

Anfängerpraktikum US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Helena Nawrath
helena.nawrath@tu-dortmund.de

Carl Arne Thomann
arnethomann@me.com

Durchführung: 26. Mai 2015

Abgabe: 2. Juni 2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

Ziel

Ziel ist es, mit den Eigenschaften von Ultraschall vertraut zu werden und den Umgang damit zu erlernen. Es wird Schallgeschwindigkeit c in Acryl bestimmt, ein Acrylblock auf Materialfehler untersucht und die Abmessungen eines Augenmodells bestimmt.

1 Theorie

Schall bewegt sich in Form von Druckschwankungen als longitudinale Welle

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

durch ein Medium. Dabei ist $Z = c \cdot \rho$ die von der Materialdichte abhängige akustische Impedanz und c die richtungs- und materialabhängige Schallgeschwindigkeit. Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit nehmen die Kompressibilitätzahl κ in Flüssigkeiten und der Elastizitätsmodul E in Festkörpern. Es gilt

$$c_{\text{Fl}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \rho}} \quad , \quad c_{\text{F}_e} = \frac{E}{\rho}. \quad (2)$$

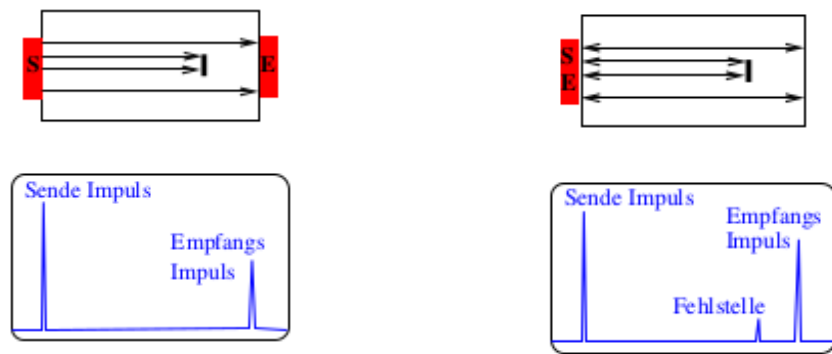
Durch die Druckschwankungen innerhalb des Materials treten Reibungseffekte auf, die zu einem Energieverlust des Schalls und damit zu einer Intensitätsabnahme führen. Je tiefer der Schall eindringt, desto geringer wird diese. Es gilt

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

mit dem negativen Absorptionskoeffizienten α . Schall besitzt die typischen Eigenschaften einer Welle und wird beispielsweise an Grenzflächen reflektiert. Dabei ist der Reflexionskoeffizient

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

Menschen besitzen die Fähigkeit Geräusche wahrzunehmen, deren Frequenz sich zwischen 16 Hz und 20 kHz befindet. Ultraschall mit 20 kHz - 1000 kHz liegt in einem nicht wahrnehmbaren Frequenzbereich. Die Eigenschaften des Schalls lassen sich in der Medizin oder Materialprüfungen ausnutzen. Dabei wird der Ultraschall mit dem reziproken piezo-elektrischen Effekt erzeugt. Ein piezo-Kristall, beispielsweise Quarz, wird in ein elektrisches Wechselfeld gebracht und zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen werden in Form von Ultraschallwellen abgestrahlt. Der Effekt lässt sich jedoch nicht nur ausnutzen, um Ultraschall zu erzeugen. Er kann ebenfalls eingesetzt werden, um den Schall zu detektieren. Wird der Kristall durch Ultraschall zum Schwingen angeregt lässt sich ein elektrisches Signal abgreifen. Um nun Materialien zu untersuchen bestehen verschiedene Möglichkeiten der Laufzeitmessung.



(a) Durchschallungsverfahren.

(b) Impuls-Echo-Verfahren

Abbildung 1: Zwei Verfahren der Materialuntersuchung.

