

US2

Scanverfahren in der Ultraschalltechnik

David Rolf

david.rolf@tu-dortmund.de

Jonah Blank

jonah.blank@tu-dortmund.de

Durchführung: 08.05.2018

Abgabe: 15.05.2018

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Ausbreitung von Schall im Medium	3
2.2 Reflexion, Transmission und Absorption von Schall	3
2.3 Erzeugung von Ultraschall und Anwendung	4
3 Durchführung	4
3.1 Untersuchung des Acrylblocks auf Fehlstellen	4
3.2 Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan	5
4 Auswertung	5
4.1 A-Scan	5
4.2 B-Scan	6
4.3 TM-Scan	8
5 Diskussion	11
Literatur	12

1 Zielsetzung

In dem Versuch sollen mithilfe eines A- und B-Scans die Fehlstellen in einem Acrylblock untersucht werden. Zudem wird mit einem TM-Scan das Volumen und die Frequenz eines Herzmodells bestimmt.

2 Theorie

2.1 Ausbreitung von Schall im Medium

Als Ultraschall wird der Schall im Frequenzbereich von $2 \cdot 10^4$ Hz bis 10^9 Hz bezeichnet. In Gasen und Flüssigkeiten pflanzen sich Schallwellen longitudinal durch Druckschwankungen fort, welche als

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

geschrieben werden können. Dabei wird $Z = c\rho$, mit der Schallgeschwindigkeit im Medium c und der Dichte ρ des Mediums, akustische Impedanz genannt, die dazu führt, dass die Ausbreitung des Schalls abhängig vom Medium ist. Die Schallgeschwindigkeit hängt ebenfalls von der Dichte ab und wird bei Flüssigkeiten mit der Kompressibilität κ berechnet über

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

In Festkörpern hingegen können auf Grund von Schubspannungen auch transversale Wellen auftreten, weshalb c hier über den Elastizitätsmodul definiert ist:

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

2.2 Reflexion, Transmission und Absorption von Schall

Die Intensität einer Schallwelle nimmt exponentiell mit dem Abstand ab:

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

Der Absorptionskoeffizient α ist dabei vom Medium abhängig. Beim Übergang von einem Medium in ein anderes wird der Teil

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

der einfallenden Intensität reflektiert. Der Rest, also

$$T = 1 - R, \quad (5)$$

wird transmittiert. T und R werden dabei Transmissions- und Reflexionskoeffizient genannt.

2.3 Erzeugung von Ultraschall und Anwendung

Erzeugt wird Ultraschall durch Einbringen eines piezoelektrischen Kristalls in ein wechselstrombetriebenes E-Feld. Ein Einstellen auf die Resonanzfrequenz führt zu großen Schwingungsamplituden. Verwendung finden Ultraschall-Untersuchungen in der Medizin um Informationen über das Körperinnere zu erhalten ohne ihn zu beschädigen.

Dabei ist die eine Verfahrensweise die Durchschallungs-Methode bei der Sender und Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten der Probe liegen. Der Sender erzeugt einen kurzen Schallimpuls, der vom Empfänger erhalten wird. Sind Fehlstellen im Körper enthalten, so ist die Intensität des empfangenen Impulses geringer. Eine genaue Lokalisierung und Beschaffenheitsanalyse der Fehlstellen ist jedoch nicht möglich.

Die zweite Möglichkeit ist das Impuls-Echo-Verfahren. Hier ist der Sender auch gleichzeitig der Empfänger. Hier wird der Impuls ausgesendet, am Ende des Körpers reflektiert und nach dem zweiten Durchlaufen des Körpers wieder empfangen. Hierbei lassen sich Lage und Größe einer Fehlstelle über

$$l = \frac{1}{2}c\Delta t \quad (6)$$

bestimmen, wobei c die Schallgeschwindigkeit und Δt die Laufzeit des Impulses ist.

