

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Jannis Speer

jannis.speer@tu-dortmund.de

Kevin Talits

kevin.talits@tu-dortmund.de

Durchführung: 29.05.18

Abgabe: 05.06.18

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	4
2.1	Schallgeschwindigkeit und Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren . .	4
2.2	Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungs-Verfahren	5
2.3	Spektrale Analyse und Cepstrum	5
2.4	Biometrische Untersuchung eines Augenmodells	5
3	Auswertung	6
3.1	Impuls-Echo-Verfahren	6
3.1.1	Schallgeschwindigkeit	6
3.1.2	Dämpfung	7
3.2	Durchschallungsverfahren	8
3.3	Spektrale Analyse und Cepstrum	9
3.4	Abmessungen des Auges	11
4	Diskussion	12
	Literatur	12

1 Theorie

Der Frequenzbereich von ca. 20 kHz bis ca. 1 GHz wird Ultraschall genannt. Schall ist eine longitudinale Welle, welche sich aufgrund von Druckschwankungen fortbewegt. Die akustische Impedanz ist $Z = c * \rho$, die durch die Dichte ρ des durchstrahlten Materials und der Schallgeschwindigkeit in diesem Material bestimmt wird. Es treten, ähnlich wie bei elektromagnetischen Wellen, Reflexion, Brechung und ähnliche Effekte auf. Aber die Phasengeschwindigkeit der Schallwelle ist materialabhängig.

In Gasen und Flüssigkeiten breitet sich der Schall immer als Longitudinalwelle aus. Die Schallgeschwindigkeit hängt z.B. bei einer Flüssigkeit von ihrer Kompressibilität κ und ihrer Dichte ρ ab.

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

Bei einem Festkörper ist die Schallausbreitung komplizierter, da infolge von Schubspannungen nicht nur Longitudinalwellen sondern auch Transversalwellen möglich sind. Hier ersetzt bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit in einem Festkörper das Elastizitätsmodul E die Kompressibilität κ^{-1} .

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

In Festkörpern sind Schallwellen richtungsabhängig.

Bei der Schallausbreitung geht ein Teil der Energie durch Absorption verloren. Die Intensität I_0 nimmt exponentiell nach der Strecke x ab.

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (3)$$

α ist der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude.

Beim Treffen auf eine Grenzfläche wird ein Teil der Schallwelle reflektiert. Der Reflexionskoeffizient R , das Verhältnis von reflektierten zu einfallender Schallintensität, setzt sich dabei aus der akustischen Impedanz der beiden angrenzenden Materialien zusammen.

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (4)$$

Der transmittierte Anteil T läßt sich aus $T = 1 - R$ berechnen.

Ultraschall kann auf verschiedene Arten erzeugt werden. Die Anwendung des reziproken piezo-elektrischen Effekts ist eine. Ein piezoelektrischer Kristall kann in einem elektrischen Wechselfeld zum Schwingen angeregt werden, wenn eine polare Achse des Kristalls in Richtung des elektrischen Feldes zeigt. Der Piezokristall strahlt beim Schwingen Ultraschallwellen ab. Für Resonanz der Anregerfrequenz und Eigenfrequenz können große

Amplituden erzeugt werden. Der Piezokristall kann auch umgekehrt als Schallempfänger genutzt werden, hierbei treffen die Schallwellen auf den Kristall und regen diesen zu Schwingungen an. Quarze sind dabei die meist benutzten piezoelektrischen Kristalle, da sie gleichbleibende physikalische Eigenschaften haben. Jedoch haben sie einen relativ schwachen piezoelektrischen Effekt.

Laufzeitmessungen liefern Informationen über den durchstrahlten Körper. Es werden die beiden Methoden, das Durchschallungs-Verfahren und das Impuls-Echo-Verfahren verwendet.

Beim Durchschallungs-Verfahren wird mit einem Ultraschallsender ein kurzzeitiger Schallimpuls ausgesendet und am anderen Ende des Probenstücks mit einem Ultraschallempfänger aufgefangen. Befindet sich eine Fehlstelle in der durchstrahlten Probe, so wird eine abgeschwächte Intensität am Ultraschallempfänger gemessen. Eine Aussage darüber, wo sich die Fehlstelle in der Probe befindet, ist nicht möglich.

