

Versuchsprotokoll zum Versuch US2

Ultraschall-Scan-Verfahren

Johannes Kollek	Jean-Marco Alameddine
johannes.kollek@udo.edu	jean-marco.alameddine@udo.edu

Durchführung: 10.05.2016

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Theorie	3
1.1 Grundlagen des Ultraschalls	3
1.2 Erzeugung von Ultraschall	3
1.3 Methoden zur Untersuchung mit Ultraschall	4
2 Fehlerrechnung	5
3 Aufbau und Durchführung	6
3.1 Aufbau	6
3.2 Durchführung	7
3.3 Untersuchung des Acrylblocks	7
3.4 Untersuchung der Herzfrequenz am Herzmodell	7
4 Auswertung	8
4.1 Ausmessung des Acryl-Blocks mittels A-Scan	8
4.2 Ausmessung des Acryl-Blocks mittels B-Scan	8
4.3 Untersuchung des Herzmodells	10
4.3.1 Bestimmung der Laufzeit eines Echos in Wasser	10
4.3.2 Bestimmung der Herzfrequenz und des Herzzeitvolumens	11
5 Diskussion	13
Literatur	14

1 Theorie

1.1 Grundlagen des Ultraschalls

Als Ultraschall wird eine Welle der Form

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

mit Frequenzen im Bereich von 16 kHz bis 20 kHz bezeichnet. Der Faktor

$$Z = c\rho \quad (2)$$

wird als akustische Impedanz bezeichnet, wobei ρ die Dichte des Ausbreitungsmediums bezeichnet und c die Phasengeschwindigkeit im Medium, welche sich für einen Festkörper zu

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

sowie für eine Flüssigkeit zu

$$c_l = \sqrt{\frac{1}{\kappa\rho}} \quad (4)$$

berechnet. Hierbei steht E für das Elastizitätsmodul und κ für die Kompressibilität.

Zu Beachten ist außerdem die Ausbreitungsrichtung der Welle, welche in einer Flüssigkeit stets longitudinal ist, in Festkörpern jedoch zusätzlich transversal mit einer Richtungsabhängigen Phasengeschwindigkeit sein kann. Bei der Ausbreitung kommt es zu einer stark Mediumsabhängigen Abnahme der Intensität der exponentiellen Form

$$I(x) = I_0 \exp \alpha x. \quad (5)$$

Die Brechung und Reflexion, welche analog zu elektromagnetischen Wellen stattfindet, wird durch die akustische Impedanz Z in den beteiligten Medien durch den Zusammenhang

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (6)$$

für den Reflexionskoeffizient R und den daraus folgenden Transmissionskoeffizient $T = 1 - R$ beschrieben.

1.2 Erzeugung von Ultraschall

Zur Erzeugung von Ultraschall bietet sich die Nutzung des Piezoeffekts an, bei dem durch elastische Verformung eines Festkörpers eine elektrische Spannung auftritt. Direkt kann dieser Effekt zum Empfangen von Ultraschallwellen genutzt werden, zur Erzeugung wird der inverse Piezoeffekt genutzt. Hierbei wird ein Kristall mithilfe eines periodischen elektrischen Feldes in Schwingungen versetzt, so dass Ultraschallwellen entstehen. Aufgrund ihrer natürlichen physikalischen Eigenschaften bieten sich Quarze gut als Piezokristalle an.

1.3 Methoden zur Untersuchung mit Ultraschall

Zur Untersuchung von Proben, beispielsweise in der Medizin, werden grundsätzlich zwei verschiedene Methoden verwendet. Das Durchschallungsverfahren 1a arbeitet mit zwei Messsonden, von denen eine als Sender und die andere als Empfänger von Ultraschall dient. Falls zwischen beiden Sonden eine Fehlstelle vorhanden ist, kann dies an der absinkenden Intensität erkannt werden. Das Impuls-Echo-Verfahren 1b hingegen arbeitet nur mit einer Sonde, welche gleichzeitig den Ultraschall sendet und empfängt. Nach der Reflexion eines gesendeten Impulses trifft der Ultraschall wieder auf die Sonde, aus der Laufzeitdifferenz zwischen Senden und Empfangen kann bei bekannter Phasengeschwindigkeit somit aus dem Weg-Zeit-Gesetz auf die Tiefe einer Fehlstelle geschlossen werden.

