

US 2

Scanverfahren in der Ultraschalltechnik

Timo Gräßer
timo.graesser@udo.edu

Jasper Karl Lammering
jasper.lammering@udo.edu

Durchführung: 3.5.

Abgabe: 10.5.

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie	3
1.1. Fehlerrechnung	3
1.2. Grundlagen	3
1.3. Ultraschall: Erzeugung, Anwendung und Verfahren	4
2. Aufbau und Durchführung	5
2.1. Aufbau	5
2.2. Durchführung	6
2.2.1. Untersuchung des Acrylblocks	6
2.2.2. Untersuchung des Herzmodells	6
3. Auswertung	7
3.1. Längenmessungen am Acrylblock zur Überprüfung	7
3.2. Untersuchung des Acrylblocks mit dem A-Scan	7
3.3. Untersuchung des Acrylblocks mit dem B-Scan	8
3.4. Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan	8
4. Diskussion	15
4.1. Untersuchung des Acryl-Blocks mit dem A-Scan	15
4.2. Untersuchung des Acryl-Blocks mit dem B-Scan	15
4.3. Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan	16
Literatur	16
A. Kopie der Originaldaten	16

1. Theorie

1.1. Fehlerrechnung

Für die Fehlerfortpflanzung bei Gleichungen mit N fehlerbehafteten Größen wird jeweils die Formel zur Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2} \quad (1)$$

mit der jeweiligen Funktion $f(x_i)$, den Messgrößen x_i und den zugehörigen Fehlern σ_i verwendet. Zur Berechnung des arithmetischen Mittels von N Messwerten wird jeweils die Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

mit den Messwerten x_i benutzt. die Standardabweichung des Mittelwerts wird jeweils mit der Gleichung

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

mit den N Messwerten x_i berechnet.

1.2. Grundlagen

Der Frequenzbereich des Schalls lässt sich grob in 4 Bereiche einteilen. Bis ca. 16 Hz wird von Infraschall gesprochen; von ca. 16 Hz bis 20 kHz kann der Schall von Menschen gehört werden, der sogenannte Hörschall. Darüber bis ca. 1 GHz heißt er Ultraschall, mit dem in diesem Versuch gearbeitet wird. Ab ca. 1 GHz tritt Hyperschall auf.

Nach Formel (4) ist Schall eine longitudinale Welle und bewegt sich durch Druckschwankungen fort.

$$p(x, t) = p_0 + v_0 Z \cos(\omega t - kx) \quad (4)$$

mit

$$Z = c\rho. \quad (5)$$

In Bezug auf Reflexion, Brechung und andere Aspekte ähnelt die Schallwelle der Elektromagnetischen. Allerdings ist sie über Z materialabhängig. Dabei ist Z die akustische Impedanz beziehungsweise der Schallkennwiderstand. ρ ist die Dichte des durchstrahlten Materials und c die materialspezifische Schallgeschwindigkeit. c berechnet sich bei Flüssigkeiten und Gasen, wo nur longitudinale Wellen auftreten, über Formel (6) und bei Festkörpern, bei denen auch Transversalwellen auftreten, über Formel (7).

$$c_{\text{Fl}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}}, \quad (6)$$

$$c_{\text{Fe}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (7)$$

Dabei sind die Schallwellen richtungsabhängig. Durch Absorption nimmt die Intensität exponentiell ab:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{\alpha x}. \quad (8)$$

α ist der Absorptionskoeffizient; er ist beispielweise bei Luft für Ultraschall sehr niedrig, weshalb bei Untersuchungen mit Ultraschall stets ein Kontaktmittel verwendet werden sollte.

Der Anteil des reflektierten Schalls wird durch den Reflektionskoeffizient R angegeben. Er wird mit Formel (9) berechnet und hängt von den akustischen Impedanzen Z_1 und Z_2 der angrenzenden Materialien ab.

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (9)$$

Der transmittierte Anteil ist dann mit $T = 1 - R$ gegeben.