- Durchschallungsverfahren

Der zu untersuchende Gegenstand befindet sich zwischen zwei Sonden. Der Sender schickt den Schall durch den Körper, der Empfänger detektiert ihn. Trifft der Schall dabei auf einen Materialfehler wird von dem Empfänger eine Intensität gemessen die geringer ist als der nach Gleichung (3) erwartete Wert. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass keine Aussage über den Ort des Materialfehlers getroffen werden kann.

- Impuls-Echo-Verfahren

Hier wird eine Sonde benötigt, die gleichzeitig Sender und Empfänger darstellt. Trifft der Schall nun auf die fehlerhafte Stelle wird er reflektiert, während der restliche Schall weiter durch den Körper läuft. Durch bestimmten der Laufzeit Δt kann die Lage des Fehlers über

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

gefunden werden.

Desweiteren wird zwischen A- und B-Scan unterschieden. Der Amplituden-Scan ist ein 1-dimensionales Verfahren und wird zum Abtasten der Materialstruktur genutzt. Dabei wird die Amplitude als Funktion der Laufzeit t aufgetragen. Der Brightness-Scan liefert ein 2-dimensionales Schnittbild, indem die reflektierten Amplituden als Helligkeitsabstufungen aufgetragen werden. Die Sonde muss dabei über den Körper geführt werden.

2 Durchführung

Zur Verfügung steht ein Ultraschallechoskop, welches zur Datenaufnahme mit einem Rechner verbunden ist. Benutzt wird das Programm *AScan*. Das Echoskop wird im Impulsbetrieb genutzt und kann zwischen dem Echo-Impuls- und dem Durchschallungsver-

fahren über den Schalter Reflect./Trans. wechseln. Die Ultraschallsonden mit 1 MHz, 2 MHz und 4 MHz sind farblich markiert.

2.1 Die Schallgeschwindigkeit c in Acryl

Vorab wird die Höhe der 3 Zylinder mit einer Schieblehre ausgemessen. Die Versuchsanordnung entspricht der in Abbildung 1 gezeigten.

- Echo-Impuls-Verfahren

Der A-Scan wird mit der 1 MHz- und 2 MHz-Sonde durchgeführt. Dazu werden die Zylinder auf ein weiches Papiertuch gestellt um Schäden am Material zu vermeiden. Anschließend wird ein Kontaktgel auf die Oberfläche aufgetragen und die Laufzeit Δt gemessen.

- Durchschallungsverfahren

Der A-Scan wird mit zwei 2 MHz-Sonden durchgeführt, die auf beiden Seiten des Zylinders aufliegen und erneut die Laufzeit messen.

2.2 Untersuchung eines Acrylblocks

Erneut werden die Abmessungen des Körpers mit der Schieblehre aufgenommen. Das beinhaltet Höhe, Breite und Tiefe des Blocks, sowie den Durchmesser der in Abbildung 2 gezeigten Löcher und deren Abstand zu den Kanten des Blocks. Die Löcher fungieren hier als Materialfehler, die es zu untersuchen gilt.



Abbildung 2: Anordnung der Materialfehler im Acryl-Block. [1]

- A-Scan

Mit der 2 MHz-Sonde wird die Laufzeit des Schalls mittels Echo-Impuls-Verfahren von beiden Seiten des Quaders gemessen. Dazu wird die Sonde über den Block geführt und Δt jeweils für ein Loch notiert. Als Kontaktmittel dient Wasser.

- B-Scan

Mit allen drei Sonden wird der B-Scan durchgeführt. Dazu werden die Sonden nacheinander langsam über den Quader geführt, sodass das Messprogramm ein 2-dimensionales Schnittbild entwirft.

2.3 Augenmodell

Ein Augenmodell wie in Abbildung 3 wird mit dem A-Scan und der 2 MHz-Sonde untersucht. Dazu wird das Kontaktgel auf die Oberfläche aufgetragen und unter leichtem Druck die Sondenposition so lange variiert, bis vier klar erkennbare Maxima auftreten. Diese entsprechen der Reflexion des Schalls an der Iris, den zwei Seiten der Linse und der Retina. Ein Bild des A-Scans wird aufgenommen und die Zeiten t abgelesen.