Bei letzterer Variante ist neben der Verwendung von nur einer Sonde somit der Vorteil, dass neben der Existenz der Fehlstelle auch die genaue Tiefe ermittelt werden kann.

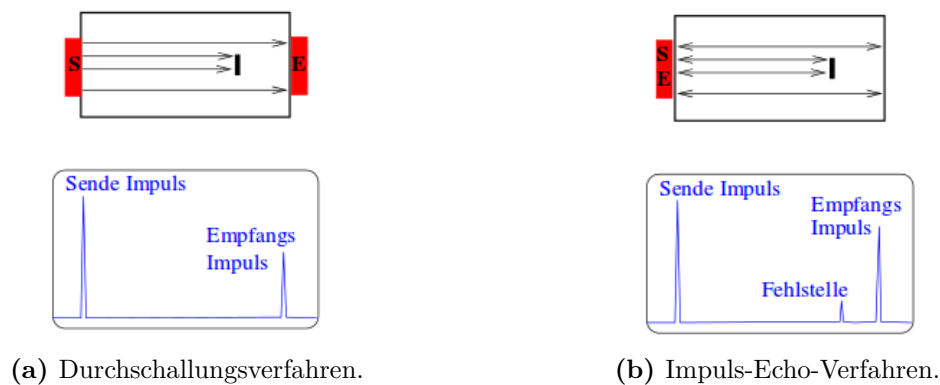


Abbildung 1: Methoden zur Untersuchung mit Ultraschall. [2]

2 Fehlerrechnung

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Formeln der Fehlerrechnung aufgelistet, welche für die folgende Versuchsauswertung benötigt werden. Der Mittelwert berechnet sich zu

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

Der Fehler des Mittelwertes berechnet sich zu

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (8)$$

Die Schätzung der Standardabweichung berechnet sich zu

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (9)$$

Für die Fehlerrechnung wird bei allen folgenden Rechnungen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (10)$$

für eine Funktion $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, bei der die Größen x_1, x_2, \dots, x_n voneinander unabhängig sind, verwendet.

Bei der linearen Regressionsrechnung gilt mit den Parametern m und b und der Ausgleichsgerade $y = mx + b$ der Zusammenhang:

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad b = \bar{y} - m\bar{x} . \quad (11)$$

Dabei sind x_i und y_i linear abhängige Messgrößen. Der Fehler dieser Parameter errechnet sich zudem zu

$$\sigma_m^2 = \frac{\sigma^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad \sigma_b^2 = \frac{\sigma^2 \bar{x}^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad (12)$$

3 Aufbau und Durchführung

3.1 Aufbau

Für diesen Versuch wird ein Ultraschallechoskop und eine 1 MHz-Ultraschallsonde verwendet. Das Echoskop befindet sich im Impuls-Echo-Modus. Zudem kann die Sende- bzw. Empfangsfrequenz regelbar verstärkt werden. Das Echoskop selbst ist an einen Rechner angeschlossen, über den verschiedene Scan-Modi ausgewählt und ausgewertet werden können. Die Computersoftware ist in der Lage, A-Scans, B-Scans und TM-Scans darzustellen.

Beim A-Scan (Amplituden Scan) wird die Intensität in Volt in Abhängigkeit von der Eindringtiefe aufgetragen.

Der B-Scan (Brightness Scan) liefert ein zweidimensionales Bild, bei dem Helligkeitsstufen die Intensität widerspiegeln.

Mit dem TM-Scan (Time-Motion Scan) wird eine zeitliche Bildfolge mittels schneller Abtastung aufgenommen.

Die zu untersuchenden Objekte sind ein Acrylblock mit elf Durchbohrungen, dargestellt in Abbildung 2, und ein Herzmodell bestehend aus einem zylindrischen Behälter, dessen Boden eine wölbbare Kreismembran ist.