1.3. Ultraschall: Erzeugung, Anwendung und Verfahren

Ultraschall kann durch den *piezo-elektrischen Effekt* erzeugt werden. Dazu wird ein piezo-elektrischer Kristall mit der polaren Achse in Richtung eines elektrischen Feldes platziert und so zur Schwingung angeregt. In Resonanz können große Schwingungsamplituden erreicht werden.

Außerdem kann der Kristall auch als Empfänger genutzt werden. Dann regt der Schall ihn zur Schwingung an. Oft werden Quarze verwendet.

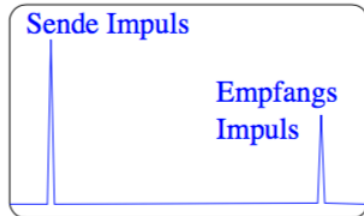
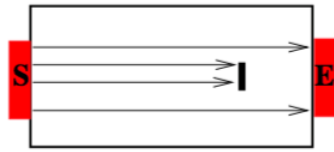
In der Medizin wird Ultraschall als Diagnosemittel eingesetzt. Hierzu wird die Laufzeit gemessen. Das geschieht auf zwei Arten: Beim Durchschallungsverfahren wird auf der einen Seite des Körpers ein Impuls eingebracht und auf der anderen Seite mit einem Empfänger aufgenommen. Dann kann anhand der Intensität gesagt werden, ob sich eine Fehlstelle in dem Körper befindet. Das Impuls-Echo-Verfahren kann im Gegensatz dazu die Position der Fehlstelle bestimmen. Hier wird ein Impuls gesendet und dann das reflektierte Signal aufgenommen. Aus der Laufzeit kann dann nach Formel (10) die Lage bestimmt werden. Die beiden Verfahren sind in den Abbildungen 1a und 1b zu sehen.

$$s = \frac{1}{2}ct \quad (10)$$

c ist die Schallgeschwindigkeit.

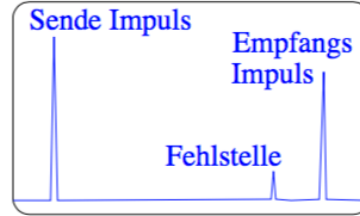
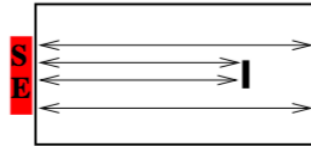
Die Darstellung der Laufzeitmessung kann anwendungsspezifisch variiert werden.

Durchschallungs-Verfahren



(a) Das Durchschallungsverfahren.[2]

Impuls-Echo-Verfahren



(b) Das Impuls-Echo-Verfahren.[2]

Abbildung 1: Die beiden Arten die Laufzeit des Ultraschalls zu messen.

- Der A-Scan (Amplituden Scan) zeigt die Echoamplituden als Funktion der Laufzeit in einem eindimensionalen Diagramm.
- Der B-Scan (Brightness Scan) zeigt nach dem Bewegen des Senders ein zweidimensionales Bild. Die Amplituden werden in unterschiedlichen Farben dargestellt.
- Der TM-Scan (Time-Motion Scan) zeigt eine zeitliche Bildfolge. Es sind also hintereinander aufgenommene B-Scans.

Mit dem TM-Scan kann beispielsweise eine Herzfrequenz ν_{Herz} gemessen werden. Werden Werte für das enddiastolische Volumen EDV, dem verdrängten Volumen des entspannten Herzmuskels, und das endsystolische Volumen EDS, also das verdrängte Volumen des maximal gespannten Herzmuskels, aufgenommen, so kann mit der Frequenz das Herzminutenvolumen mit

$$\text{HZV} = (\text{EDS} - \text{EDV}) \cdot \nu_{\text{Herz}} \quad (11)$$

bestimmt werden.

2. Aufbau und Durchführung

2.1. Aufbau

- Bei beiden Teilen des Versuchs wird die Impuls-Echo-Methode mit einer 2 MHz-Ultraschallsonde genutzt. Das Signal wird an einem Computer dargestellt und die Bilder des B-Scans und des Time-Motion-Scans werden dort elektronisch gesichert.

