

Versuch US2

Scanverfahren in der Ultrachalltechnik

Stefanie Hilgers
Stefanie.Hilgers@tu-dortmund.de

Lara Nollen
Lara.Nollen@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.06.2018

Abgabe: 26.06.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Theorie	3
2.1	Zielsetzung	3
2.2	Theorie	3
2.3	Piezo-elektrischer Effekt	4
2.4	Laufzeitmessungen	4
2.5	Vorbereitung	6
3	Durchführung	6
3.1	Untersuchung eines Acrylblocks	6
3.2	Untersuchung des Auflösungsvermögens	7
3.3	Untersuchung des Acrylblocks mit dem B-Scan	7
3.4	Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan	8
4	Auswertung	8
4.1	Acrylblock A-Scan	8
4.2	Acrylblock B-Scan	12
4.3	Herzmodell TM-Scan	13
5	Diskussion	14
	Literatur	15

1 Theorie

2 Theorie

2.1 Zielsetzung

Bei diesem Versuch sollen Störstellen in einem Acrylblock mithilfe eines A-Scans und mit einem B-Scan untersucht und vermessen werden, zudem soll die Auflösung verschiedener Sonden verglichen werden. Außerdem soll mit einem TM-Scan die Frequenz und das Herzvolumen eines Herzmodells untersucht werden.

2.2 Theorie

Ultraschall liegt in einem Frequenzbereich von etwa 20 kHz bis 1 GHz, sodass diese Schallwellen vom menschlichen Gehör nicht erfasst werden können. Überschreiten Schallwellen den Frequenzbereich von Ultraschall, sodass sie über 1 GHz liegen, werden diese als Hyperschall bezeichnet. Genutzt wird Ultraschall häufig in der Medizin für biometrische Messungen, sowie in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

Schallwellen breiten sich durch Druckschwankungen fort und beschreiben eine longitudinale Welle mit

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

Dabei wird die akustische Impedanz (oder Schallkennwiderstand) als $Z = c \cdot \rho$ definiert, wobei c die Schallgeschwindigkeit im Material beschreibt und ρ die Dichte. Schallwellen besitzen viele Ähnlichkeiten zu elektromagnetischen Wellen, beispielsweise können das Reflexions- und Brechungsverhalten analog beschrieben werden.

Allerdings ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit deutlich geringer und hängt zudem stark vom Medium ab. In einer Flüssigkeit hängt die Schallgeschwindigkeit insbesondere von der Dichte ρ und der Kompressibilität κ gemäß

$$c_{FL} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \rho}}. \quad (2)$$

ab. In Gasen und Flüssigkeiten breitet sich Schall immer als Longitudinalwelle aus, jedoch können sich in Festkörpern aufgrund von Schubspannungen zudem auch transversale Wellen ausbilden. Hierbei ist die Schallgeschwindigkeit durch die Gleichung

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

gegeben, wobei E das Elastizitätsmodul bezeichnet. Jedoch ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Festkörpern grundsätzlich richtungsabhängig, insbesondere unterscheiden sich longitudinale und transversale Geschwindigkeit.

Desweiteren kommt es bei der Ausbreitung von Schall auch zu dem Effekt der Absorption,

wobei die Intensität einer Schallwelle exponentiell mit der Strecke abnimmt, was mit einem Energieverlust der Welle verknüpft ist. Diese Abnahme wird durch die Formel

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha x). \quad (4)$$

beschrieben, hierbei ist α der sogenannte Absorptionskoeffizient. Luft besitzt einen hohen Absorptionskoeffizienten α , da sie Ultraschall in hohem Maße absorbiert. Daher wird zwischen der Ultraschallquelle und der Probe meist ein Kontaktmittel verwendet, beispielsweise destilliertes Wasser oder ein spezielles Kontaktgel.

Trifft eine Schallwelle auf einen Übergang zweier unterschiedlicher Medien, so wird ein Teil der Welle reflektiert, wobei der Reflexionskoeffizient R sich mit Hilfe der akustischen Impedanz Z der beiden angrenzenden Materialien durch

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

berechnen lässt. Der transmittierte Anteil T lässt sich hingegen durch $T = 1 - R$ berechnen.