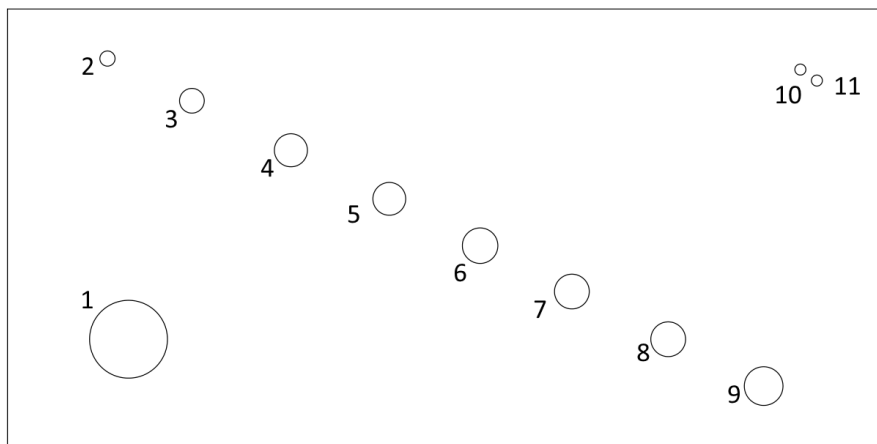


Abbildung 2: Darstellung des Acrylblocks mit durchgängigen zylindrischen Ausbohrungen. [2]

3.2 Durchführung

3.3 Untersuchung des Acrylblocks

Zunächst werden die Ausmaße des Acrylblocks, sowie die Tiefe der Bohrungen, über eine Schiebellehre bestimmt und notiert. Daraufhin wird die Oberseite des Blocks mit einer Ultraschallsonde abgefahren, während mittels Impuls-Echo-Verfahren und A-Scan die Laufzeit des Schalls begrenzt durch die Bohrungen (bzw. Fehlstellen) bestimmt wird. Als Koppelmedium wird hier wie in den folgenden Scans bidestilliertes Wasser verwendet. Nach dem Scan wird der Acrylblock umgedreht und es wird erneut gescannt. Dieses Verfahren wird nun für einen B-Scan wiederholt, wobei darauf geachtet wird, dass die Sonde mit möglichst konstanter Geschwindigkeit über den Block gefahren wird.

3.4 Untersuchung der Herzfrequenz am Herzmodell

Zuerst wird der Durchmesser der Kreismembran des Herzmodells ausgemessen. Dann wird das Modell zu einem Drittel mit Wasser gefüllt. Die Sonde wird so angebracht, dass sie nur die Oberfläche des Wassers berührt. Sind diese Vorbereitungen getroffen, wird ein TM-Scan gestartet. Während des Scans wird hydraulisch per Hand möglichst periodisch und impulsartig Luft in die Membran eingeschleust, welches einen Herzschlag simulieren soll.

4 Auswertung

4.1 Ausmessung des Acryl-Blocks mittels A-Scan

Die Ausmessung des Blocks via Schieblehre und A-Scan führt zu den Daten, welche in Tabelle 1 dargestellt sind. Hierbei beschreibt D_{oben} den mit der Schieblehre bestimmte Abstand von der

Tabelle 1: Messdaten Tiefenmessungen.

Stelle	$D_{\text{oben}} / \text{cm}$	$D_{\text{oben,gem}} / \text{cm}$	$D_{\text{unten,gem}} / \text{cm}$	$D_{\text{loch,gem}} / \text{mm}$
1	5,50	5,42	1,39	10,78
2	0,65	0,59	6,96	3,41
3	1,45	1,36	6,16	3,69
4	2,27	2,17	5,35	3,69
5	3,08	2,96	4,55	3,82
6	3,88	3,77	3,77	3,55
7	4,62	4,50	2,91	4,78
8	5,39	5,24	2,06	5,87
9	6,13	6,01	1,20	6,82
10	1,76	1,67	6,01	2,18
11	1,94	1,84	5,84	2,05

oberen Kante der Löcher bis zur Kante des Acrylblocks.