- Im ersten Teil wird ein Block aus Acrylglas untersucht. Er besitzt elf Bohrungen als Fehlstellen und wird mit bidestilliertem Wasser als Kontaktmittel bedeckt. Eine schematische Abbildung ist in Abbildung 2 zu sehen.
- Im zweiten Teil wird ein einfacher Nachbau eines Herzens untersucht. Das Modell besteht aus einem Doppelgefäß, getrennt von einer Membran. Die Membran wird mit einer Handpumpe periodisch gewölbt. Die Sonde hängt hierbei knapp im Wasser.

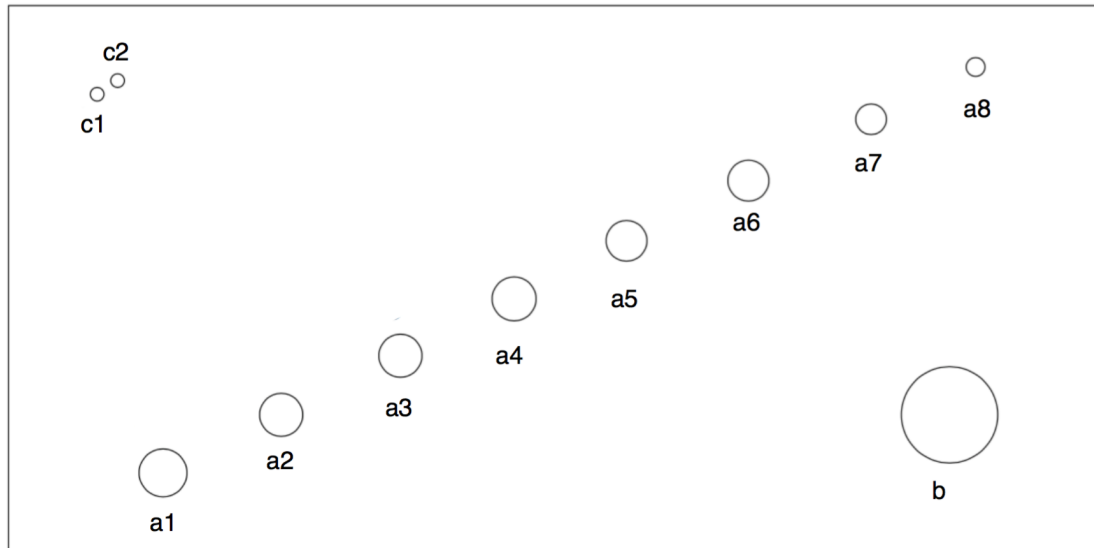


Abbildung 2: Der Acrylglasblock mit den Fehlstellen.[2]

2.2. Durchführung

2.2.1. Untersuchung des Acrylblocks

1. Zu Beginn wird der Acrylblock mit einer Schieblehre vermessen. Dabei wird Höhe, Breite, Tiefe des Blocks und der Abstand sowie Durchmesser der Löcher notiert.
2. Mit einem A-Scan wird die Laufzeit des Schalls an jedem Loch von beiden Seiten gemessen. Dabei muss die Laufzeitkorrektur beachtet werden.
3. Dann wird ein B-Scan aufgenommen, indem der Block langsam über den Block bewegt wird. Auch hier wird der Block gedreht und erneut ein Bild aufgenommen.

2.2.2. Untersuchung des Herzmodells

1. Die obere Hälfte des Modells wird zu einem Drittel mit Wasser gefüllt.
2. Mit einem A-Scan wird überprüft, ob zu jedem Zeitpunkt der Membran-Bewegung ein Signal aufgenommen werden kann.

3. Mittels eines TM-Scans wird die Bewegung der Membran aufgenommen aus der die Herzfrequenz bestimmt werden kann.

3. Auswertung

Die Literaturwerte für die Schallgeschwindigkeiten

$$c_{\text{Acryl}} = 2730 \text{ m s}^{-1}, \quad (12)$$

$$c_{\text{Wasser}} = 1480 \text{ m s}^{-1} \quad (13)$$

werden der Quelle [1] entnommen.

