],[3]	Abweichung
c_1	$(2714 \pm 21) \text{ m/s}$	2730 m/s	$(0,6 \pm 0,8) \%$
c_2	$(2722 \pm 19) \text{ m/s}$	2730 m/s	$(0,3 \pm 0,7) \%$
T_{A1}	$(0,5 \pm 0,1) \mu\text{s}$	-	-
T_{A2}	$(0,4 \pm 0,2) \mu\text{s}$	-	-
α	$(58 \pm 3) \text{ 1/m}$	$(57 \pm 2) \text{ 1/m}$	$(2 \pm 7) \%$
D_1	$(6,10 \pm 0,04) \text{ mm}$	6,05 mm	$(0,8 \pm 0,7) \%$
D_2	$(9,88 \pm 0,07) \text{ mm}$	9,90 mm	$(0,2 \pm 0,7) \%$
A_1	$(7,4 \pm 0,2) \text{ mm}$	-	-
A_2	4,413 mm	-	-
A_3	9,125 mm	-	-
A_4	32,96 mm	-	-

der Laufzeit des Schalls außerhalb des Acrylzyinders nur den halben Einfluss haben. Auch die Messfehler der Laufzeit im Zylinder halbieren sich dadurch im Impuls-Echo-Verfahren im Vergleich zum Durchschallungs-Verfahren. Die bestimmte mittlere Laufzeit des Schalls vor Eintritt in die Zylinder beim Durchschallungs-Verfahren unterscheidet sich geringfügig von der beim Impuls-Echo-Verfahren. Ein Grund hierfür ist, dass bei der Messung mit Durchschallungs-Verfahren Ultraschallgel und bei der Messung mit Impuls-Echo-Verfahren bidestilliertes Wasser verwendet wurde. Der mit dem Impuls-Echo-Verfahren bestimmte Absorptionskoeffizient der Schallamplitude α weicht vom Literaturwert [3] um $(2 \pm 7) \%$ ab. Der Messwert liegt somit im akzeptablen Bereich von einer σ -Umgebung. Bei der Messung der Positionen der Peaks im Cepstrum wurde vermutlich ein Peak bei ca. $7,26 \mu\text{s}$ übersehen, sonst würde sich mit der Laufzeit der Reflexion $T'_2 = 11,74 \mu\text{s}$ eine deutlich zu dicke Dicke für die zweite Acrylplatte ergeben. Da die Peaks bei vielfachen der Laufzeiten der Reflexe und Kombinationen dieser liegen, ist die Differenz zwischen der Position des zweiten und ersten Peaks die Laufzeit der Reflexion in der zweiten Acrylplatte. Die unter dieser Annahme berechneten Werte für die Dicken der Acrylplatten weichen unter $1,6 \%$ von den manuell gemessenen Werten ab. Für die Positionen der Peaks im Spektrum wurde nur der Wert des absoluten Maximums bei 1,78 MHz aufgenommen, woraus keine weiteren Werte ermittelt werden konnten. Die bestimmten Abstände im Augenmodell scheinen in der richtigen Größenordnung zu liegen. Die große Ungenauigkeit bei dem ersten Abstand A_1 lässt sich auf die Ungenauigkeit der Laufzeit des Schalls vor Eintritt in des Augenmodell erklären.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *US1 Grundlagen der Ultraschalltechnik*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf> (besucht am 20.06.2017).
- [2] John D. Hunter. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Version 1.5.3. URL: <http://matplotlib.org/> (besucht am 09.12.2016).
- [3] Kaye und Laby. *The speed and attenuation of sound*. URL: http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_4/2_4_1.html (besucht am 29.05.2017).
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.0.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/> (besucht am 09.12.2016).
- [5] Travis E. Oliphant. *NumPy: Python for Scientific Computing*. Version 1.11.1. URL: <http://www.numpy.org/> (besucht am 09.12.2016).
- [6] OLYMPUS. *Material Sound Velocities*. URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/> (besucht am 29.05.2017).