Zur Bestimmung der Durchmesser mittels A-Scan wird zunächst aus der Eintrittslaufzeit

$$t_{\text{start}} = 1,60 \mu\text{s}$$

und aus der Austrittslaufzeit

$$t_{\text{end}} = 59,40 \mu\text{s}$$

die Höhe des Blockes zu

$$h = 7,89 \text{ cm}$$

bestimmt. Aus den ermittelten Laufzeiten werden, unter Berücksichtigung der Eintrittslaufzeit, die Abstände $D_{\text{oben,gem}}$ der oberen Enden der Fehlstellen zu dem oberen Ende des Blockes sowie die Abstände $D_{\text{unten,gem}}$ der unteren Enden der Fehlstellen zu dem unteren Ende des Blockes bestimmt. Für diese Berechnung wird eine Phasengeschwindigkeit in Acryl von 2730 m s^{-1} im Weg-Zeit-Gesetz verwendet. [1]

Zusammen mit der ermittelten Höhe des Blockes ergeben sich die Durchmesser der Fehlstellen $D_{\text{loch,gem}}$.

Die Messung der kleinen Fehlstellen 10 und 11 ergibt einen Abstand von $\Delta D = 1,7 \text{ mm}$. Zudem ist anzumerken, dass der tatsächliche Abstand der beiden letzten Fehlstellen $\Delta D = 1,8 \text{ mm}$ entspricht. Folglich besitzt der A-Scan eine Auflösung von etwa $0,1 \text{ mm}$.

4.2 Ausmessung des Acryl-Blocks mittels B-Scan

Das Ergebnis des B-Scans von oben ist in Abbildung 3 wiedergegeben; das des unteren in Abbildung 4.

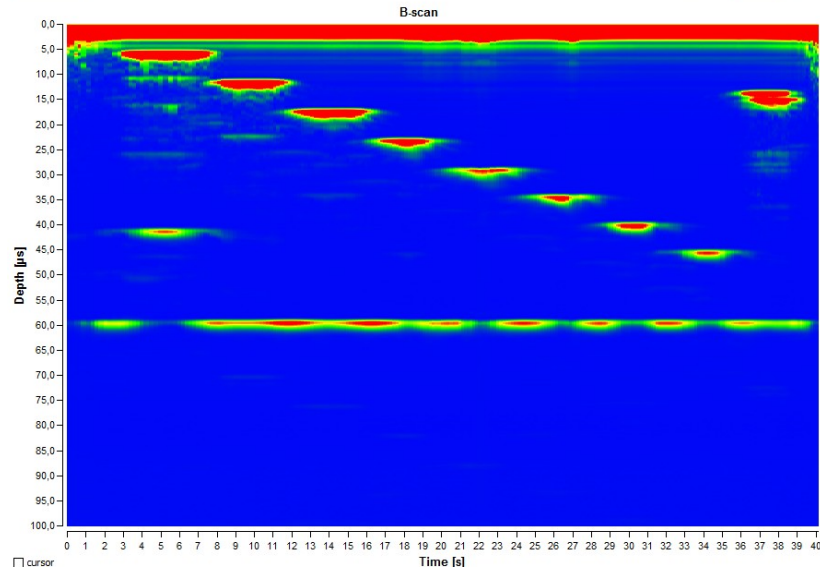


Abbildung 3: Ergebnis des B-Scans von oben.