3.1. Längenmessungen am Acrylblock zur Überprüfung

Für die Größenabmessungen am Acrylblock werden folgende Werte aufgenommen:

$$t/\text{cm} : (4.000, 4.000) \quad (14)$$

$$b/\text{cm} : (15.025, 15.000) \quad (15)$$

$$h/\text{cm} : (8.040, 8.040) \quad (16)$$

Daraus folgen die gemittelten Werte für Tiefe, Breite und Höhe

$$\bar{t} = 4.00 \text{ cm} \quad (17)$$

$$\bar{b} = (15.01 \pm 0.02) \text{ cm} \quad (18)$$

$$\bar{h} = 8.04 \text{ cm}. \quad (19)$$

Um Vergleichswerte für die mit den Scans aufgenommenen Messwerte zu haben, werden weitere Abmessungen mit einer Schieblehre gemessen. Die Position der Löcher werden bestimmt, indem der Abstand zwischen der unteren Kante des Acrylblocks zur Mitte des jeweiligen Lochs gemessen wird. Die aufgenommenen Längen dafür, sowie für die Größe der Löcher sind in Tabelle 1 abgebildet.

3.2. Untersuchung des Acrylblocks mit dem A-Scan

Die gemessenen Laufzeiten der Schallwellen am Acrylblock bis zu den jeweiligen Störstellen und zurück zum Sender sind in Tabelle 2 dargestellt. Der Wert für a_s in der zweiten Messung kann mit dem AScan nicht festgestellt werden und daher auch nicht die zugehörige Breite der Störstelle. Nachdem die Laufzeitkorrektur

$$t_{1,A} = 0.5 \mu\text{s}, \quad (20)$$

die aus der Position des ersten, bei jeder Sensorposition konstanten, Peaks bestimmt wird, von den Werten abgezogen wird, wird mit der Formel (10) jeweils die Strecke zu jeder Störstelle bestimmt. Die berechneten Werte sind in Tabelle 3 abgebildet. Aus diesen Daten wird die Dicke der einzelnen Störstellen jeweils mit

$$d_A = h - s_{A,1} - s_{A,2} \quad (21)$$

bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgelistet.

3.3. Untersuchung des Acrylblocks mit dem B-Scan

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem B-Scan sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Daraus werden jeweils die Laufzeiten, abzüglich der Laufzeitkorrektur

$$t_{l,B} = 3 \mu\text{s}, \quad (22)$$

die aus der Dicke des roten Balkens im B-Scan bestimmt wird, und damit mit der Formel 10 die Strecken zu den jeweiligen Störstellen bestimmt. Der Durchmesser wird dann wie beim A-Scan mit (21) ausgerechnet. Die Werte dafür sind in Tabelle 5 dargestellt. Bei dem zweiten Scan kann erneut kein Messwert für die Laufzeit zu a_8 aufgenommen und daher auch kein Durchmesser für diese Störstelle ermittelt werden.

3.4. Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan

In Abbildung 5 ist das Ergebnis der Untersuchung mit dem TM-Scan abgebildet. Über einen Zeitraum von

$$t_{\text{TM}} = 18.5 \text{ s} \quad (23)$$

sind insgesamt 20 Peaks erkennbar. Daraus ergibt sich die Herzfrequenz

$$\nu_{\text{Herz}} = 1.081 \text{ Hz}. \quad (24)$$

Für den Radius der benutzten Membran wird mit der Schieblehre

$$r_{\text{M}} = 2.42 \text{ cm} \quad (25)$$

gemessen. Das enddiastolische Volumen EDV ist Null, da die Membran in entspannter Lage kein Volumen verdrängt. Das endsystolische Volumen EDS entspricht der ausgelenkten Membran. Diese wird als Halbkugel angenähert und es folgt

$$\text{EDS} = \frac{2}{3} \pi r_{\text{M}}^3 = 29.683 \text{ cm}^3. \quad (26)$$

