

US2: Scanverfahren in der Ultraschalltechnik

Simon Schulte
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlacek
tim.sedlacek@udo.edu

Durchführung: 20.06.2017
Abgabe: 27.06.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
3 Versuchsaufbau	3
4 Versuchsdurchführung	4
5 Fehlerrechnung	5
6 Auswertung	6
7 Diskussion	13
Literatur	15

1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs ist es, verschiedene Scanverfahren zur Ultraschallechographie kennenzulernen.

2 Theorie

Als Ultraschall werden die Schallwellen bezeichnet, die eine Frequenz zwischen 20 kHz und 1 GHz haben. Ultraschalluntersuchungen finden vorallem Verwendung in der Medizin. Ultraschall ist natürlich auch Schall und Schall lässt sich als longitudinale Welle mathematisch als

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

beschreiben. Hierbei ist Z der Schallkennwiderstand, der sich als $Z = c \cdot \rho$ beschreiben lässt mit der Dichte ρ des durchstrahlten Materials und der Schallgeschwindigkeit c , welche durch das betrachtete Material festgelegt wird. Die Schallgeschwindigkeit einer Flüssigkeit lässt sich durch

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}} \quad (2)$$

berechnen. Dabei bezeichnet κ die Kompressibilität und ρ die Dichte der Flüssigkeit. Die Schallgeschwindigkeit von Festkörpern lässt sich durch

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

berechnen. Dabei bezeichnet E das Elastizitätsmodul und ρ die Dichte des Festkörpers. Die Analogie zur Schallgeschwindigkeitsberechnung in Flüssigkeiten ist gegeben durch die Beziehung $E \iff \kappa^{-1}$. Im Gegensatz zu Schall in Flüssigkeiten treten beim Schall durch Festkörper sowohl Longitudinalwellen als auch Transversalwellen auf. Dabei bezeichnet die Relation

$$I(x) = I_0 \cdot e^{\alpha x} \quad (4)$$

die Tatsache, dass die Intensität I_0 einer Schallwelle exponentiell mit der Strecke x abnimmt. Es geht Energie durch Absorption verloren. α bezeichnet dabei den Absorptionskoeffizient der Schallamplitude. Der Reflexionskoeffizient

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (5)$$

gibt das Verhältnis von reflektierter und einfallender Schallintensität an. Dabei bezeichnet $Z = \rho \cdot c$ die akustische Impedanz.

Um Ultraschall zu erzeugen wird der piezo-elektrische Effekt genutzt. Dabei wird ein piezoelektrischer Kristall in ein elektrisches Wechselfeld gegeben. Dadurch werden Schwingungen im Ultraschallbereich angeregt. Es ist auch möglich den Piezokristall als Empfänger zu nutzen. Dann regen die Schallwellen den Kristall an. Bei diesen Kristallen sind

gleichbleibende physikalische Eigenschaften sinnvoll.

Abbildung 1 zeigt das Durchschallungsverfahren. Ein Ultraschallsender sendet einen kurzzeitigen Schallimpuls aus. Dieser wird am anderen Ende des Probenstücks mit einem Ultraschallempfänger aufgefangen. Diese Methode bietet den Vorteil, dass sie zwar zuverlässig Fehlstellen im Material feststellen kann, aber nicht deren genauen Ort vorhersagen.

Durchschallungs–Verfahren

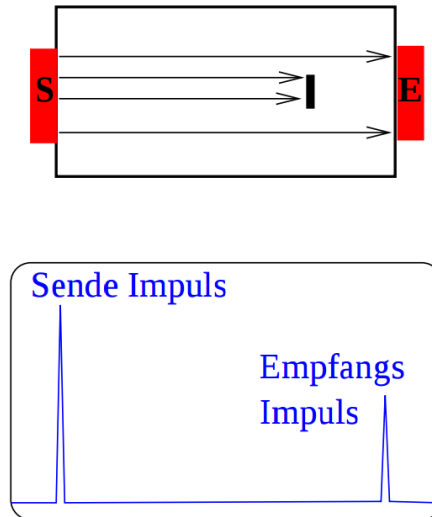


Abbildung 1: Das Durchschallungsverfahren. [TuD17]

Abbildung 2 zeigt das Impuls-Echo-Verfahren. Hier wird erneut ein Schallimpuls von einem Ultraschallsender ausgesendet. Beim Impuls-Echo-Verfahren wird dieser allerdings an einer Grenzfläche reflektiert und vom Ultraschallsender wieder aufgenommen. Somit lassen sich auch Aussagen über die Größe der Fehlstelle machen. Dafür wird die Formel

$$s = \frac{1}{2}ct \quad (6)$$

genutzt. Dabei bezeichnet c die Schallgeschwindigkeit in dem jeweiligen Medium und t die Zeit.