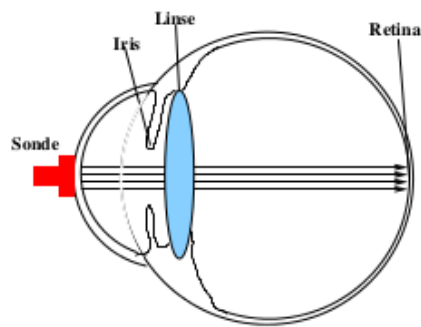


Abbildung 3: Augenmodell.

3 Auswertung

3.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acrylzyclindern

In Tabelle 1 sind die Schalllaufzeiten t in drei Acrylzyclindern verschiedener Höhe bei drei verschiedenen Frequenzen f aufgetragen; die Maße der Zylinder sind in Tabelle 2

Frequenz	Methode	Schalllaufzeit t in den Zylinder		
		$t_{\text{Klein}}/\mu\text{s}$	$t_{\text{Mittel}}/\mu\text{s}$	$t_{\text{Groß}}/\mu\text{s}$
2 MHz	IE	28,66	57,54	85,99
1 MHz	IE	29,30	58,40	87,70
2 MHz	DS	15,39	31,40	44,15

Tabelle 1: Laufzeiten des Schallimpulses in Acrylzyclindern verschiedener Höhe.

Schalllaufweg s in den Zylinder		
$s_{\text{Klein}}/\text{cm}$	$s_{\text{Mittel}}/\text{cm}$	$s_{\text{Groß}}/\text{cm}$
4,045	12,050	8,040
4,035	12,055	8,050
4,030	12,055	8,050

Tabelle 2: Abmessungen der benützten Acrylzyclindern.

angegeben. Für jede Frequenz f sind drei Messwertpaare s, t verfügbar. Der Laufweg s in den Zylinder wird in Diagramm 4 gegen die gemessene Laufzeit t gezeichnet. Bei der Impuls-Echo-Methode wird konsequent die Hälfte der gemessenen Zeit verwendet, da diese Werte die Laufzeiten für den Hin- und Rückweg beschreiben.

Jeweilige lineare Regression einer Frequenz ergeben die Steigung m und den y-Achsenabschnitt b , aus denen im Weiteren die Nullstelle $x_0 = -b/m$ berechnet werden kann. Die Regressionsparameter und Nullstellen sind in nachfolgender Tabelle 3 angegeben. Das Diagramm

Plot	Steigung $m/(\text{m/s})$	y-Abschnitt b/mm	Nullstelle x_0/s
1	2797 ± 11	$(0,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	$(-0,7 \pm 1,3) \cdot 10^{-7}$
2	2745 ± 6	$(0,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$(-7 \pm 7) \cdot 10^{-8}$
3	2776 ± 181	$(-4 \pm 6) \cdot 10^{-3}$	$(1,3 \pm 2,1) \cdot 10^{-6}$

Tabelle 3: Regressionsparameter zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

lässt die Identifikation der Steigung als Schallgeschwindigkeit zu.

Im Idealfall durchqueren die Regressionsgeraden den Koordinatenursprung. Es liegt zwischen der Sonde und der Oberfläche eine Anpassungsschicht, die systematische Fehler