Beim Impuls-Echo-Verfahren wird der Ultraschallsender auch als Empfänger verwendet. Der ausgesendete Ultraschallpuls wird hierbei an einer Grenzfläche reflektiert und nach seiner Rückkehr vom Empfänger aufgenommen. Bei Fehlstellen kann die Höhe des Echos Aufschluß über die Größe der Fehlstelle geben. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit kann aus der Laufzeit t die Lage der Fehlstelle über

$$s = \frac{1}{2}ct \quad (5)$$

bestimmt werden. Die Laufzeitdiagramme können in einem A-Scan, B-Scan oder einem TM-Scan dargestellt werden.

2 Durchführung

2.1 Schallgeschwindigkeit und Dämpfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren

Es wird an insgesamt 7 Acrylzylindern nacheinander gemessen. Zuerst wird die Dicke des Zylinders mit einer Schieblehre bestimmt. Dann wird der Zylinder auf ein Papiertuch gestellt und mit bidestilliertem Wasser mit einer 2MHz-Sonde gekoppelt. Mit dem Impuls-Echo-Verfahren wird ein A-Scan durchgeführt und für den ersten und zweiten reflektierten Puls die Laufzeit, sowie Amplitude bestimmt. Es wird mit dem größten Zylinder begonnen und die Amplitude des zweiten Pulses durch den Verstärker auf einen Wert zwischen 1 und 1,2 V geregelt. Danach bleibt die Verstärkung für alle weiteren Messungen gleich eingestellt. Aus den gemessenen Zeitunterschieden und den Zylinderlängen wird später in einem Plot mit Fit die Schallgeschwindigkeit aus der Steigung ermittelt. Aus den Daten der Amplituden des zweiten Pulses kann dann die Dämpfung mit der Formel 3 berechnet werden.

2.2 Schallgeschwindigkeit mit dem Durchschallungs-Verfahren

Es werden die selben Zylinder wie in Abschnitt 2.1 verwendet. Diese werden horizontal in eine schwarze Halterung gelegt und mit einem Koppelgel werden an beiden Stirnseiten die Sonden gekoppelt. Im A-Scan wird die Laufzeit, die der Schallimpuls zum Durchlaufen des Zylinders benötigt, ausgemessen und erneut die Schallgeschwindigkeit berechnet. Diese Ergebnisse werden mit den Ergebnissen aus Abschnitt 2.1 verglichen.

2.3 Spektrale Analyse und Cepstrum

Es werden zwei verschieden dicke Acrylplatten miteinander gekoppelt und oben drauf noch ein Acrylzylinder der Länge 4cm gekoppelt. Dann werden im Impuls-Echo-Verfahren Mehrfachimpulse aufgenommen. Der Acrylzylinder dient als Vorlaufstrecke, so dass die Mehrfachechos besser von dem Initialecho getrennt werden können. Um zu beginnen wird die 2 MHz Sonde an den Zylinder gekoppelt. Jetzt sind alle Gegenstände mit bidestilliertem Wasser gekoppelt. Die Verstärkung wird so eingestellt, dass drei Mehrfachreflexionen zu sehen sind. Mit diesen drei Reflexionen wird mit Hilfe der FFT-Funktion ein Spektrum und das Cepstrum der Sonde erzeugt. Es soll die Laufzeit der drei Reflexionen gemessen werden und mit Hilfe der bestimmten Schallgeschwindigkeit wird die Dicke der Platten berechnet. Genau so soll die Dicke mit den Peaks aus dem Cepstrum berechnet werden und das FFT-Spektrum interpretiert werden.

2.4 Biometrische Untersuchung eines Augenmodells

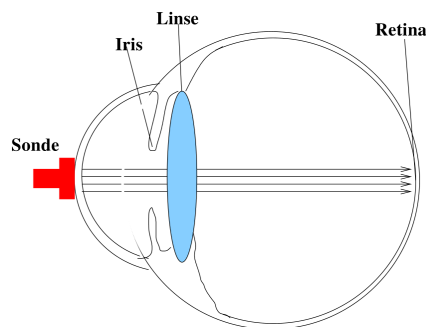


Abbildung 1: Augenmodell. [1]

Anhand eines Augenmodells (siehe Abb. 1) sollen die Abstände im Auge bestimmt werden. Es sollen die Abmessungen des Auges mit dem Impuls-Echo-Verfahren ermittelt werden. Die 2 MHz Sonde wird mit Koppelgel vorsichtig über die Hornhaut bewegt, bis ein Echo an der Rückwand der Retina zu sehen ist. Mit einem A-Scan werden die Echos an den Grenzflächen der Iris, dem Linsenein- und ausgang und der Retina aufgenommen. Danach werden aus der Laufzeit die Abmessungen des Auges bestimmt. Es sind die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in der Linse $c_L = 2500 \text{ m/s}$ und in der Glaskörperflüssigkeit $c_{GK} = 1410 \text{ m/s}$ zu beachten.