Impuls-Echo-Verfahren

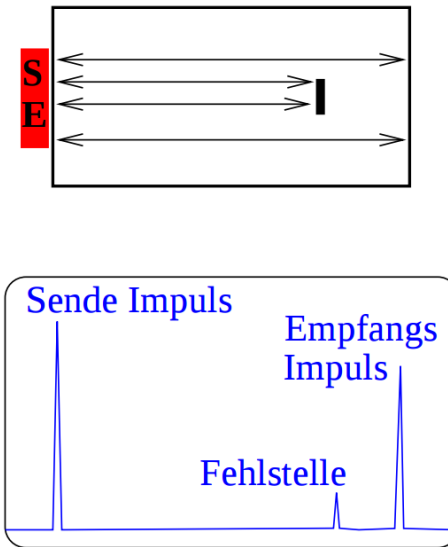


Abbildung 2: Das Impuls-Echo-Verfahren. [TuD17]

Der Amplituden Scan (A-Scan) stellt die Echoamplituden als Funktion der Zeit dar. Der A-Scan ist ein eindimensionales Scanverfahren. Der Brightness Scan (B-Scan) stellt die Echoamplituden in Helligkeitsabstufungen dar. Der B-Scan ist ein zweidimensionales Scanverfahren. Dafür muss die Sonde über das zu untersuchende Material bewegt werden. Der Time-Motion Scan (TM-Scan) kann die Bewegung eines Organs durch eine schnelle Abtastung aufnehmen.

3 Versuchsaufbau

Es werden ein Ultraschallechoskop, eine Ultraschallsonde mit einer Frequenz von 1 MHz und eine Ultraschallsonde mit einer Frequenz von 4 MHz verwendet. Diese sind an einen PC angeschlossen, welcher für die Datenaufnahme und die Datenanalyse verantwortlich ist. Als Kontaktmittel wird immer bidestilliertes Wasser genutzt.

In diesem Versuch wird ein Acrylblock mit verschiedenen Bohrungen genutzt. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des verwendeten Acrylblocks.

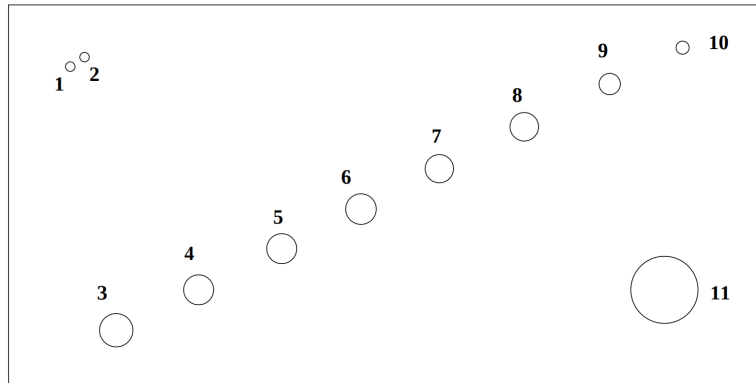


Abbildung 3: Der Aufbau des Acrylblocks. [TuD17]

4 Versuchsdurchführung

Zunächst werden die Abmessungen des verwendeten Acrylblocks mit einer Schieblehre bestimmt. Dabei ergeben sich die Werte:

$$\text{Breite} = 15,025 \text{ cm}$$

$$\text{Dicke} = 8,04 \text{ cm}$$

$$\text{Tiefe} = 4,03 \text{ cm.}$$

Danach wird mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahrens die Lage der Bohrungen im Acrylblock bestimmt. Dafür wird zunächst etwas destilliertes Wasser auf den Acrylblock getropft um danach mit einer 1 MHz Sonde den Block zu untersuchen. Als nächstes werden die Tiefen der jeweiligen Störstelle bestimmt. Dafür werden an verschiedenen Stellen mit Hilfe des A-Scans die Schalllaufzeiten gemessen. Diese Messung wird nach Umdrehen des Acrylblocks wiederholt. Mit diesen Werten ist es dann möglich die Größen der Störstellen zu bestimmen. Als nächstes werden die Bohrungen 1 und 2 genauer betrachtet. Mit einem A-Scan werden diese beiden Bohrungen nun vermessen, um das Auflösungsvermögen zu untersuchen.