2.3 Piezo-elektrischer Effekt

Eine häufig verwendete Methode zur Erzeugung von Ultraschallwellen ist der reziproke piezo-elektrische Effekt, bei welchem ein piezoelektrischer Kristall in einem elektrischen Wechselfeld zu Schwingungen angeregt wird. Falls eine polare Achse des Kristalls in Richtung des elektrischen Feldes zeigt, kommt es zur Emission von Ultraschallwellen, wobei besonders hohe Schallamplituden und Schallenergiedichten durch Resonanzeffekte zwischen Anregungsfrequenz und Eigenfrequenz der Kristalle erreicht werden.

Piezokristalle werden zudem zur Detektierung von Ultraschallwellen eingesetzt, da die eintreffenden Wellen den Kristall zu messbaren Schwingungen anregen. Obwohl Quarze nur einen schwachen piezoelektrischen Effekt aufweisen, werden sie am häufigsten als Piezokristalle eingesetzt, da sie über gleichbleibende physikalische Eigenschaften verfügen.

2.4 Laufzeitmessungen

Bei der Laufzeitmessungen werden grundsätzlich zwei Verfahren unterschieden, das Durchschallungsverfahren und das Impuls-Echo-Verfahren. Für das Durchschallungsverfahren wird sowohl ein Ultraschallsender als auch ein Ultraschallempfänger benötigt, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.

Durchschallungs-Verfahren

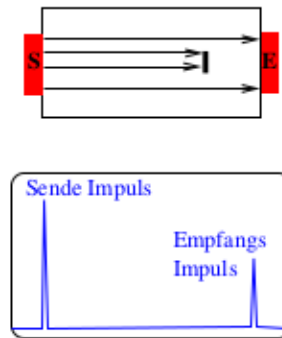


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Durchschallungsverfahrens.
[1]

Hierbei wird zunächst ein kurzzeitiger Schallimpuls ausgesendet, welcher am anderen Ende der Probe durch den Empfänger detektiert wird. Falls sich Fehler oder Unebenheiten in der Probe befinden, wird nur eine abgeschwächte Intensität am Empfänger gemessen, jedoch ist über die Lage der Fehlerstelle keine genaue Aussage möglich.

Das zweite Verfahren, welches als Impuls-Echo-Verfahren bezeichnet wird, basiert auf der Nutzung einer einzelnen Sonde als Sender und Empfänger gleichzeitig. Dies ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

Impuls-Echo-Verfahren

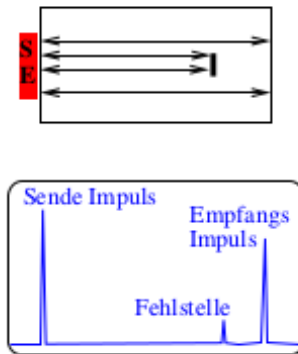


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Impuls-Echo-Verfahrens.
[1]

Hierbei wird der ausgesendete Impuls am Übergang zweier Medien teilweise reflektiert und nach dem Rücklaufen durch die Probe vom Empfänger registriert. Ist die

Schallgeschwindigkeit konstant kann über die Laufzeit t die Lage der Fehlstelle über

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

bestimmt werden. Im Falle von Fehlstellen, lassen sich durch die Höhe und die Lage der rücklaufenden Impulse weitere Informationen über die Größe bzw. Beschaffenheit der Fehlstelle gewinnen.

Es kann zudem auch zwischen verschiedenen Darstellungsarten dieser Laufzeitmessung gewählt werden. Die erste ist der sogenannte A-Scan (Amplituden Scan), bei welchem die Amplituden der rücklaufenden Echos in Abhängigkeit der Laufzeit dargestellt werden. Dieses Verfahren liefert nur ein eindimensionales Bild und wird daher meist zur Untersuchung von Strukturen verwendet.

Zudem gibt es auch noch den B-Scan (Brightness Scan), bei welchem ein zweidimensionales Bild mittels Helligkeitsabstufungen des Echos erstellt wird. Außerdem gibt es noch den Time-Motion Scan, abgekürzt durch TM-Scan, bei welchem auch die zeitliche Abfolge von Impulsen ausgezeichnet werden kann. Dafür ist eine schnelle Abtastung notwendig; nützlich ist diese Darstellungsart beispielsweise bei der Untersuchung von Organen.