3 Auswertung

3.1 Impuls-Echo-Verfahren

In Tabelle 1 sind für die verschieden langen Zylinder mit dem A-Scan gemessenen Laufzeiten und Amplituden des ersten und zweiten Pulses aufgelistet.

Tabelle 1: Laufzeiten und Amplituden für das Impuls-Echo-Verfahren.

Länge [cm]	Puls 1		Puls 2		Δt [μs]
	U [V]	t [μs]	U [V]	t [μs]	
11,9	1,486	0,4	0,922	89,2	88,8
7,9	1,486	0,4	1,385	60,2	59,8
3,7	1,486	0,4	1,457	29,7	29,3
10	1,486	0,4	1,173	76,6	76,6
5,9	1,486	0,4	1,415	46	45,4
8 (kombiniert)	1,486	0,4	1,366	60	59,6
3,1	1,486	0,4	1,456	23,6	23,2

3.1.1 Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit kann nicht direkt mit Gleichung (5) bestimmt werden, da die Laufzeiten aufgrund Anpassungsschicht einen systematischen Fehler besitzen. Deshalb wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt (siehe Abb. 2).

$$y(x) = A \cdot x + B \quad (6)$$

Die Steigung dieser Geraden entspricht der Schallgeschwindigkeit, deren y-Achsenabschnitt der doppelten Dicke der Anpassungsschicht und deren Nullstelle der doppelten Laufzeit durch die Anpassungsschicht.

$$\begin{aligned}
 A_{\text{Echo}} &= c_{\text{Echo}} = (2697 \pm 40) \frac{\text{m}}{\text{s}} \\
 B_{\text{Echo}} &= (0,42 \pm 0,24) \text{ cm} \\
 d_{\text{Echo}} &= \frac{B_{\text{Echo}}}{2} = 0,21 \text{ cm} \\
 t_{\text{Anpassung,Echo}} &= -\frac{B_{\text{Echo}}}{2 \cdot A_{\text{Echo}}} = 0,77 \mu\text{s}
 \end{aligned}$$

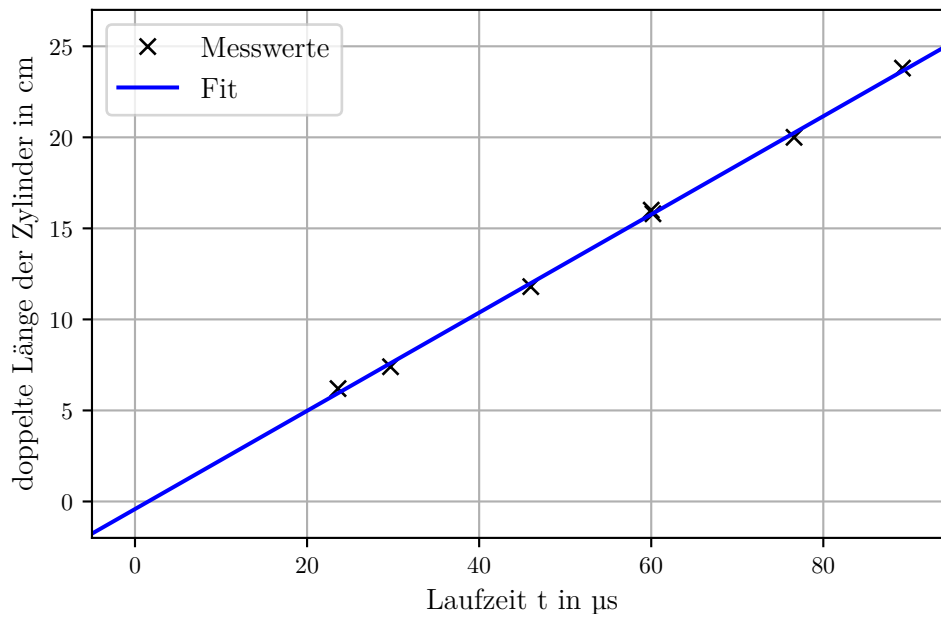


Abbildung 2: linearer Zusammenhang zwischen Laufzeit und der Länge der Zylinder für das Impuls-Echo-Verfahren.