Dieses Verfahren ist in verschiedenen Modi möglich. Bei einem A-Scan (Amplituden Scan) ist der Sender fest und es wird die Intensität des Echos gegen die Zeit oder bei bekannter Schallgeschwindigkeit im Probenmedium gegen die Eindringtiefe aufgetragen. Der A-Scan ist eindimensional und wird zur Abtastung von Strukturen eingesetzt. Bei einem B-Scan (Brightness Scan) wird der Sender über die Probe bewegt und die Echointensität über verschiedene Helligkeits- oder Farbstufen dargestellt, sodass eine zweidimensionale Darstellung entsteht. Hierdurch kann nicht nur die Tiefe, sondern auch die Breite einer Fehlstelle ermittelt werden. Bei einem TM-Scan (Time-Motion Scan) wird eine zeitliche Bildfolge aufgenommen. Hierdurch wird der örtlichen Auflösung eine zeitliche Auflösung hinzugefügt, sodass auch die Bewegung des zu untersuchenden Objekts sichtbar gemacht werden kann.

3 Durchführung

3.1 Untersuchung des Acrylblocks auf Fehlstellen

Die Abmessungen des Acrylblocks, sowie die Lage der Fehlstellen werden als Referenzwerte mit einer Schieblehre bestimmt. Mit einem A-Scan wird die Höhe des Acrylblocks bestimmt.

Mit dem Impuls-Echo-Verfahren wird die Lage der Bohrungen sowohl mit einem A-Scan, als auch mit einem B-Scan bestimmt. Dabei wird die Probe einmal von unten und einmal von oben vermessen und aus der Differenz der erhaltenen Werte mit der Höhe des Acrylblocks der Durchmesser der Fehlstellen bestimmt. Es wird eine 2 MHz Sonde und destilliertes Wasser als Koppelmedium genutzt. Bei dem B-Scan ist darauf zu achten, die Sonde langsam und möglichst gleichmäßig über den Acrylblock zu bewegen.

Die beiden Fehlstellen, die am nächsten beieinander liegen werden zusätzlich mit einer 4 MHz Sonde vermessen, um ihr Auflösungsvermögen zu untersuchen.

3.2 Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan

Das Herzmodell wird zu einem Drittel mit Wasser gefüllt und eine 2 MHz Sonde wird so eingestellt, dass sie gerade das Wasser berührt. Mit einem A-Scan wird der Abstand von der Sonde bis zur Membran über die Laufzeit des Echos bestimmt. Es wird überprüft, ob auch bei gewölbter Membran ein A-Scan durchgeführt werden kann.

Mithilfe des Gummiballs wird die Membran periodisch gewölbt und ein TM-Scan durchgeführt. Anhand der Messkurve wird die Herzfrequenz und das Herzvolumen bestimmt. Dabei wird angenommen, dass das Volumen die Form eines Kugelsegments besitzt.

4 Auswertung

Die Graphen werden sowohl mit Matplotlib [1] als auch NumPy [3] erstellt. Die Fehlerrechnung wird mithilfe von Uncertainties [2] durchgeführt.

Tabelle 1: Mit der Schieblehre bestimmte Referenzwerte für den Acrylblock.

n	$l_{\text{oben}}/10^{-3}\text{m}$	$l_{\text{unten}}/10^{-3}\text{m}$	$d/10^{-3}\text{m}$
1	19,2	59,7	1,40
2	17,5	61,4	1,40
3	61,2	13,3	5,80
4	53,9	21,7	4,70
5	46,4	30,2	3,70
6	38,9	38,7	2,70
7	30,9	46,7	2,70
8	22,9	54,8	2,60
9	14,9	62,8	2,60
10	7,0	71,7	1,60
11	55,3	15,2	9,80

Mittels Schieblehre wird die Höhe h des Acrylblocks gemessen zu $h = 80,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Die gemessenen Abstände der Löcher zum oberen bzw. unteren Rand l_{oben} und l_{unten} sind in Tabelle 1 zu sehen. Der Durchmesser bestimmt sich dabei über

$$d = h - l_{\text{oben}} - l_{\text{unten}}. \quad (7)$$

4.1 A-Scan

Eine Messung der Laufzeit durch den gesamten Block liefert $\Delta t = 58,69 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. Mit der Schallgeschwindigkeit in Acryl $c_{\text{Acryl}} = 2730 \text{ m/s}$ ergibt sich über Gleichung (6) eine experimentelle Höhe des Quaders von $h_{\text{exp}} \approx 80,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Die Messwerte zur Bestimmung des Durchmessers d_A der Löcher mit der 2 MHz-Sonde befinden sich in Tabelle 2. Die Abstände l_{oben_A} und l_{unten_A} berechnen sich ebenfalls über

Formel (6). d_A lässt sich über Gleichung (7) bestimmen.