2.5 Vorbereitung

Zur Vorbereitung auf den Versuch wurden materialspezifische Werte recherchiert, diese sind in Tabelle 3 abzulesen.

Tabelle 1: Werte für die Schallgeschwindigkeit.

	Luft	dest. Wsser	Acryl
Schallgeschwindigkeit c in m/s	330	1480	2730

[2], [3]

3 Durchführung

Bei diesem Versuch stehen drei verschiedene Ultraschallsonden mit 1 MHz, 2 MHz und 4 MHz, sowie ein Computer mit einem geeigneten Programm zur Datenverarbeitung zur Verfügung.

3.1 Untersuchung eines Acrylblocks

Im ersten Versuchsteil soll ein Acrylblock mit mehreren Bohrungen mittels A-Scan untersucht werden. Dieser ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt

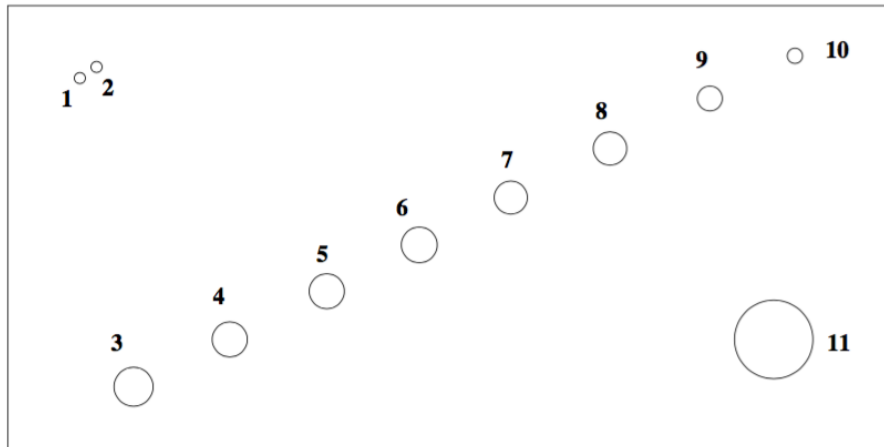


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Acrylblocks
[1]

Zunächst werden die Abmessungen des Blocks und der Bohrungen mit einer Schieblehre vermessen.

Anschließend werden alle Bohrungen nochmal mit dem Impuls-Echo verfahren untersucht. Dazu wird die 2 MHz Sonde verwendet, welche mit destilliertem Wasser als Kontaktmittel von oben auf den Block angekoppelt wird. Am Computer ist die Einstellung "A-Scan" zum wählen, zudem wird die Schallgeschwindigkeit 2730 m/s in Acryl aus der Vorbereitung eingestellt, um direkt die automatisch aus der Laufzeit berechneten Tiefe der Störstelle ablesen zu können. Dabei wird die ganze Länge des Blocks einmal mit der Sonde abgefahren, um alle Störstellen zu vermessen. Analog wird noch einmal von der anderen Seite vorgegangen, indem der Block einmal um 180° gedreht wird und die Messung wiederholt wird.

3.2 Untersuchung des Auflösungsvermögens

Um das Auflösungsvermögen der Sonden zu vergleichen, werden die beiden Bohrungen 1 und 2, welche, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, besonders eng beieinander liegen, zusätzlich mit der 1 MHz Sonde untersucht, wobei die Graphiken der beiden Messungen mit den zwei unterschiedlichen Sonden abgespeichert werden.

3.3 Untersuchung des Acrylblocks mit dem B-Scan

Der Acrylblock aus dem ersten Versuchsteil soll nun zusätzlich mit dem B-Scan untersucht werden. Dazu wird am Computer die Darstellung "B-Scan" gewählt und die 2 MHz Sonde erneut mit destilliertem Wasser angekoppelt. Nach Start der Messung wird mit der Sonde dann mit möglichst konstanter und langsamer Geschwindigkeit die gesamte Länge des Blocks abgefahren und die Graphik abgespeichert. Die Messung wird anschließend von der anderen Seite wiederholt.