Mit der Formel (11) folgt das Herzminutenvolumen

$$\text{HZV} = 1.93 \text{ L min}^{-1}. \quad (27)$$

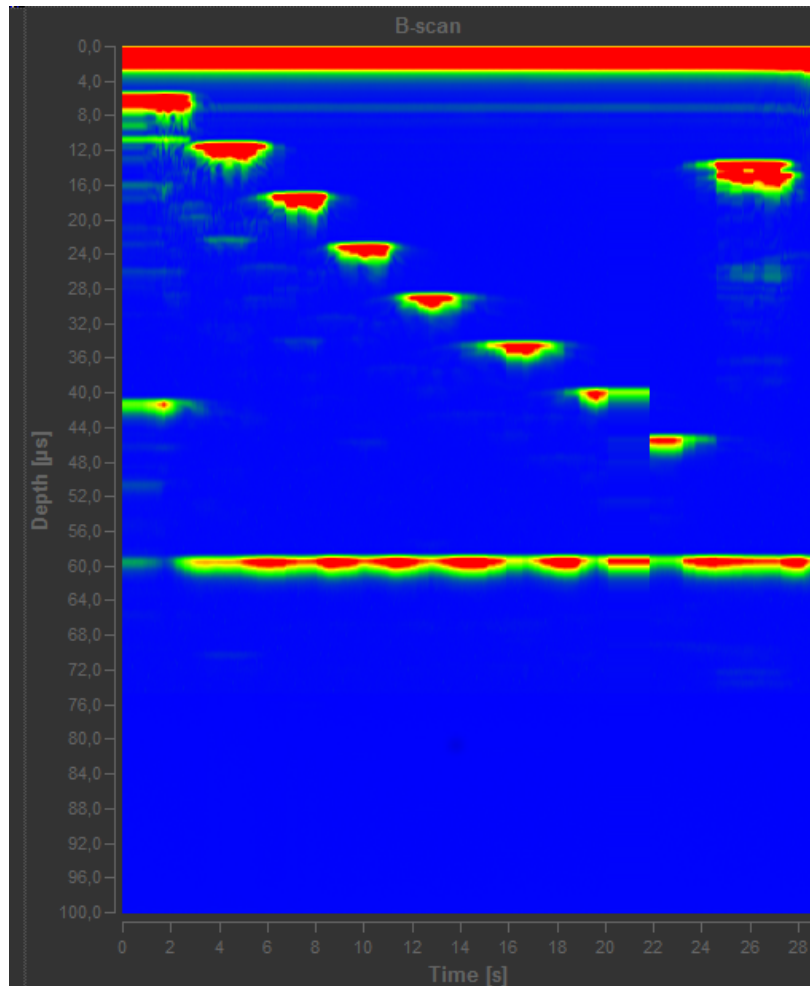


Abbildung 3: Zweidimensionales Schnittbild vom ersten B-Scan.