Tabelle 2: A-Scan Messung 2 MHz

n	$\Delta t_{\text{oben}_A}/10^{-6}\text{s}$	$l_{\text{oben}_A}/10^{-3}\text{m}$	$\Delta t_{\text{unten}_A}/10^{-6}\text{s}$	$l_{\text{unten}_A}/10^{-3}\text{m}$	$d_A/10^{-3}\text{m}$
1	14,16	19,33	42,92	58,59	2,20
2	12,97	17,70	44,22	60,36	2,05
3	44,32	60,50	9,63	13,14	6,47
4	38,91	53,11	15,68	21,40	5,60
5	33,51	45,74	21,19	28,92	5,45
6	27,99	38,21	27,68	37,78	4,12
7	21,94	29,95	33,41	45,60	4,56
8	16,21	22,13	39,35	53,71	4,27
9	10,27	14,02	44,97	61,38	4,71
10	6,49	8,86	51,35	70,09	1,16
11	40,21	54,89	10,93	14,92	10,31

Die Messergebnisse zur genaueren Untersuchung der Löcher 1 und 2 mittels einer 4 MHz-Sonde sind in Tabelle 3 aufgetragen.

Tabelle 3: A-Scan Messung 4 MHz

n	$\Delta t_{\text{o}_{4\text{MHz}}}/10^{-6}\text{s}$	$l_{\text{o}_{4\text{MHz}}}/10^{-3}\text{m}$	$\Delta t_{\text{u}_{4\text{MHz}}}/10^{-6}\text{s}$	$l_{\text{u}_{4\text{MHz}}}/10^{-3}\text{m}$	$d_{4\text{MHz}}/10^{-3}\text{m}$
1	14,05	19,18	43,13	58,87	2,06
2	12,54	17,12	44,64	60,93	2,06

4.2 B-Scan

Aus den B-Scan-Aufnahmen 1 und 2 werden die Laufzeiten Δt_{oben_B} und $\Delta t_{\text{unten}_B}$ abgelesen und in Tabelle 4 aufgetragen. Die Abstände l_{oben_B} und l_{unten_B} werden wieder über Gleichung (6), sowie der Durchmesser der Löcher d_B nach Gleichung (7) bestimmt.

Tabelle 4: B-Scan Messung

n	$\Delta t_{\text{oben}_B}/10^{-6}\text{s}$	$l_{\text{oben}_B}/10^{-3}\text{m}$	$\Delta t_{\text{unten}_B}/10^{-6}\text{s}$	$l_{\text{unten}_B}/10^{-3}\text{m}$	$d_B/10^{-3}\text{m}$
1	14,40	19,66	43,70	59,65	0,81
2	13,10	17,88	45,50	62,11	0,12
3	44,60	60,88	10,00	13,65	5,58
4	39,40	53,78	16,00	21,84	4,49
5	33,90	46,27	21,90	29,89	3,94
6	28,60	39,04	28,40	38,77	2,31
7	22,70	30,99	34,80	47,50	1,62
8	16,80	22,93	40,30	55,01	2,17
9	10,90	14,88	46,10	62,93	2,31
10	8,70	11,88	51,90	70,84	-2,61
11	40,30	55,01	11,30	15,42	9,68