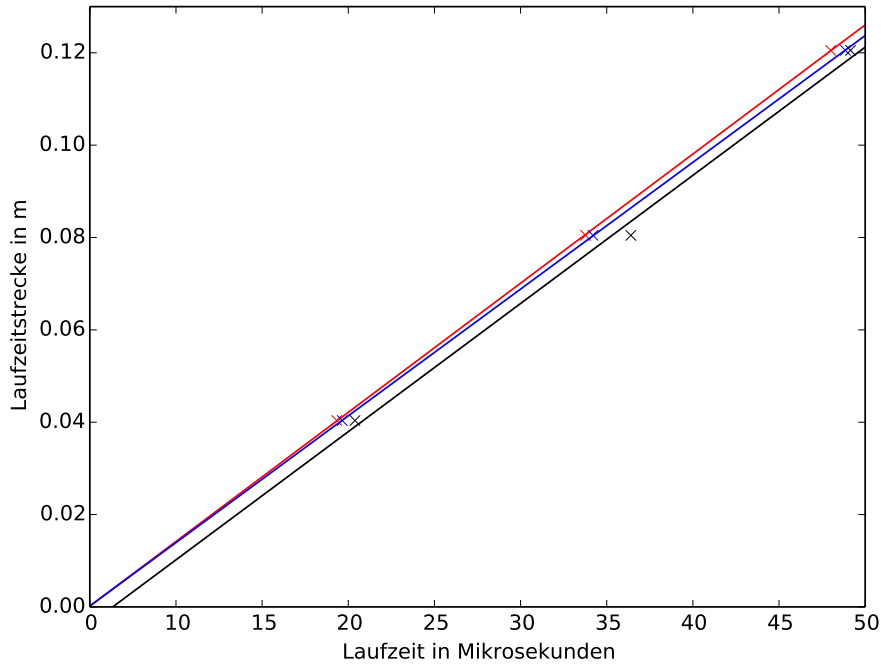


Abbildung 4: Reichweite des Schallimpulses in Abhängigkeit von der Laufzeit, Regression zur Bestimmung der Geschwindigkeit.

in der Laufzeitmessung hervorruft [1]. Diese zusätzlich auftretende Zeit wird als positive Verschiebung der Kurve nach rechts erwartet und ist in Abbildung 4 anhand der Nullstellen erkennbar. Die Nullstellen der Regressionen (vgl. Tabelle 3) weisen für die Impuls-Echo-Methode starke Unsicherheit und einen negativen Nominalwert auf. Die Nullstelle für die Durchschallungsmethode ist durch die hohe Unsicherheit ungeeignet. Der durch die Anpassungsschicht hervorgerufene Fehler kann daher nicht zuverlässig bestimmt werden und wird somit nicht berücksichtigt.

Der Mittelwert der Schallgeschwindigkeit beträgt

$$c_{\text{Schall}} = (2770 \pm 60) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6)$$

und weicht damit gering vom Literaturwert, $c = 2730 \text{ m/s}$, um 1.46 % ab.

3.2 Simulation einer Materialprüfung

Als Anwendung des Ultraschall-Verfahrens wird ein fehlerhafter Acrylblock untersucht, dessen Abmessungen in Tabelle 4 angegeben sind. Die mittels Schieblehre gemessenen Kenndaten der Fehler sind in Tabelle 5 aufgetragen, die Anordnung und Nummerierung

der Fehler sind in Abbildung 2 zu erkennen. Tabelle 6 zeigt die Laufzeiten des Ultraschalls im Block, aufgetragen sind die Laufzeiten von beidseitiger Messung. Analog zu Abschnitt 3.1 wird die Hälfte der gegebenen Zeit ausgewertet. Mithilfe der in Abschnitt 3.1, Gleichung (6) gefundenen Schallgeschwindigkeit kann die Position der Fehlerstellen über die Laufzeitmessung bestimmt werden. Die Ergebnisse sowie deren prozentuale Abweichung sind Tabelle 7 entnehmbar.

Abbildungen 5 und 6 zeigen die B-Scans des fehlerbehafteten Blocks. Erkennbar ist, dass eine Erhöhung der gewählten Frequenz f in einer höheren Auflösung resultieren, die allerdings eine geringere Intensität zeigen. Es ist daher zweckmäßig, eine größtmögliche Frequenz zu wählen, bei welcher die Störstellen eindeutig zu erkennen sind.