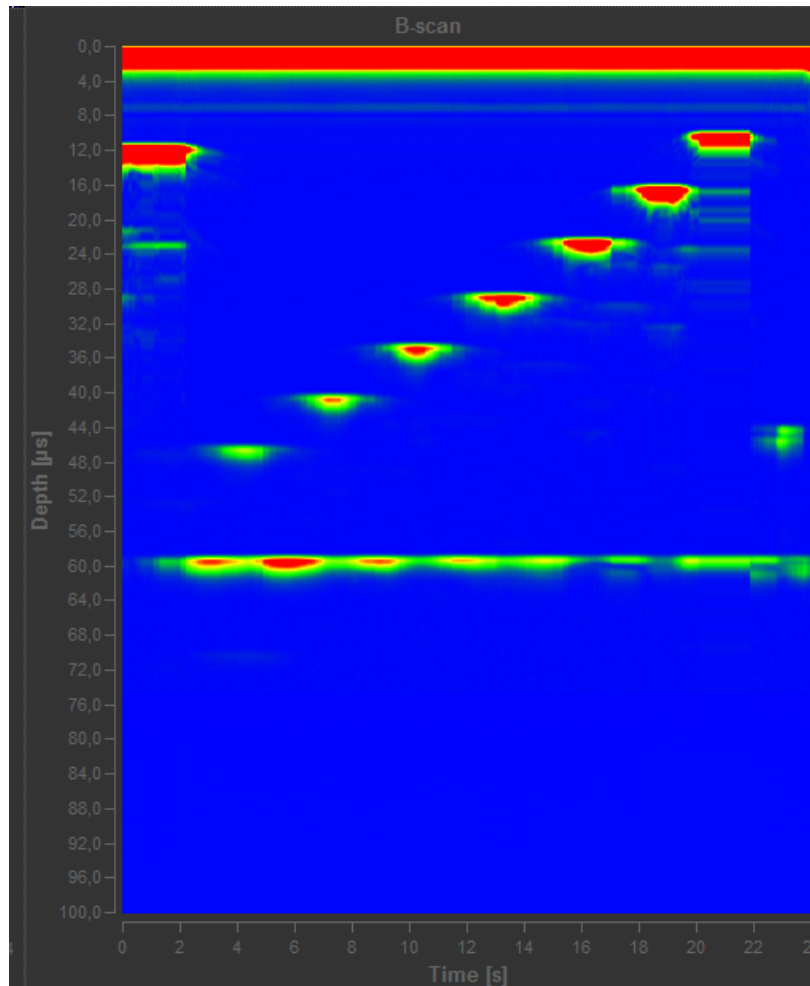


Abbildung 4: Zweidimensionales Schnittbild vom zweiten B-Scan.

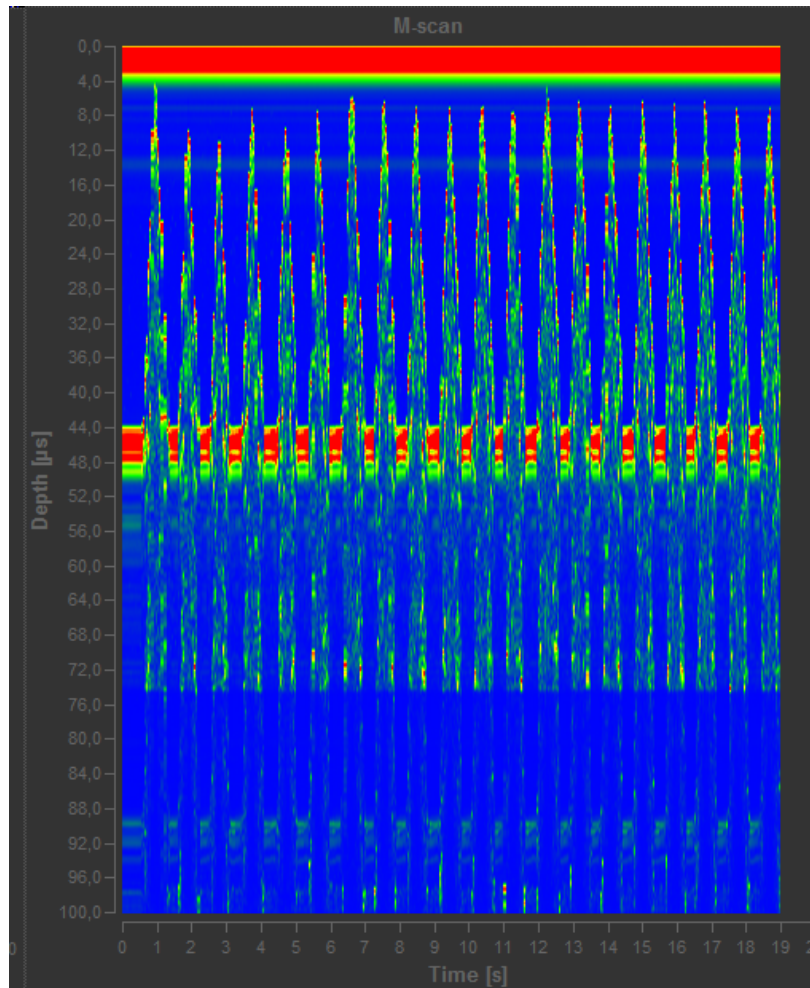


Abbildung 5: TM-Scan.