Nun wird der Acrylblock mit dem B-Scan untersucht. Es wird erneut der Acrylblock mit destilliertem Wasser betröpfelt. Dann wird mit der 4 MHz Sonde der Block untersucht. Danach wird die Sonde langsam und konstant über den Acrylblock geführt, um einen genauen B-Scan zu bekommen. Danach wird der Block umgedreht und die Messung wiederholt. Als letzten Teil der Untersuchung des Acrylblocks mit dem B-Scan werden aus den erlangten Bildern die Abmessungen der Störstellen bestimmt.

Als letztes wird mit Hilfe des TM-Scans ein Herzmodell untersucht. Das Herzmodell wird dafür zu etwa einem Drittel mit Wasser befüllt und die Sonde so positioniert, dass sie grade so einen vollständigen Kontakt zur Wasseroberfläche hat. Dann wird die Laufzeit des Echos mit einem A-Scan bestimmt. Dann wird eine Herzfrequenz simuliert. Diese

wird mit einem TM-Scan aufgenommen. Mit den gemessenen Daten lässt sich dann auch das Herzvolumen bestimmen.

Für die Schallgeschwindigkeiten ergeben sich die Werte [oly17] [Spe17]:

$$\begin{aligned} v_L &= 343 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ v_W &= 1450 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ v_A &= 2730 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Dabei bezeichnet v_L die Schallgeschwindigkeit in der Luft, v_W die Schallgeschwindigkeit in destilliertem Wasser und v_A die Schallgeschwindigkeit in Acryl.

5 Fehlerrechnung

Die in der Auswertung verwendeten Mittelwerte mehrfach gemessener Größen sind gemäß der Gleichung

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

bestimmt. Die Standardabweichung des Mittelwertes ergibt sich dabei zu

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

Resultiert eine Größe über eine Gleichung aus zwei oder mehr anderen fehlerbehafteten Größen, so berechnet sich der Gesamtfehler nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung zu

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2}. \quad (9)$$

Alle in der Auswertung angegebenen Größen sind stets auf die erste signifikante Stelle des Fehlers gerundet. Setzt sich eine Größe über mehrere Schritte aus anderen Größen zusammen, so wird erst am Ende gerundet, um Fehler zu vermeiden. Zur Auswertung wird das Programm Python verwendet.

6 Auswertung

Zu Beginn werden die Positionen und Größen der Störstellen im Acrylblock mit einem A-Scan mit der 1 MHz-Sonde bestimmt. Dazu werden die in Tabelle 1 stehenden Werte für die Laufzeiten gemessen. Diese werden um $1,8\mu\text{s}$ korrigiert, da dies der Dicke des Ausgangssignals entspricht und somit der Dicke der Schutzschicht. Der Wert wird graphisch aus der Dicke des roten Streifens bei den B-Scans bestimmt. Beispielhaft sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 die Verläufe für das sechste und das neunte Loch dargestellt.