3.1.2 Dämpfung

Um die Dämpfung zu berechnen, wird Gleichung (3) umgestellt werden.

$$\alpha * x = -\ln(I(x)/I_0) \quad (7)$$

Nun kann mit den Werten aus Tabelle 1 über eine lineare Ausgleichsrechnung (siehe Abb. 3) der Absorptionskoeffizient berechnet werden. Für den Absorptionskoeffizienten berechnet sich folgender Wert.

$$A_{\text{Int}} = \alpha = (4,51 \pm 1,16) \frac{1}{\text{m}}$$

$$B_{\text{Int}} = 18,91 \pm 9,08$$

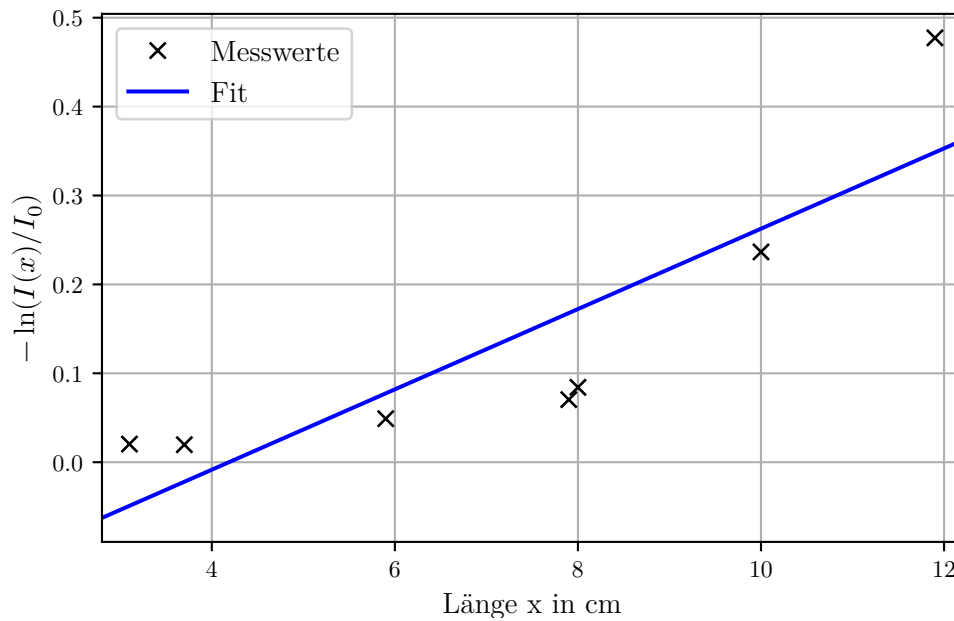


Abbildung 3: halblogarithmische Darstellung des Intensitätsabfalls.

3.2 Durchschallungsverfahren

Mit dem Durchschallungsverfahren soll ebenfalls die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden, folgende Laufzeiten werden dabei gemessen (siehe Tabelle 2). Analog zum Impuls-

Tabelle 2: Laufzeiten für das Durchschallungsverfahren.

Länge [cm]	t [μ s]
11,9	45,9
7,9	31,5
3,7	15,9
10	40,5
5,9	24,2
8 (kombiniert)	31,3
3,1	12,6

Echo-Verfahren wird eine Ausgleichsrechnung mit Gleichung (5) durchgeführt (siehe Abb. 4). Allerdings fällt der Faktor $1/2$ weg, da der Schall den Zylinder nur einmal durchläuft. Die Steigung dieser Geraden entspricht der Schallgeschwindigkeit und deren Nullstelle der