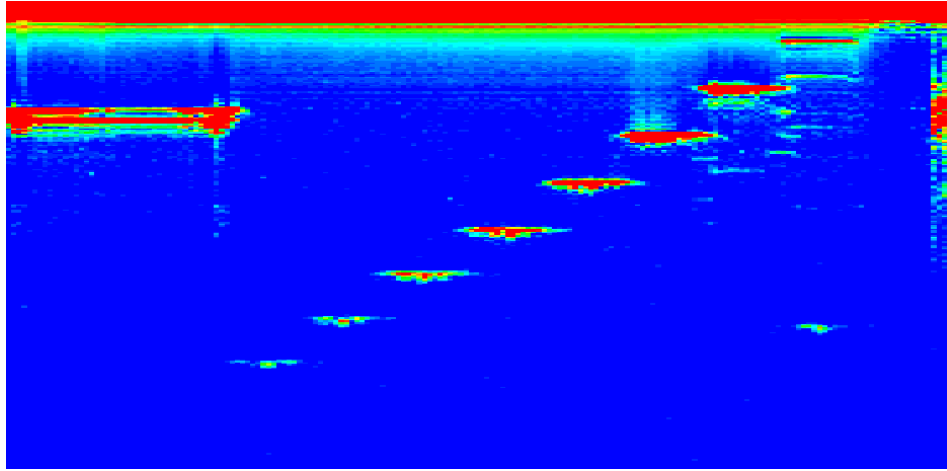


Abbildung 5: B-Scan des fehlerhaften Blocks bei der Frequenz $f = 4$ MHz

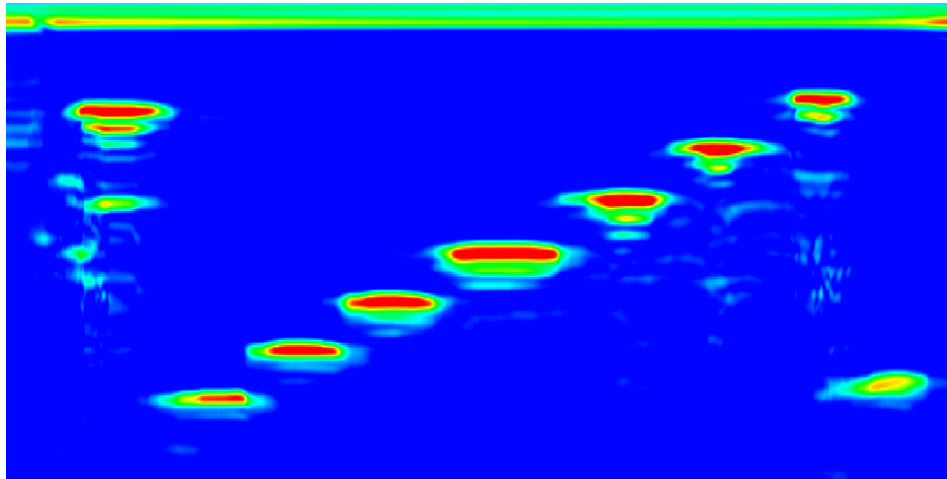


Abbildung 6: B-Scan des fehlerhaften Blocks bei der Frequenz $f = 2$ MHz

3.3 Messung an einem Modell des menschlichen Auges

Die in vorangegangenen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse über Ultraschall in Materie 3.1 und deren anwendungsbezogener Nutzen, etwa in Medizin, 3.2. wird anhand einer Messung an einem Modell des menschlichen Auges simuliert. Abbildung 7 zeigt den A-