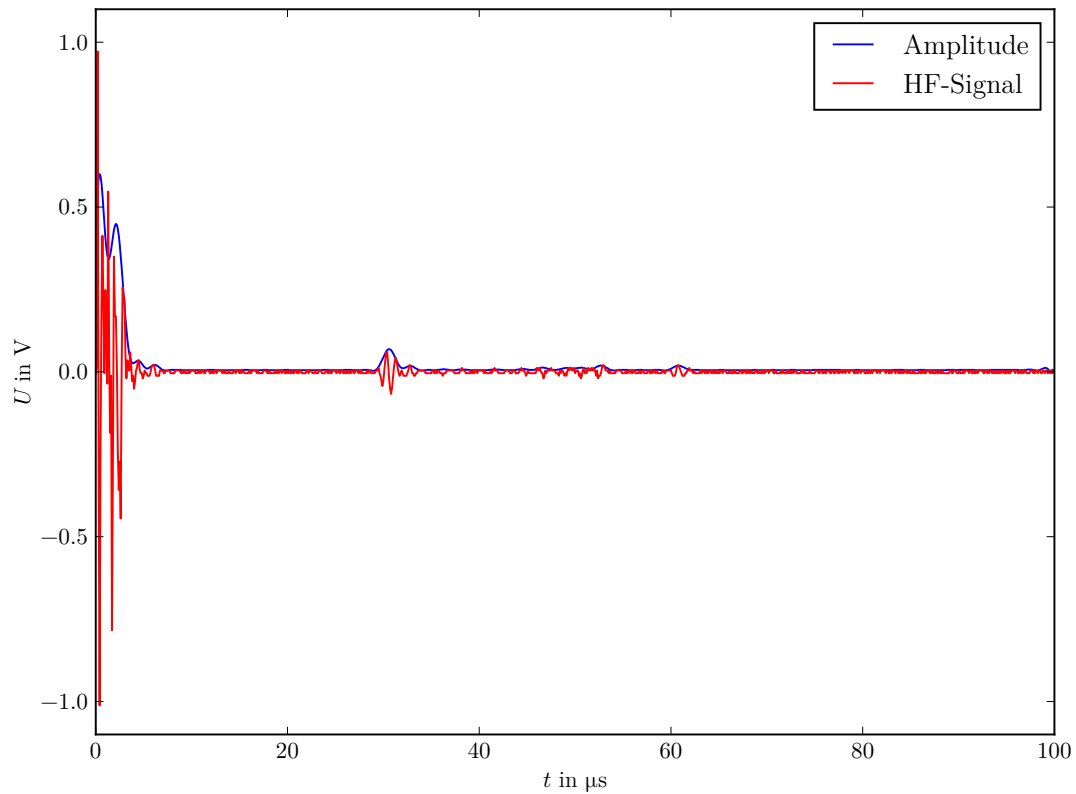


Abbildung 4: A-Scan Loch Nr.6.

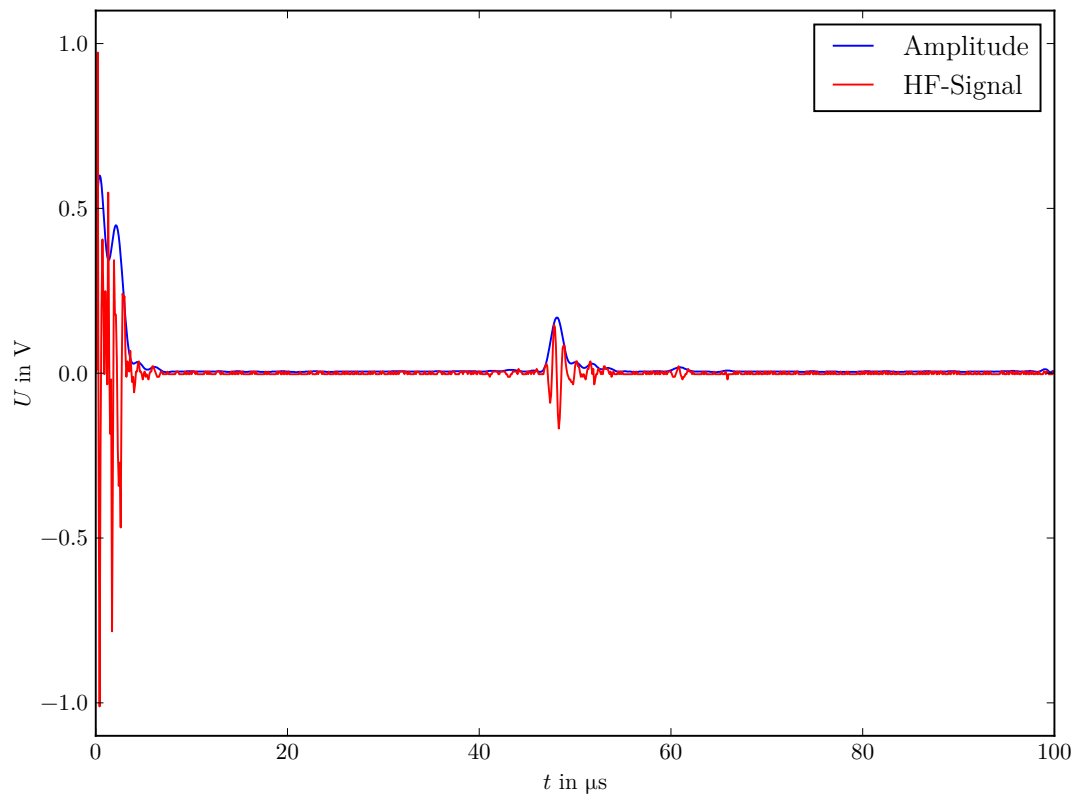


Abbildung 5: A-Scan Loch Nr.9.

Nach Formel (6) lässt sich aus den Laufzeiten der Abstand bestimmen. c beträgt dabei für den Acrylblock

$$c = 2730 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Durch Abziehen beider Abstände von der Gesamtdicke des Blocks ergeben sich die Größen g der Störstellen. Die daraus resultierenden Positionen und Größen der Störstellen stehen ebenfalls in Tabelle 1.