3.4 Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan

Im letzten Teil des Versuches soll ein einfaches Herzmodell, bestehend aus einem Doppelgefäß mit einer durch einen Gummiball auswölbare Membran, durch einen TM-Scan untersucht werden. Die Herzfrequenz und das Schlagvolumen kann hierbei aus der typischen Kurve des "schlagenden" Herzens bestimmt werden. Ist die Herzfrequenz ν_{Herz} bekannt lässt sich über das enddiastolische Volumens (EDV) und des endsystolische Volumen (ESV) das Herzvolumen HZV über

$$\text{HZV} = (\text{EDS} - \text{HDV}) \cdot \nu_{\text{Herz}} \quad (7)$$

bestimmen.

Zur Messung wird das Herzmodell zunächst zu etwa einem Drittel mit destilliertem Wasser gefüllt, woraufhin die 2 MHz Sonde so in eine Halterung festgeschraubt wird, dass sie die Wasseroberfläche gerade berührt und durch einen A-Scan die Membran sichtbar gemacht werden kann. Zu beachten ist, dass die eingestellte Schallgeschwindigkeit von Acryl zu destilliertem Wasser gewechselt werden muss ($c = 1480 \text{ m/s}$), damit die Laufzeit korrekt zu Abständen umgerechnet werden kann.

Dann wird die Membran mit dem Gummiball leicht ausgewölbt, sodass die Sonde nicht zu tief in das Wasser eindringt und das Echo der Membran immer noch im A-Scan zu sehen ist. Nun wird am Computer der "TM-Scan" eingestellt und nach dem Start der Messung die Membran periodisch gewölbt, sodass die Herzfrequenz bzw. die Herzkurve aufgezeichnet wird. Zudem wird der minimale und maximale Abstand zur Membran notiert. Diese Graphik wird ebenfalls gespeichert.

4 Auswertung

4.1 Acrylblock A-Scan

Die mit der Schieblehre gemessenen Maße des Acrylblocks und der Bohrungen sind in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Maße des Blocks, gemessen mit der Schieblehre.

Bohrung	$s_{\text{oben}}/ \text{ mm}$	$s_{\text{unten}}/ \text{ mm}$	Größe $S/ \text{ mm}$
1	19,00	60,00	-
2	17,00	61,00	-
3	61,00	13,00	6,00
4	54,00	22,00	5,00
5	42,00	30,00	4,00
6	39,00	39,00	3,00
7	31,00	47,00	3,00
8	22,00	55,00	3,00
9	15,00	63,00	3,00
10	7,00	71,00	3,00
11	55,00	15,00	10,00

Höhe des Blocks: $h = 80,00 \text{ mm}$

In Tabelle 3 sind die Messwerte für die Tiefe der Störstellen von beiden Richtungen (Block in normaler Position s_{oben} und umgedreht s_{unten}), sowie der Durchmesser der Störstellen dargestellt. Hier wird die 2 MHz Sonde verwendet.

Tabelle 3: Messwerte für die Tiefe der Bohrungen mit der 2 MHz Sonde.

Bohrung	$s_{\text{oben}}/ \text{ mm}$	$s_{\text{unten}}/ \text{ mm}$	Größe der Bohrung $S/ \text{ mm}$
1	20,57	60,67	1,82
2	18,80	62,43	1,83
3	63,76	14,84	4,46
4	56,41	22,77	3,88
5	48,92	31,14	3,12
6	41,57	39,81	1,68
7	33,64	47,74	1,68
8	25,41	55,97	1,68
9	17,33	63,76	1,97
10	9,28	72,13	1,65
11	58,03	16,75	8,28

Die Höhe des Blocks wird mit $h = 81,53 \text{ mm}$ gemessen. Der Vergleich mit Wert der mit der Schieblehre gemessen wurde ergibt sich eine Differenz von $\Delta h = 1,53 \text{ mm}$. Diese Differenz ist auf die Schutzschicht der Sonden zurückzuführen, da diese zweimal durchlaufen wird ergibt sich eine Dicke von $h_{\text{Schutz}} = 0,765 \text{ mm}$. Von den gemessenen Werten müssen in der Rechnung also $1,53 \text{ mm}$ abgezogen werden, damit die Schutzschicht die Werte für die Lage der Bohrungen nicht verfälscht.