Abbildung 1: B-Scan von oben

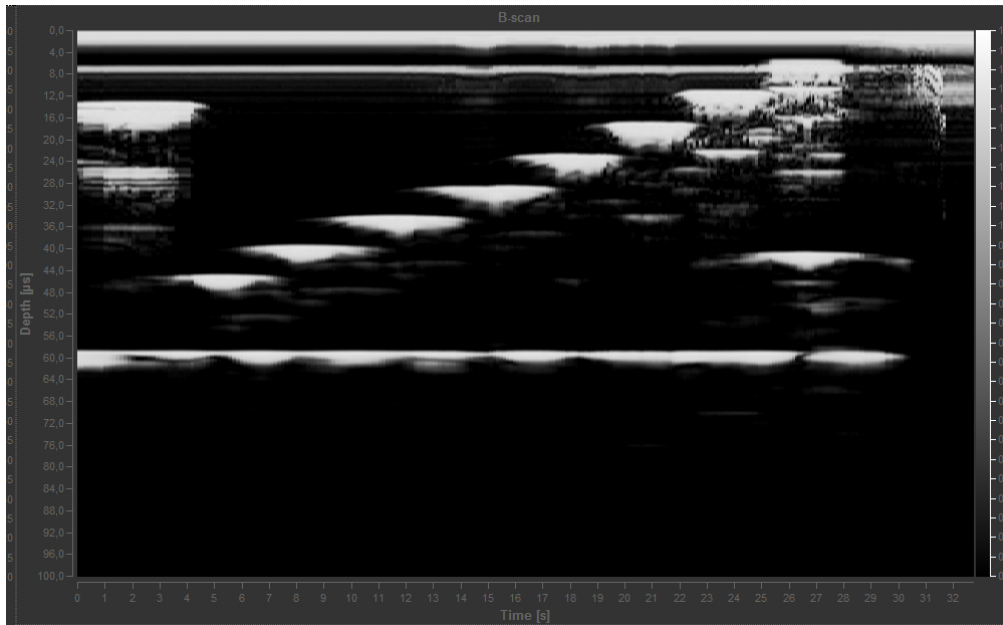
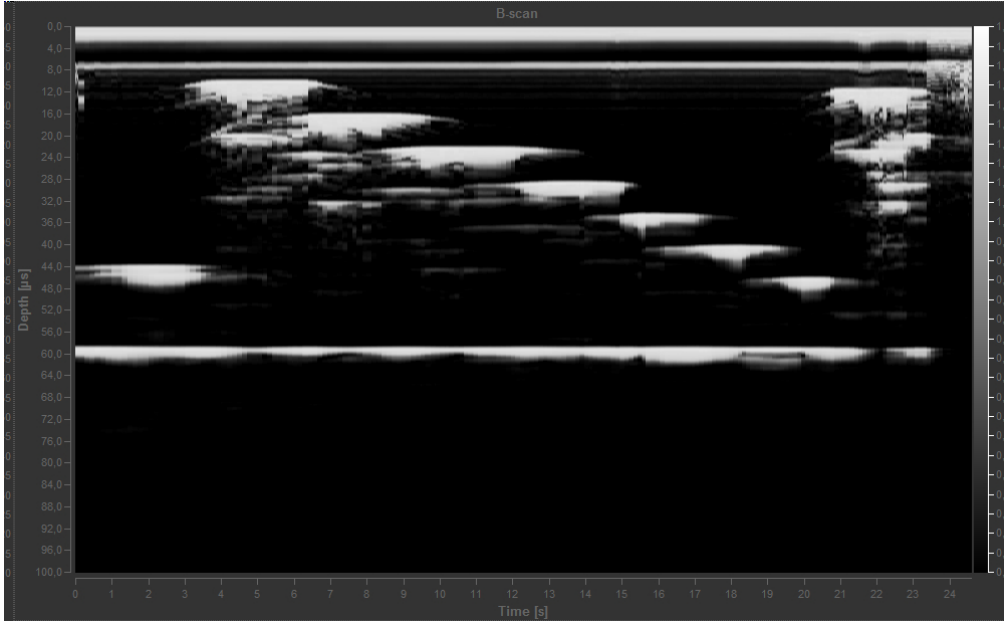


Abbildung 2: B-Scan von unten



4.3 TM-Scan

Mit einer Schieblehre wird der Durchmesser des Herzmodells gemessen zu $d = 49,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ und damit sein Radius zu $a = \frac{d}{2} = 24,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ bestimmt. Mit einem A-Scan wird die Laufzeit des Schalls von der Sonde zur Membran im entspannten Zustand bestimmt zu $\Delta t_{\text{entspannt}} = 46,48 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ und im gewölbten Zustand zu $\Delta t_{\text{gewölbt}} = 15,89 \cdot 10^{-6} \text{ s}$.

Mit der Schallgeschwindigkeit in Wasser $c_{\text{Wasser}} = 1485 \text{ m/s}$ und Gleichung (6) ergibt sich für den Abstand bei ruhendem Herzen $h_{\text{Ruhe}} = 34,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Mit einem TM-Scan werden $n = 25$ Herzschläge aufgezeichnet. Sowohl der zeitliche Abstand $\Delta t_{n \rightarrow n+1}$ zwischen ihnen, als auch ihre Höhe Δt_h werden aus Abbildung 3 abgelesen und in Tabelle 5 aufgetragen. Die absolute Höhe h wird mit Hilfe von Gleichung 6 bestimmt.