Tabelle 1: Messwerte und Ergebnisse beim A-Scan.

Loch Nr.	t_1 in μs (ohne Korrektur)	t_2 in μs (ohne Korrektur)	s_1 in cm (mit Korrektur)	s_2 in cm (mit Korrektur)	g in cm
1	18,1	45,5	2,22	5,97	-0,15
2	15,6	46,7	1,88	6,13	0,03
3	46,9	11,7	6,16	1,35	0,53
4	41,5	18,9	5,42	2,33	0,29
5	35,9	24,3	4,65	3,07	0,31
6	30,6	30,6	3,93	3,93	0,18
7	24,6	36,3	3,11	4,71	0,22
8	18,8	42,2	2,32	5,51	0,20
9	12,9	48,1	1,52	6,32	0,20
10	7,0	53,1	0,71	7,00	0,33
11	42,6	13,3	5,57	1,57	0,90

Nun soll das Auflösungsvermögen untersucht werden. Hierzu werden die ersten beiden Löcher ein zweites mal, mit einer 4 MHz-Sonde, vermessen. Die Messwerte und Ergebnisse stehen in Tabelle 2.

Tabelle 2: Messwerte und Ergebnisse beim A-Scan mit 4 MHz.

Loch Nr.	t in μs (ohne Korrektur)	s in cm (mit Korrektur)
1	14,9	1,79
2	13,7	1,62

Die Positionen und Größen der Störstellen werden nun mit B-Scans erneut gemessen. Bei der 1 MHz-Sonde werden die Abstände graphisch ausgewertet. Während bei der 4 MHz-Sonde die Abstände mit dem Messprogramm bestimmt werden. Die Ergebnisse stehen in den Tabellen 3 und 4. Die bei den Scans entstehenden Bilder sind in den Abbildungen 6 bis 9 zu sehen.

Tabelle 3: Messwerte und Ergebnisse beim ersten B-Scan.

Loch Nr.	s_1 in cm	s_2 in cm	g in cm
1	1,7	6,0	0,3
9	1,3	6,0	0,3
2	1,7	1,2	0,7
3	6,1	2,0	0,7
4	5,3	2,9	0,5
5	4,6	3,8	0,3
6	3,9	4,6	0,4
7	3,0	5,4	0,4
8	2,2	6,2	0,5
10	0,5	/	/
11	5,5	1,4	1,1

Tabelle 4: Messwerte und Ergebnisse beim zweiten B-Scan.

Loch Nr.	t_1 in μs (ohne Korrektur)	t_2 in μs (ohne Korrektur)	s_1 in cm (mit Korrektur)	s_2 in cm (mit Korrektur)	g in cm
1	15,8	/	1,91	/	/
2	14,5	/	1,73	/	/
3	46,3	11,4	6,07	1,31	0,66
4	40,9	17,5	5,34	2,14	0,56
5	35,3	23,6	4,57	2,98	0,49
6	29,9	29,7	3,84	3,81	0,40
7	23,9	35,6	3,02	4,61	0,41
8	18,3	41,5	2,25	5,42	0,37
9	12,6	47,4	1,47	6,22	0,34
10	7,0	/	0,71	/	/
11	42,2	12,7	5,51	1,49	1,04