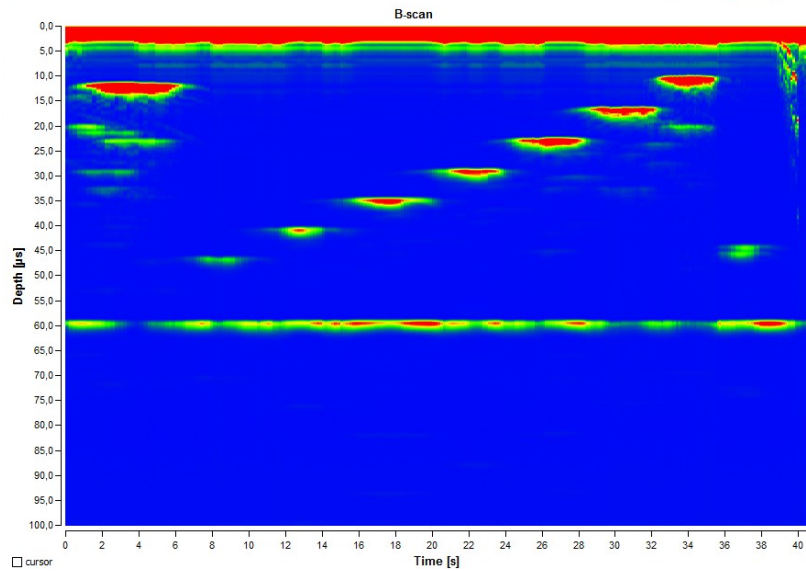


Abbildung 4: Ergebnis des B-Scans von unten.

Aus diesen beiden Grafiken ergeben sich die Messdaten aus Tabelle 2. Es wird wiederum der mit der Schieblehre bestimmte Wert D_{oben} angegeben, außerdem die aus der Laufzeit im B-Scan bestimmten Abstände der Löcher nach oben, nach unten und der daraus resultierende Fehlstellendurchmesser. Hierbei wird die Phasengeschwindigkeit in Acryl sowie die aus der Eintrittszeit

$$t_{\text{start}} = 2,75 \mu\text{s}$$

und der Austrittszeit

$$t_{\text{end}} = 58,50 \mu\text{s}$$

Tabelle 2: Messdaten Tiefenmessungen.

Stelle	$D_{\text{oben}} / \text{cm}$	$D_{\text{oben,gem}} / \text{cm}$	$D_{\text{unten,gem}} / \text{cm}$	$D_{\text{loch,gem}} / \text{mm}$
1	5,50	5,22	1,19	11,94
2	0,65	0,34	6,79	4,78
3	1,45	1,13	5,94	5,46
4	2,27	1,91	5,15	5,46
5	3,08	2,70	4,33	5,80
6	3,88	3,55	3,55	5,12
7	4,62	4,27	2,66	6,83
8	5,39	5,02	1,84	7,51
9	6,13	5,77	0,99	8,53
10	1,76	1,40	5,77	4,44
11	1,94	1,64	5,56	4,10

bestimmte Blockhöhe von

$$h = 7,61 \text{ cm}$$

berücksichtigt. In der Diskussion werden die Ergebnisse aus A- und B-Scan verglichen.

4.3 Untersuchung des Herzmodells

4.3.1 Bestimmung der Laufzeit eines Echos in Wasser

Zunächst wird ein A-Scan, der in Abbildung 5 dargestellt ist, durchgeführt.