Die Größe der Störstellen berechnet sich nach

$$S = h - s_{\text{oben}} - s_{\text{unten}}, \quad (8)$$

diese ist ebenfalls in Tabelle 3 zu sehen.

Die Bohrungen 1 und 2 werden zusätzlich mit der 1 MHz Sonde vermessen, die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zu sehen. Hier wird die Höhe des Blocks mit $h = 83,00$ mm gemessen, die Differenz beträgt $\Delta h = 3,00$ mm. Also ist die Schutzschicht bei dieser Sonde $h_{\text{Schutz}} = 1,00$ mm dick.

Tabelle 4: Messwerte für die Tiefe der Bohrungen 1 und 2 mit der 1 MHz Sonde.

Bohrung	$s_{\text{oben}} / \text{mm}$	$s_{\text{unten}} / \text{mm}$	Größe der Bohrung S / mm
1	21,74	62,14	2,12
2	20,13	63,90	1,97

Außerdem wurde die Grafik des A-Scans der 1 MHz und der 2 MHz Sonde abgespeichert, sie sind in Abbildung 4,5 und 6,7 zu sehen.

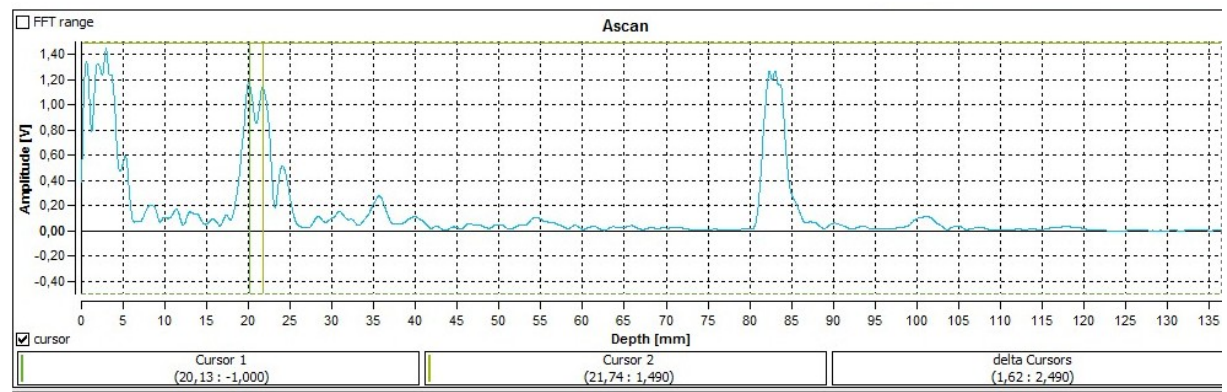


Abbildung 4: A-Scan der 1. und 2. Bohrung mit der 1 MHz Sonde.

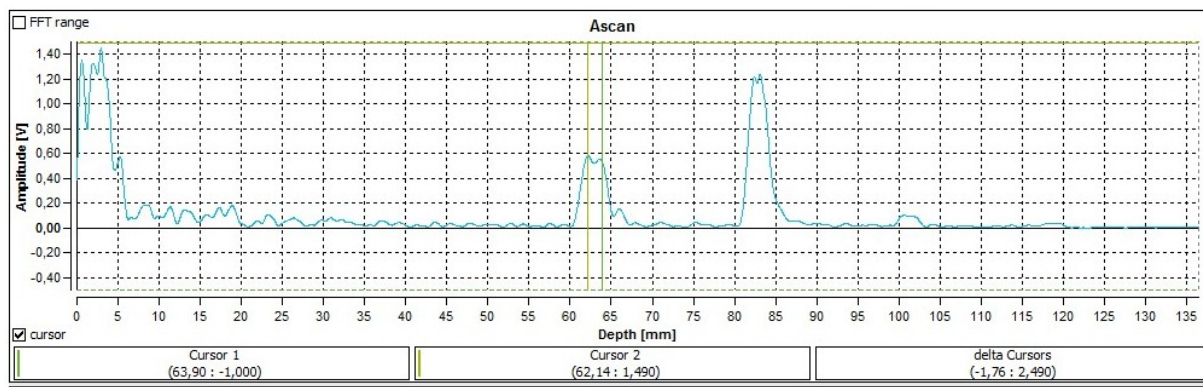


Abbildung 5: A-Scan der 1. und 2. Bohrung mit der 1 MHz Sonde, umgedreht.