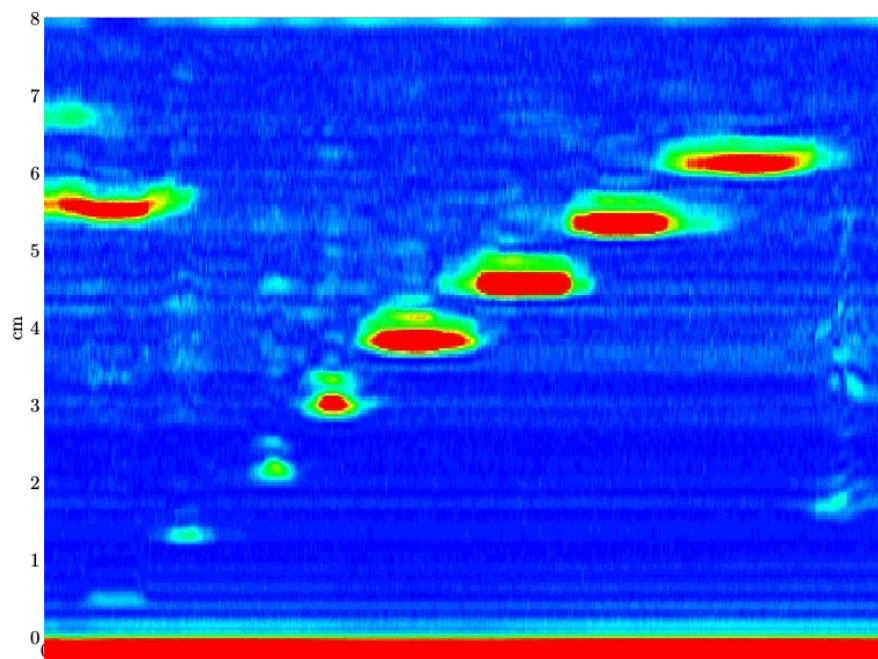


Abbildung 6: B-Scan mit 1 MHz.

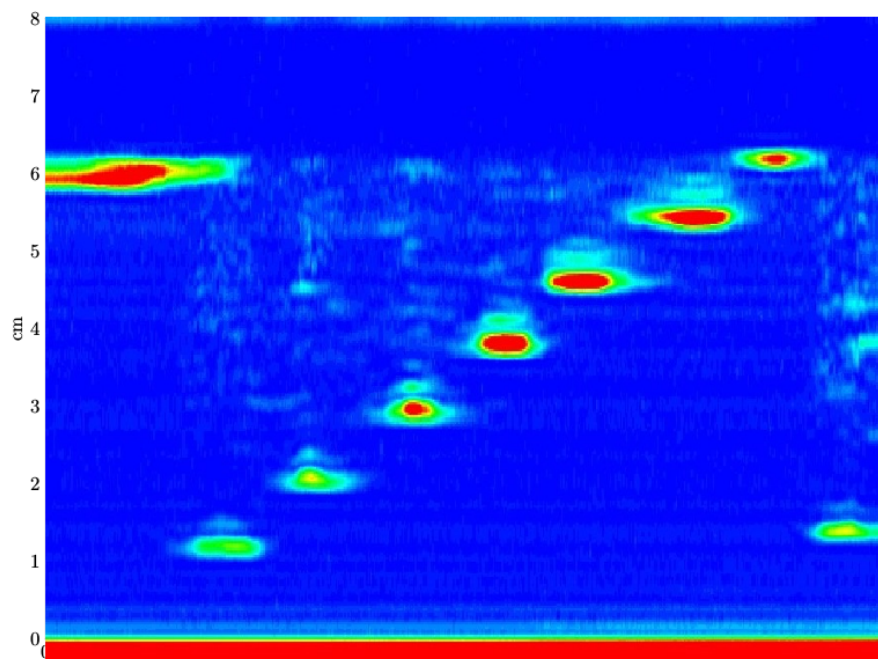


Abbildung 7: B-Scan mit 1 MHz nach umdrehen des Blocks.

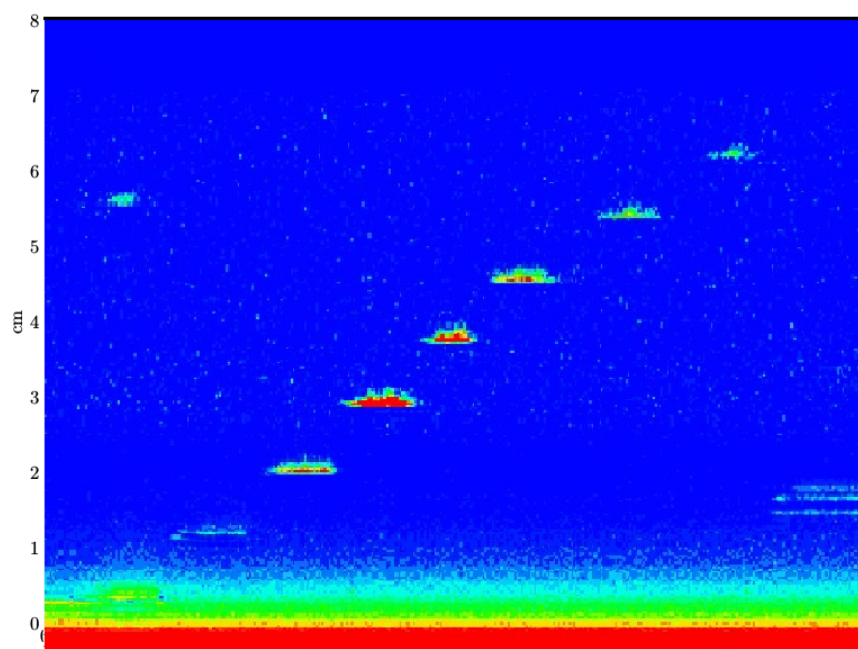


Abbildung 8: B-Scan mit 4 MHz.