Mit Hilfe der Formel für den Mittelwert ergibt sich für den mittleren zeitlichen Abstand

$$\Delta \bar{t} = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta t_{n \rightarrow n+1}}{N} = (1,79 \pm 0,04) \text{ s}.$$

Der Fehler berechnet sich dabei aus der Formel für die Standardabweichung

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N^2 - N} \sum_n = 1^N ((\Delta t_{n \rightarrow n+1})^2 - \Delta \bar{t}^2)}.$$

Daraus lässt sich die Frequenz f bestimmen zu

$$f = \frac{1}{\Delta \bar{t}} = (0,56 \pm 0,01) \text{ Hz} = (33,6 \pm 0,6) \text{ 1/min}.$$

Der Fehler bestimmt sich dabei nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung aus

$$\sigma_f = \frac{\partial f}{\partial \Delta t} \cdot \sigma_t.$$

Die mittlere Höhe der Pulse und ihr Fehler lassen sich analog über die Formel für den Mittelwert und die Standardabweichung bestimmen:

$$\bar{h} = (23,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

Mit der Formel für das Volumen eines Kugelsegments

$$V = \frac{h \cdot \pi}{6} \cdot (3a^2 + h^2)$$

lässt sich das Schlagvolumen des Herzbeutels bestimmen:

$$V_{\text{Schlag}} = (29,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = (29,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ L}.$$

Der Fehler berechnet sich dabei über die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_V = \frac{\partial V}{\partial h} \cdot \sigma_h.$$

Das Herzzeitvolumen berechnet sich über

$$V_{\text{Zeit}} = V_{\text{Schlag}} \cdot f = (16,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = (0,99 \pm 0,02) \frac{\text{L}}{\text{min}}.$$

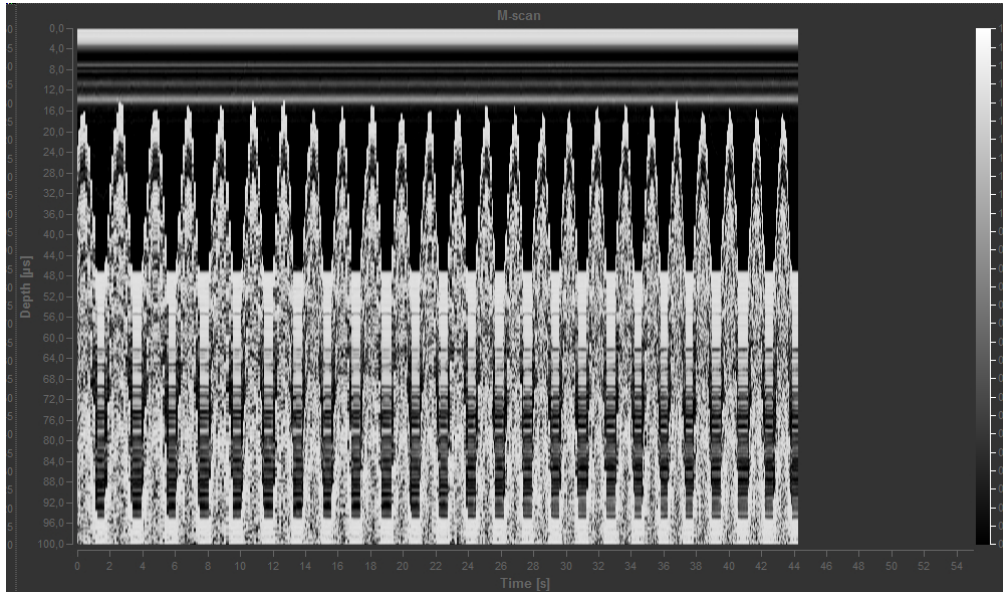
Der Fehler ist dabei gegeben durch:

$$\sigma_{V_z} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{\text{Zeit}}}{\partial V_{\text{Schlag}}} \cdot \sigma_V \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{\text{Zeit}}}{\partial f} \cdot \sigma_f \right)^2}.$$