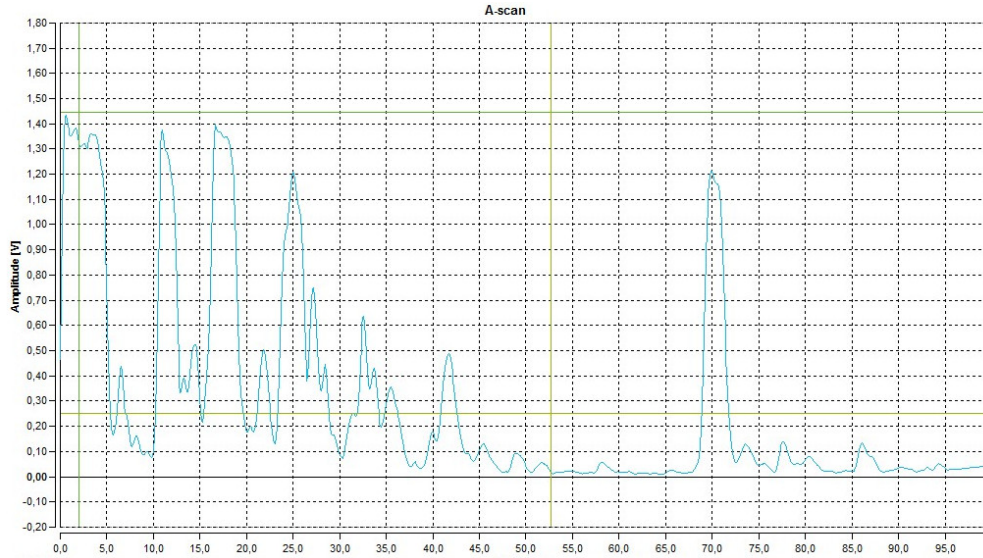


Abbildung 7: A-Scan des Augenmodells.

Scan eines vorliegenden Augenmodells. Die geringe Anzahl der deutlich separierbaren Maxima erlaubt deren Zuweisung auf die Bestandteile des Auges, an denen der Schall reflektiert worden sein könnte. Das Maximum in Umgebung von $2\mu\text{s}$ ist ein Reflexionsmaximum, die darauffolgenden Maxima mit einer Mindestamplitude von 1 V sind Hornhaut, Vorder- und Rückseite der Linse und der Retina zuzuordnen.

Mit den relativen Zeitabständen zwischen den Maxima ergeben sich Abstände im Auge, die in Tabelle 8 zu entnehmen sind. Die Schallgeschwindigkeiten sind dabei den Materialien angepasst; es gilt $c_L = 2500\text{ m/s}$ in der Linse sowie $c_{\text{GK}} = 1410\text{ m/s}$ im Glaskörper. Da das Modell im Maßstab 1:3 das menschliche Auge darstellt, kann auf die realen Werte umgerechnet werden.

Die Linsendicke, $d_{\text{Linse}} = 0,6\text{ cm}$, weicht von der Literaturangabe, etwa $0,4\text{ cm}$, um 50% ab. Der Augendurchmesser, $d_{\text{Auge}} = 3,1\text{ cm}$, weicht von der Literaturangabe, etwa $1,7\text{ cm}$ bis $2,4\text{ cm}$, vergleichbar stark ab [2]. Beide Messungen geben damit nicht mehr als die Größenordnung zuverlässig an.

Maße des Acrylblocks		
Höhe h / cm	Breite b / cm	Tiefe t / cm
15	8,035	4
15	8,030	4
15	8,030	4

Tabelle 4: Abmessungen des Acrylblocks, Skizze in Abschnitt 2, Abbildung 2

Maße der Fehler			
ID	d / mm	s_{oben} / mm	s_{unten} / mm
1	2,30	1,910	5,970
2	1,35	1,745	6,160
3	5,80	6,120	1,340
4	4,90	5,370	2,180
5	3,95	4,630	3,015
6	3,00	3,880	3,870
7	3,00	3,075	4,660
8	2,95	2,270	5,470
9	2,95	1,480	6,290
10	2,95	0,690	7,060
11	10,00	5,540	1,510

Tabelle 5: Durchmesser der Fehler und deren Abstand zur oberen und unteren Kante des Blocks.

Laufzeiten		
ID	t_{oben} / ms	t_{unten} / ms
1	12,96	42,26
2	11,49	43,94
3	43,42	8,64
4	37,62	15,60
5	32,88	21,29
6	26,77	27,61
7	21,80	32,88
8	15,07	28,89
9	8,90	44,36
10	4,00	50,69
11	39,31	9,80

Tabelle 6: Laufzeit des Schallimpulses bei Ausmessung einer Fehlerstelle ausgehend von oberer und unterer Kante des Blocks.