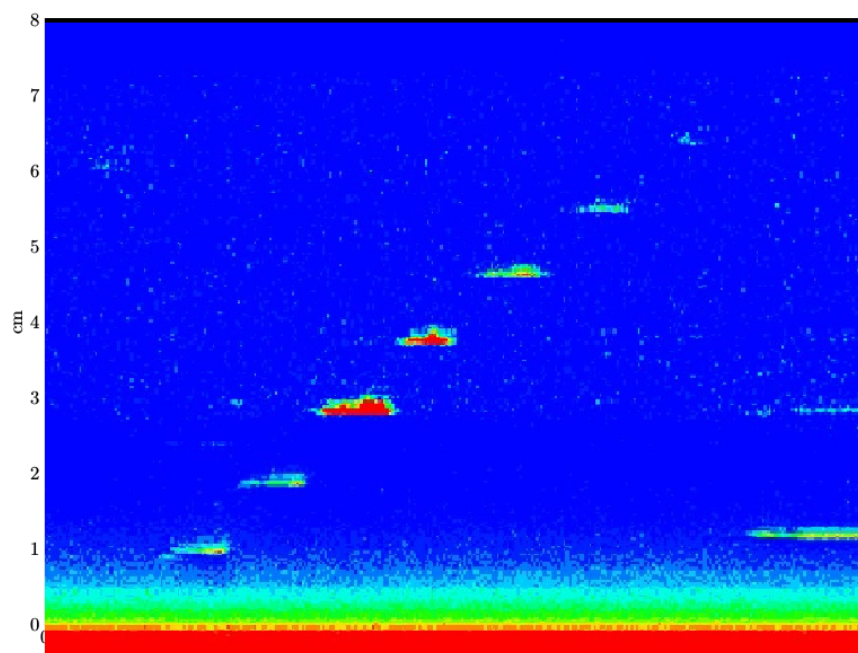


Abbildung 9: B-Scan mit 4 MHz nach umdrehen des Blocks.

Schließlich wird noch das Herzvolumen eines Herzmodels bestimmt. Dazu wird die Frequenz bestimmt mit der das Herz aufgepumpt wird und die durchschnittliche maximale Höhe der Membrane. Aus den Abständen der Maxima ergibt sich eine Frequenz von 2 Hz. Für die Ersten 11 Maxima von rechts werden die Auslenkungen der Membrane bestimmt. Die Ergebnisse davon stehen in Tabelle 5 und das entsprechende Bild ist in Abbildung 10 zu sehen.

Tabelle 5: Messwerte und Ergebnisse beim ersten B-Scan.

Maximum Nr.	h in cm
1	2,23
9	2,44
2	2,34
3	2,44
4	2,34
5	2,28
6	2,39
7	2,54
8	2,28
10	2,28
11	2,28

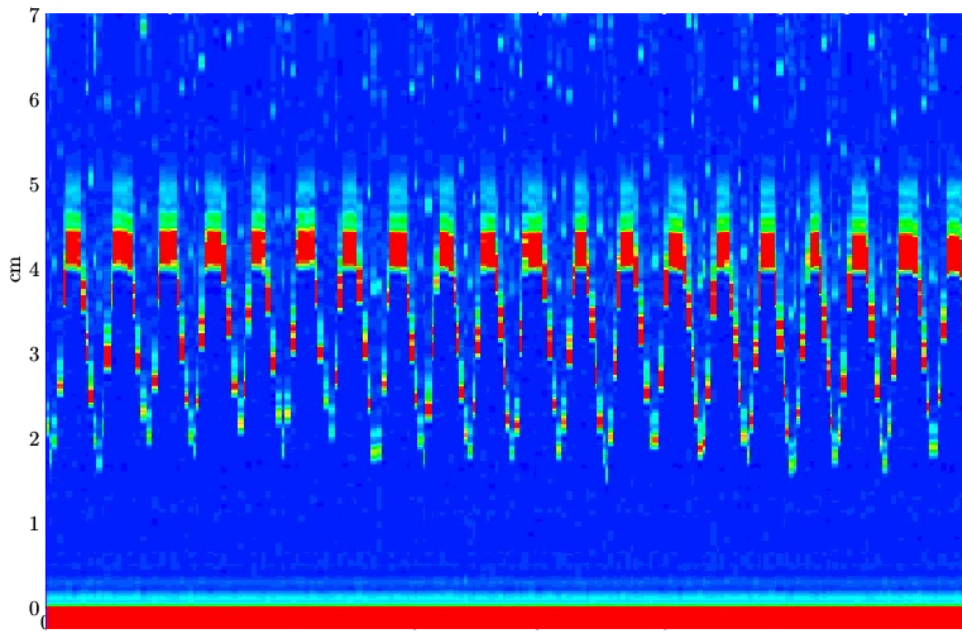


Abbildung 10: TM-Scan des Herzmodels.