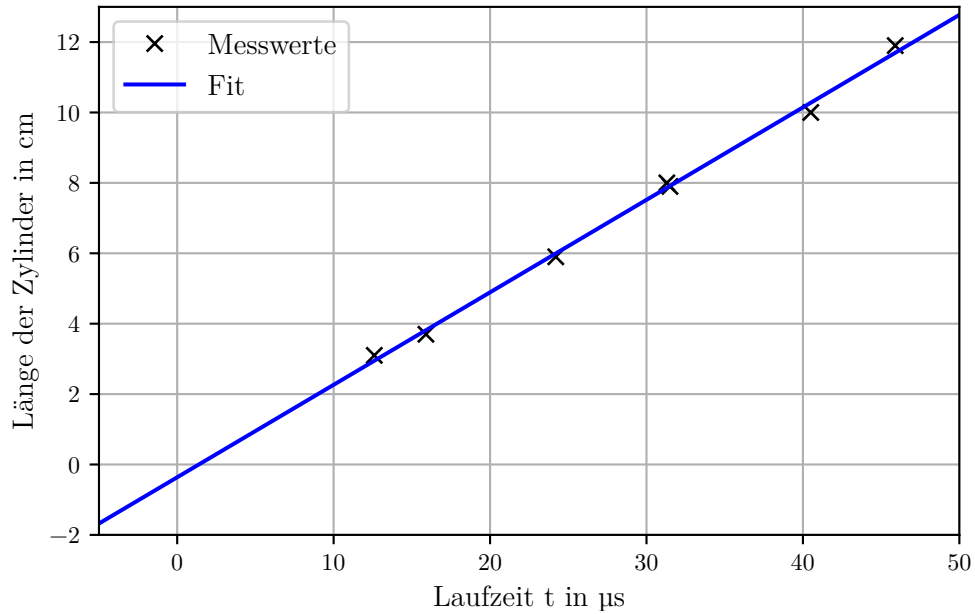


Abbildung 4: linearer Zusammenhang zwischen Laufzeit und der Länge der Zylinder für das Durchschallungsverfahren.

Laufzeit durch die Anpassungsschicht.

$$\begin{aligned}
 A_{\text{Durchschallung}} &= c_{\text{Durchschallung}} = (2627 \pm 64) \frac{\text{m}}{\text{s}} \\
 B_{\text{Durchschallung}} &= (0,36 \pm 0,20) \text{ cm} \\
 d_{\text{Durchschallung}} &= \frac{B_{\text{Durchschallung}}}{2} = 0,18 \text{ cm} \\
 t_{\text{Anpassung,Durchschallung}} &= -\frac{B_{\text{Durchschallung}}}{2 \cdot A_{\text{Durchschallung}}} = 0,69 \mu\text{s}
 \end{aligned}$$

3.3 Spektrale Analyse und Cepstrum

Aus dem Cepstrum der Ultraschallsonde (siehe Abb. 6) lassen sich drei Reflexionen erkennen, aus deren Laufzeiten sich mit Gleichung (5) die Dicke der Acrylscheiben bestimmen lässt. Zur Berechnung wird die Schallgeschwindigkeit aus 3.1.1 benutzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Dicke der Scheiben kann auch aus den Laufzeiten der Mehrfachreflexionen bestimmt werden. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 3: Aus dem Cepstrum berechnete Dicke der Scheiben.

	t [μs]	Dicke der Scheiben d [cm]
Scheibe oben	4,23	0,57
Scheibe unten	7,16	0,97
Scheiben zusammen	11,41	1,54

Tabelle 4: Aus den Laufzeiten der Mehrfachreflexionen berechnete Dicke der Scheiben.

	t [μs]	Dicke der Scheiben d [cm]
Scheibe oben	$ 30,6 - 35,1 $	0,61
Scheibe unten	$ 35,1 - 41,9 $	0,92
Scheiben zusammen	$ 30,6 - 41,9 $	1,52

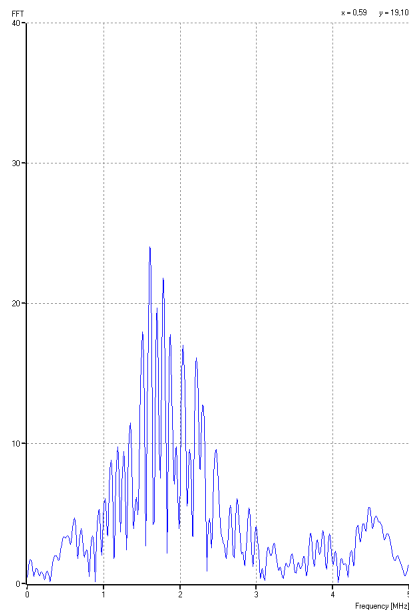


Abbildung 5: Spektrum der Ultraschallsonde.