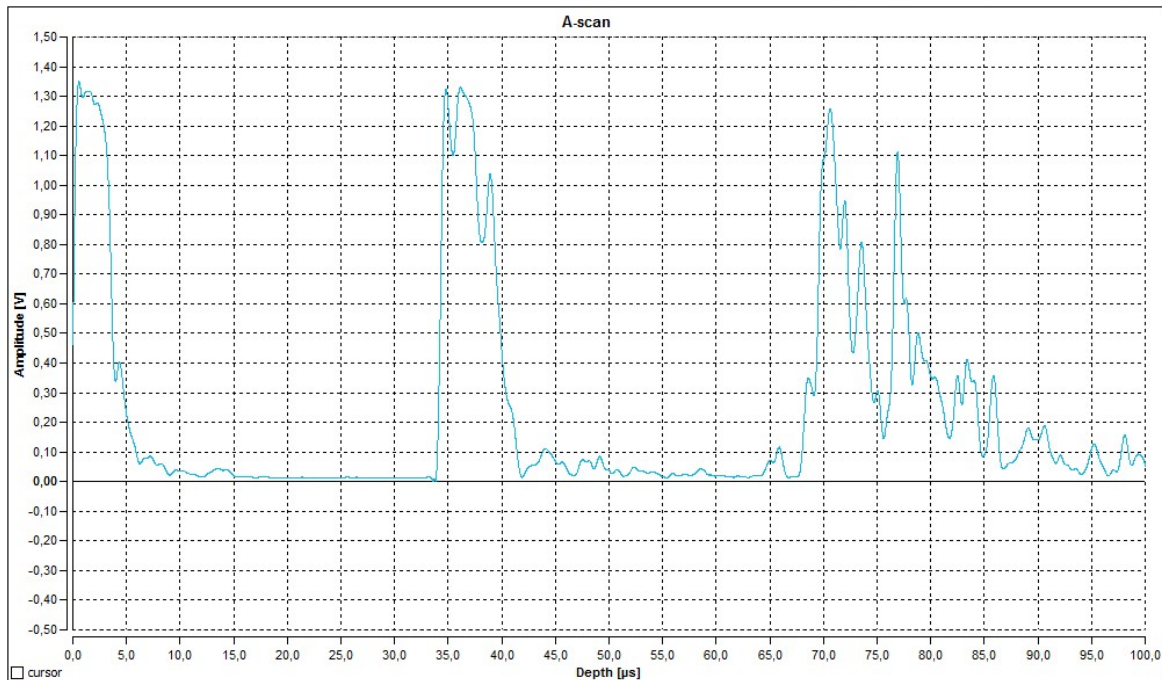


Abbildung 5: A-Scan der Herzmembran.

Es werden die Laufzeiten

$$t_1 = 1,60 \mu\text{s}.$$

sowie

$$t_2 = 34,80 \mu\text{s}.$$

abgelesen, woraus sich ein gemessener Abstand von

$$s = 2,46 \text{ cm}.$$

ergibt. Bei dieser Berechnung wird die Phasengeschwindigkeit in Wasser

$$c_{\text{Wasser}} = 1484 \text{ m s}^{-1}$$

berücksichtigt.[1]

4.3.2 Bestimmung der Herzfrequenz und des Herzzeitvolumens

Ausgangspunkt der Messung der Herzfrequenz und des Herzvolumens ist der TM-Scan aus Abbildung 6.

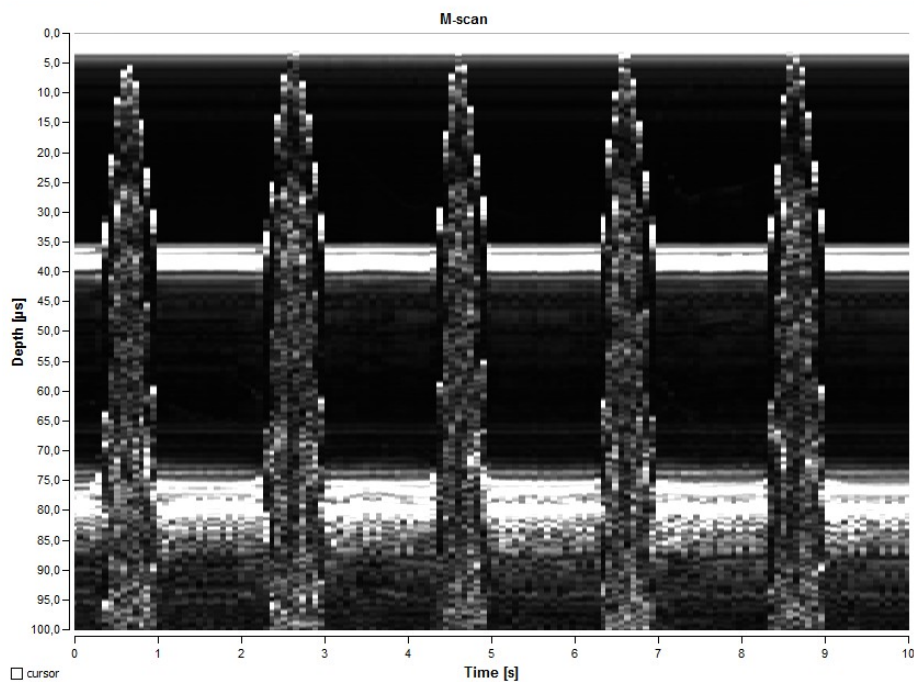


Abbildung 6: TM-Scan des schlagenden Herzmodells.