Tabelle 5: TM-Scan Messung

n	$\Delta t_{n \rightarrow n+1}/s$	$\Delta t_h/10^{-6}s$	$h/10^{-3}m$
1	2,28	30,98	23,00
2	2,03	32,74	24,31
3	2,03	31,18	23,15
4	2,03	32,16	23,88
5	1,97	32,16	23,88
6	1,91	33,32	24,74
7	1,91	33,32	24,74
8	1,73	31,56	23,43
9	1,79	32,16	23,88
10	1,85	32,16	23,88
11	1,66	30,60	22,72
12	1,79	30,98	23,00
13	1,73	31,76	23,58
14	1,79	31,96	23,73
15	1,73	31,76	23,58
16	1,60	30,98	23,00
17	1,66	30,78	22,85
18	1,73	31,76	23,58
19	1,60	32,34	24,01
20	1,60	32,34	24,01
21	1,60	33,12	24,59
22	1,66	30,98	23,00
23	1,60	31,56	23,43
24	1,60	30,00	22,28
25	nan	30,00	22,28

Abbildung 3: TM-Scan



5 Diskussion

Die experimentelle Messung der Blocktiefe mittels A-Scan $h_{\text{exp}} = 80,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ hat nur eine geringe Abweichung $\Delta h = -0,3\%$ vom gemessenen Wert $h = 80,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Aus Tabelle 6 lässt sich erkennen, dass bis auf die letzten beiden Werte deutlich zu große Ergebnisse durch den A-Scan geliefert wurden. Dies könnte an einem Ablesefehler liegen, da möglicherweise der Impuls, der beim Eintritt des Schalls in den Acrylblock entsteht, falsch lokalisiert wurde. Die Messung mit der 4 MHz-Sonde bringt keine Vorteile im Vergleich zur 2 MHz-Messung.

Beim B-Scan wurden bessere Ergebnisse erzielt, jedoch fällt auf, dass bis auf den Durchmesser von Loch 5 alle Durchmesser zu klein sind. Das könnte damit zu tun haben, dass aus den Abbildungen 1 und 2 die obere Kante der Löcher als Abstand abgelesen wurde. Besonders auffällig ist außerdem der negative Durchmesser von Loch 10, welches in den Aufnahmen auf der rechten Seite zu sehen sein sollte. Da es allerdings von Loch 11 überlagert wird und die Aufnahme an den Rändern sehr undeutlich ist, wurde möglicherweise am falschen Punkt die Tiefe abgelesen.

Der geringe Fehler bei der Bestimmung des Schlagvolumens $V_{\text{Schlag}} = (29,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ des Herzens lässt sich auf einen gleichmäßigen "Herzschlag" zurückführen. Bei einem menschlichen Herzen sollte das Herzzeitvolumen allerdings höher sein, da auch die Frequenz und das Schlagvolumen meist höher sind. Die Frequenz von $f = (33,6 \pm 0,6) \text{ 1/min}$ entspricht eher der Pulsfrequenz eines Frosches.

Tabelle 6: Die Abweichungen der Durchmesser des A- und B-Scans mit der 2 MHz Sonde.

n	$d/10^{-3}\text{m}$	$d_A/10^{-3}\text{m}$	$d_B/10^{-3}\text{m}$	$\sigma_{d_A}/\%$	$\sigma_{d_B}/\%$
1	1,40	2,20	0,81	57,0	-42,5
2	1,40	2,05	0,12	46,3	-91,2
3	5,80	6,47	5,58	11,6	-3,7
4	4,70	5,60	4,49	19,1	-4,5
5	3,70	5,45	3,94	47,2	6,6
6	2,70	4,12	2,31	52,7	-14,6
7	2,70	4,56	1,62	68,9	-39,8
8	2,60	4,27	2,17	64,3	-16,5
9	2,60	4,71	2,31	81,1	-11,3
10	1,60	1,16	-2,61	-27,5	-262,9
11	9,80	10,31	9,68	5,2	-1,2

Tabelle 7: Die Abweichungen der Durchmesser des A-Scans mit der 4 MHz Sonde.

n	$d/10^{-3}\text{m}$	$d_{4\text{MHz}}/10^{-3}\text{m}$	$\sigma_{d_{4\text{MHz}}}/\%$
1	1,40	2,06	47,2
2	1,40	2,06	47,2

Literatur

- [1] John D. Hunter. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Version 1.5.3. URL: <http://matplotlib.org/> (besucht am 13. 11. 2017).
- [2] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.0.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/> (besucht am 13. 11. 2017).
- [3] Travis E. Oliphant. *NumPy: Python for Scientific Computing*. Version 1.11.1. URL: <http://www.numpy.org/> (besucht am 13. 11. 2017).