ID	Abstand von oberer Kante		Abstand von unterer Kante		Durchmesser	
	$a_{\text{oben}}/\text{cm}$	$a_{\text{oben}}/\%$	$a_{\text{unten}}/\text{cm}$	$a_{\text{unten}}/\%$	d/cm	$d/\%$
1	$1,80 \pm 0,04$	-5,9	$5,9 \pm 0,1$	-1,9	$4,06 \pm 0,09$	77
2	$1,59 \pm 0,04$	-8,7	$6,1 \pm 0,1$	-1,1	$4,5 \pm 0,1$	233
3	$6,0 \pm 0,1$	-1,6	$1,20 \pm 0,03$	-10,6	$4,8 \pm 0,1$	183,1
4	$5,2 \pm 0,1$	-2,9	$2,16 \pm 0,05$	-0,8	$3,05 \pm 0,07$	162,3
5	$4,6 \pm 0,1$	-1,6	$2,95 \pm 0,06$	-2,1	$1,61 \pm 0,04$	140,7
6	$3,71 \pm 0,08$	-4,4	$3,83 \pm 0,08$	-1,1	$0,116 \pm 0,003$	96,12
7	$3,02 \pm 0,07$	-1,7	$4,6 \pm 0,1$	-2,2	$1,54 \pm 0,03$	48,8
8	$2,09 \pm 0,05$	-8,0	$4,00 \pm 0,09$	-26,8	$1,92 \pm 0,04$	35,1
9	$1,23 \pm 0,03$	-16,6	$6,2 \pm 0,1$	-2,2	$4,9 \pm 0,1$	67
10	$0,56 \pm 0,01$	-19,6	$7,0 \pm 0,2$	-0,5	$6,5 \pm 0,1$	119
11	$5,5 \pm 0,1$	-1,6	$1,36 \pm 0,03$	-10,0	$4,09 \pm 0,09$	140,9

Tabelle 7: Über die Schalllaufzeit gemessene Abstände und Maße der Fehlerstellen und deren Abweichungen von der Messung per Schieblehre.

Objekte	Abstände		
	Zeit $t/\mu\text{s}$	in Modell a_0/cm	im Auge a_1/cm
Hornhaut-Linse	5.5	1.5	0.5
Linse	8	1.9	0.6
Linse-Retina	45	6.3	2.1

Tabelle 8: Abstände im Augen-Modell

4 Diskussion

4.1 Fehlerdiskussion

Für die Fehlerdiskussion verwertbare Messwerte wurden in Abschnitt 3.2, Tabelle 7 sowie in Abschnitt 3.3, Tabelle 8 beschrieben. Für die Bestimmung dieser Messwerte wurde der Betrag der Schallgeschwindigkeit in Abschnitt 3.1, Gleichung (6) gefunden. Die geringe Abweichung von dem Literaturwert bezeugt, dass es nicht zu systematischen Fehlern kam und das Grundprinzip der Messung ein zuverlässiges Ergebnis liefert.

Die starken Abweichungen bei der Bestimmung der Materialfehler a im Block von bis zu 27% und bei der Bestimmung des Lochdurchmessers d von bis zu 233%. Die starke Abweichung in der Unsicherheit im Laufe der Messung weist auf starke statistische Fehler und eine ungeeignete Wahl der Schallfrequenz hin. Die Maßstäbe des Augenmodells, das als brauchbares 1:3-Modell angenommen wird, wurden mit starker Abweichung von der Literaturangabe bestimmt. Dies weist ähnlich zum vorangegangenen Fall auf ungeeignete Wahl der Frequenz hin.

4.2 Verwendung des Ultraschall-Verfahrens

Es konnte im Experiment die Anwendbarkeit des Ultraschall-Verfahrens zur Feststellung von Materialfehlern und, bei geeignetem Aufbau sowie geeigneter Wahl der Einstellungen, die Tiefenauflösung nachgewiesen werden. Das Prinzip ist somit in Industrie zur zerstörungsfreien Fehlerprüfung und in der Medizin zur nicht-invasiven Maßnahme als bildgebendes Verfahren verwendbar.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch V605: Die Spektren der Alkali-Atome*. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V605.pdf> (besucht am 17.05.2015).
- [2] Prof. Dr. Henning Solwitsch. *Physik für Studierende der Medizin*. URL: http://www.ep5.rub.de/ag/med/VL_23.pdf (besucht am 01.06.2015).