Dabei ergeben sich für die Amplituden die Werte

$$A_1 = 75 \mu\text{s},$$

$$A_2 = 77 \mu\text{s},$$

$$A_3 = 77 \mu\text{s},$$

$$A_4 = 77 \mu\text{s},$$

$$A_5 = 77 \mu\text{s}.$$

Die zeitlichen Abstände der Herzschläge betragen

$$\begin{aligned}t_1 &= 2,10 \text{ s}, \\t_2 &= 2,04 \text{ s}, \\t_3 &= 2,04 \text{ s}, \\t_4 &= 2,06 \text{ s}.\end{aligned}$$

Daraus ergibt sich eine mittlere Herzfrequenz von

$$f_{\text{Herz}} = (48,55 \pm 0,57) \text{ s}^{-1}.$$

Der endsystolische Durchmesser (ESD) wird über die Formel

$$ESD = \frac{1}{2} c_{\text{Wasser}} \cdot A \quad (13)$$

gemittelt auf

$$ESD = (5,68 \pm 0,06) \text{ cm}$$

bestimmt. Damit lässt sich nun das Herzvolumen, welches auf eine Kugel mittels

$$V_{\text{Herz}} = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{ESD}{2} \right)^3 \quad (14)$$

genähert wird, zu

$$V_{\text{Herz}} = (96,1 \pm 3,0) \text{ ml}$$

berechnet. Daraus folgt ein Herzzeitvolumen,

$$HZV = V_{\text{Herz}} \cdot f_{\text{Herz}}, \quad (15)$$

von etwa

$$HZV = (46,7 \pm 1,6) \text{ ml s}^{-1},$$

wenn das enddiastolische Volumen für diesen Modellfall als 0 angenommen wird.

5 Diskussion

Bei der Bestimmung des Auflösungsvermögens von 0,1 mm konnten die beiden kleinsten Fehlstellen auseinander gehalten werden. Um eine Verbesserung der Auflösung zu ermöglichen, müsste statt der verwendeten 1 MHz-Sonde eine Sonde mit höherer Frequenz verwendet werden.

Bei dem Vergleich der bestimmten Durchmesser der Fehlstellen ist auffällig, dass die mit dem B-Scan bestimmten Werte im Vergleich zu den mit den A-Scan bestimmten Werte durchgängig größer sind. Zudem können repräsentativ die mit der Schieblehre bestimmten oberen Abstände mit den A- bzw. B-Scan Werten verglichen werden. Hier zeigt sich, dass die Werte aus dem A-Scan eine Abweichung von durchschnittlich

$$\Delta D_A = 4,18 \%,$$

die aus dem B-Scan eine Abweichung von

$$\Delta D_B = 15,31 \%,$$

besitzen. Eine weitere Auffälligkeit zeigt sich bei der Betrachtung der berechneten Höhe des Quaders. Mittels Schieblehre wurde eine Höhe von

$$h_{\text{gem}} = 8,035 \text{ cm}$$

ermittelt, der A-Scan ergab eine Höhe von

$$h_A = 7,89 \text{ cm},$$

der B-Scan eine Höhe von

$$h_B = 7,61 \text{ cm}.$$

Dies entspricht einer Abweichung respektive

$$\Delta h_A = 1,8 \%$$

bzw.

$$\Delta h_B = 5,3 \%.$$

Aufgrund der Beobachtung, dass bereits diese Messung einen systematischen Fehler ausweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Eintrittszeit und somit die Schutzschicht nicht korrekt berücksichtigt wurden. Dies liegt an der Tatsache, dass sowohl im A- als auch im B-Scan dieser Wert nicht eindeutig abgelesen werden konnte. Insgesamt erscheint die Messung der Fehlstellen mit dem A-Scan als zuverlässiger, was sich in den geringeren Abweichungen widerspiegelt.

Im Vergleich mit Literaturwerten scheint das bestimmte Herzzeitvolumen ein realistischer Wert zu sein.

Literatur

- [1] *Schallgeschwindigkeiten im Material*. <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>. Mai 2016.
- [2] *TU Dortmund - Fachbereich Physik : Anfängerpraktikum Anleitung zu Versuch US2*. <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallScan.pdf>. Mai 2016.