Störstelle	s_{lit}/cm	d_{lit}/cm
c1	6.020	0.180
c2	6.200	0.180
a1	1.610	0.600
a2	2.400	0.500
a3	3.170	0.425
a4	4.030	0.325
a5	4.780	0.330
a6	5.600	0.325
a7	6.400	0.320
a8	7.185	0.320
b	1.980	1.030

Tabelle 1: Messwerte für die Abstände s_{lit} zwischen der unteren Kante und dem Mittelpunkt des jeweiligen Lochs und Durchmesser d_{lit} der Löcher am Acrylblock.

Störstelle	$t_{\text{A},1}/\mu\text{s}$	$t_{\text{A},2}/\mu\text{s}$
c1	15.0	44.3
c1	13.7	45.4
a1	45.4	10.4
a2	40.0	16.5
a3	34.6	22.7
a4	29.1	29.1
a5	23.2	34.9
a6	17.4	40.8
a7	11.5	46.6
a8	6.5	
b	41.3	11.7

Tabelle 2: Messwerte für die Laufzeiten $t_{\text{A},1}$ von der oberen Seite und $t_{\text{A},2}$ von der unteren Seite bis zur jeweiligen Störstelle und zurück zum Sender.

Störstelle	$s_{A,1}/\text{cm}$	$s_{A,2}/\text{cm}$
c1	1.979	5.979
c1	1.802	6.129
a1	6.129	1.351
a2	5.392	2.184
a3	4.655	3.030
a4	3.904	3.904
a5	3.099	4.696
a6	2.307	5.501
a7	1.502	6.292
a8	0.819	
b	5.569	1.529

Tabelle 3: Berechnete Werte für die Strecken $s_{A,1}$ von der oberen Seite und $s_{A,2}$ von der unteren Seite bis zur jeweiligen Störstelle.

Störstelle	d_A/cm
c1	0.082
c1	0.109
a1	0.560
a2	0.464
a3	0.355
a4	0.232
a5	0.246
a6	0.232
a7	0.246
a8	
b	0.942

Tabelle 4: Berechnete Werte für die Abmessungen d_A der Störstellen.

Störstelle	$t_{B,1}/\mu\text{s}$	$t_{B,2}/\mu\text{s}$	$s_{B,1}/\text{cm}$	$s_{B,2}/\text{cm}$	d_B/cm
c1	13	43	1.365	5.460	1.215
c2	13	44	1.365	5.597	1.079
a1	45	10	5.733	0.956	1.352
a2	40	17	5.051	1.911	1.079
a3	34	22	4.232	2.594	1.215
a4	29	29	3.549	3.549	0.942
a5	23	34	2.730	4.232	1.079
a6	17	40	1.911	5.051	1.079
a7	11	46	1.092	5.870	1.079
a8	5		0.273		8.177
b	41	11	5.187	1.092	1.761

Tabelle 5: Messwerte für die Laufzeiten $t_{B,1}$ und $t_{B,2}$ und die Strecken $s_{B,1}$ und $s_{B,2}$ zu den jeweiligen Störstellen, abgelesen aus den Abbildungen 3 und 4, und die daraus berechneten Durchmessern d_B der jeweiligen Löcher.