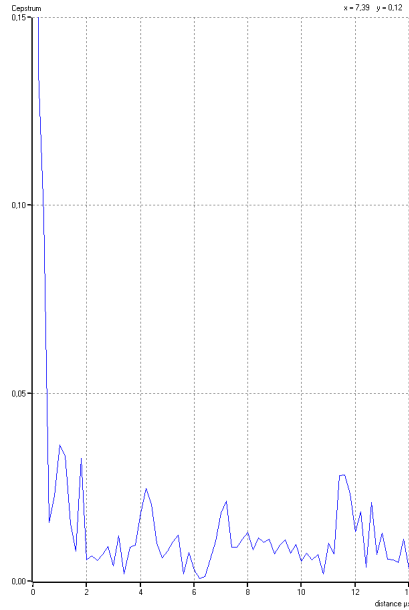


Abbildung 6: Cepstrum der Ultraschallsonde.

3.4 Abmessungen des Auges

Im richtigen Einschallwinkel lassen sich 4 Reflexionen im Auge messen (siehe Tabelle 5), die an den Grenzflächen der verschiedenen Augenbestandteile auftreten. Die Schall-

Tabelle 5: Laufzeiten der Echos im Auge.

t_1 (Iris)	t_2 (Linse Eingang)	t_3 (Linse Ausgang)	t_4 (Retina)
11,7 μs	16,2 μs	23,6 μs	73 μs

geschwindigkeit der Glaskörperflüssigkeit beträgt $c_{\text{GK}} = 1410 \text{ m/s}$ und in der Linse $c_{\text{L}} = 2500 \text{ m/s}$. Bevor die Abstände mit Gleichung (5) berechnet werden können, muss die Laufzeit bis zur Iris zweimal um die Laufzeit der Anpassungsschicht korrigiert werden.

Tabelle 6: Laufzeiten der Echos im Auge.

von	zu	Laufzeit Δt	Abmessung Augenmodell	echtes Auge (1:3)
Hornhaut	Iris	10,16 μ s	7,16 mm	2,39 mm
Iris	Linse Eingang	4,5 μ s	3,17 mm	1,06 mm
Linse Eingang	Linse Ausgang	7,4 μ s	9,25 mm	3,08 mm
Linse Ausgang	Retina	49,4 μ s	3,48 cm	1,16 cm
Hornhaut	Retina		5,44 cm	1,81 cm

4 Diskussion

Der Literaturwert von Acryl beträgt 2730 m/s. [3] Die Schallgeschwindigkeit mit dem Impuls-Echo-Verfahren c_{Echo} weicht damit um 1,21 % und die des Durchschallungsverfahrens $c_{\text{Durchschallung}}$ um 3,77 % ab. Für die Scheiben aus 3.3 wird eine Dicke von 1 cm (untere) und 0,6 cm (obere) gemessen. Die über das Cepstrum berechneten Dicken weichen für die obere Scheibe um 5 % und für die untere um 3 % ab. Die über die Laufzeiten der Mehrfachreflexionen berechneten Dicken weichen für die obere Scheibe um 1,67 % und für die untere um 8 % ab. Für das Abmessungen des Auge lassen sich Referenzwerte finden, die ungefähr den berechneten Abständen entsprechen, Dicke der Linse 3,5 mm, Durchmesser des Augapfels 22-23 mm. [2] Mögliche Gründe für Abweichungen sind zum einen die begrenzte Ablesemöglichkeit von der Schieblehre und den Grafiken des Auswertungsprogrammes. Die Längen der Körper und die Laufzeiten können also nur mit einer Unsicherheit bestimmt werden. Außerdem können die Ultraschallsonden nur mit einer begrenzten Genauigkeit die Amplituden und Laufzeiten messen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *US1, Grundlagen der Ultraschalltechnik*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf> (besucht am 03.06.2018).
- [2] *Hintergrund-Information: Das menschliche Auge in Zahlen*. URL: http://www.mathematik.de/spudema/spudema_beitraege/beitraege/rooch/fenster/auge.html (besucht am 03.06.2018).
- [3] *Material Sound Velocities*. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/> (besucht am 03.06.2018).