Die Höhen werden zu

$$h = (2,35 \pm 0,03) \text{ cm}$$

gemittelt.

Näherungsweise wird für die Form der Membrane ein Rotationsparaboloid angenommen. Dessen Volumen berechnet sich nach

$$V = \frac{\pi}{2} r^2 \cdot h. \quad (10)$$

Dabei ist $r = \sqrt{h}$. Somit ergibt sich mit der zuvor bestimmten Höhe ein enddiastolisches Volumen von

$$V = (8,7 \pm 0,2) \text{ cm}^3.$$

Durch multiplikation mit der Frequenz folgt das Herzvolumen

$$HZV = (17,3 \pm 0,4) \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}.$$

7 Diskussion

In Tabelle 6 stehen die Ergebnisse vom A- und vom B-Scan.

Tabelle 6: Ergebnisse A-/B-Scan.

Loch Nr.	A-Scan 1 MHz g in cm	B-Scan 1 MHz g in cm	B-Scan 4 MHz g in cm
1	-0,15	0,3	/
2	0,03	0,3	/
3	0,53	0,7	0,66
4	0,29	0,7	0,56
5	0,31	0,5	0,49
6	0,18	0,3	0,40
7	0,22	0,4	0,41
8	0,20	0,4	0,37
9	0,20	0,5	0,34
10	0,33	/	/
11	0,90	1,1	1,04

Die Größen liegen bei allen drei Messungen im gleichen Bereich. jedoch weicht der A-Scan etwas stärker von den B-Scans ab. Ein Loch hat demnach sogar eine negative Größe. Das liegt wahrscheinlich daran, dass die Korrektur aus dem B-Scan bestimmt wurde und dadurch nicht ganz zu dem A-Scan passt. Insgesamt sind einige kleine Schwankungen zu sehen, was an Ablesefehlern liegen könnte, da sich die entsprechenden Stellen, wie in den Abbildungen zu sehen ist, über einen größeren Bereich strecken. Diese Bereiche werden mit zunehmender Frequenz des Ultraschalls kleiner und schärfer. Die Größen, die bei 4 MHz

gemessen wurden wirken am sinnvollsten. Manche Größen sind bei den B-Scans nicht messbar, da die entsprechenden Störstellen im Schattenbereich einer anderen Störstelle liegen oder wegen zu großer Distanzen nicht mehr von der Sonde erfasst wurden. Zu dem Auflösungsvermögen gibt es die in Tabelle 7 stehenden Ergebnisse.

Tabelle 7: Ergebnisse bei der Messung des Auflösungsvermögens.

Loch Nr.	1 MHz	4 MHz
	s in cm	s in cm
1	2,22	1,79
2	1,88	1,62

Die Werte unterscheiden sich ebenfalls um 0,2 cm bis 0,5 cm. Bei der Messung mit der 1 MHz-Sonde waren die beiden Löcher jedoch kaum zu unterscheiden. Erst mit der 4 MHz-Sonde waren die beiden einzelnen Störstellen gut zu unterscheiden.

Mit der Messung des Herzvolumens ist gut zu sehen, dass die Ultraschalltechnik trotz gewisser Ungenauigkeiten bzgl. exakter Abstände gut für medizinische zwecke geeignet ist. Die Ungenauigkeiten lassen sich sogar mit entsprechend hohen Frequenzen minimieren.

Literatur

- [Hun07] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [J+] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u.a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [Leb] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [Oli07] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [oly17] olympus-ims.com. *Tutorial für Dickenmessung: Schallgeschwindigkeiten im Material*. 26. Juni 2017. URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>.
- [Spe17] Spektrum.de. *Lexikon der Astronomie: Schallgeschwindigkeit*. 26. Juni 2017. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schallgeschwindigkeit/423>.
- [TuD17] Tu-Dortmund. *Versuch US2: Scanverfahren in der Ultraschalltechnik*. 26. Juni 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallScan.pdf>.