4. Diskussion

4.1. Untersuchung des Acryl-Blocks mit dem A-Scan

Die relativen Fehler zwischen den Messwerten für die Positionen und Durchmesser der Störstellen, aufgenommen mit dem A-Scan, und den mit der Schieblehre bestimmten sind in Tabelle 6 aufgezählt. Die Fehler für die Positionen δs_A sind zum Großteil sehr gering und werden nicht größer als 25 %. Der A-Scan ist also ein geeignetes Mittel zur Bestimmung der Position der Störstellen. Bei den Durchmessern ist der relative Fehler deutlich größer und geht bei c_1 sogar über 50 %. Das liegt unter Anderem daran, dass bei der Aufnahme der Messwerte das absolute Maximum der Peaks abgelesen wurde. Durch diesen systematischen Fehler sind alle gemessenen Werte kleiner als die mit der Schieblehre bestimmten, da nicht exakt die Ränder der Störstellen aufgenommen wurden. Problematisch ist der A-Scan, wenn es um die Bestimmung des Durchmessers einer Störstelle, die sich exakt unter einer anderen befindet, geht. Der Großteil der Schallwellen wird bereits bei der ersten Störstelle reflektiert, sodass reflektierte Schallwellen an der unteren Störstelle kaum detektiert werden. Wird der A-Scan an der anderen Seite des zu untersuchenden Objekts durchgeführt, so kann zumindest die Position der anderen Störstelle sehr genau bestimmt werden.

Störstelle	$\delta s_A/\%$	$\delta d_A/\%$
c1	0.7	54.4
c2	1.1	39.3
a1	16.1	6.7
a2	9.0	7.2
a3	4.4	28.6
a4	3.1	25.5
a5	1.8	28.6
a6	1.8	23.2
a7	1.7	
a8		
b	22.8	8.5

Tabelle 6: Relative Fehler zwischen $s_{A,2}$ und s_{lit} und d_A und d_{lit} .

4.2. Untersuchung des Acryl-Blocks mit dem B-Scan

Die relativen Fehler zwischen den Messwerten für die Positionen und Durchmesser der Störstellen, aufgenommen mit dem B-Scan, und den mit der Schieblehre bestimmten sind in Tabelle 7 aufgezählt. Die Fehler für die Positionen sind zum Großteil gering, bis auf a_1 und b . Abweichungen lassen sich dadurch erklären, dass die Flecken auf dem B-Scan-Schnittbild zum Teil sehr groß sind und es nicht möglich ist, einen genauen Wert aufzunehmen. Die Fehler für die Durchmesser der Störstellen sind ohne Ausnahme sehr

groß. Ein Grund dafür ist, dass die Flecken auf dem B-Scan-Schnittbild sichtbar mit der Tiefe abnehmen. Das ist beispielsweise daran erkennbar, dass auf dem ersten Bild bei c_1 und c_2 jeweils eine deutlich größere rote Fläche abgebildet ist, als bei b , obwohl b einen über 5-mal so großen Durchmesser hat. Der B-Scan ist eine schnelle Methode, Messwerte aufzunehmen, aber die statistischen Fehler sind sehr groß, wenn nur eine Messung durchgeführt wird.

Störstelle	$\delta s_B/\%$	$\delta d_B/\%$
c1	9.3	575.0
c2	9.7	499.2
a1	40.7	125.3
a2	20.4	115.7
a3	18.2	185.9
a4	11.9	189.8
a5	11.5	226.8
a6	9.8	231.8
a7	8.3	237.0
a8		
b	44.8	71.0

Tabelle 7: Relative Fehler zwischen $s_{B,2}$ und s_{lit} und d_B und d_{lit} .

4.3. Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan

Der Wert für das berechnete Herzminutenvolumen beträgt

$$\text{HZV} = 1.93 \text{ L min}^{-1}. \quad (28)$$

Verglichen mit einem durchschnittlichen Herzvolumen

$$\text{HZV}_{\text{Norm}} \approx (4 \pm 1) \text{ L min}^{-1} \quad (29)$$

ist dieser Wert relativ klein. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Herzfrequenz imitiert wurde und die belastete Membran als Halbkugel genähert wurde.

Literatur

- [1] Olympus Corporation. *Schallgeschwindigkeiten im Material*. 2016. URL: www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/.
- [2] TU Dortmund. *Scanverfahren in der Ultraschalltechnik*. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallScan.pdf>.

A. Kopie der Originaldaten