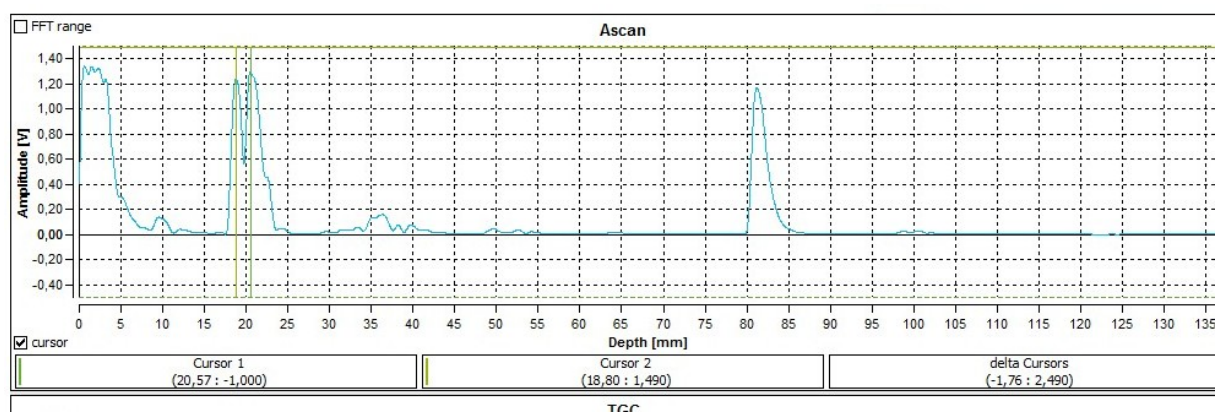


Abbildung 6: A-Scan der 1. und 2. Bohrung mit der 2 MHz Sonde.

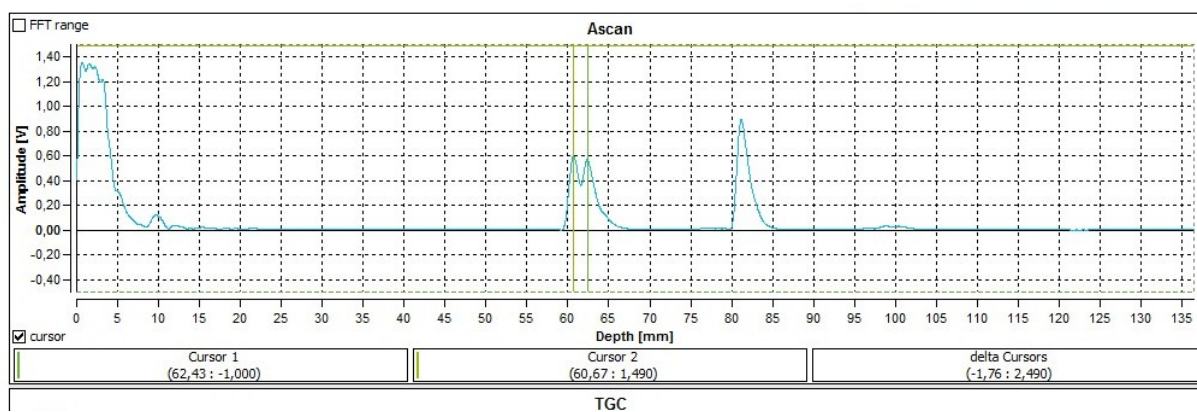


Abbildung 7: A-Scan der 1. und 2. Bohrung mit der 2 MHz Sonde.

Ein Vergleich der Abbildungen 4, 5 und 6,7 fällt auf, dass die Auflösung der 2 MHz Sonde

höher ist als die der 1 MHz Sonde. Um eine noch bessere Auflösung zu erhalten muss eine Sonde mit noch höherer Frequenz verwendet werden z.B. 4 MHz.

4.2 Acrylblock B-Scan

Der B-Scan des Acrylblocks liefert folgende Bilder:

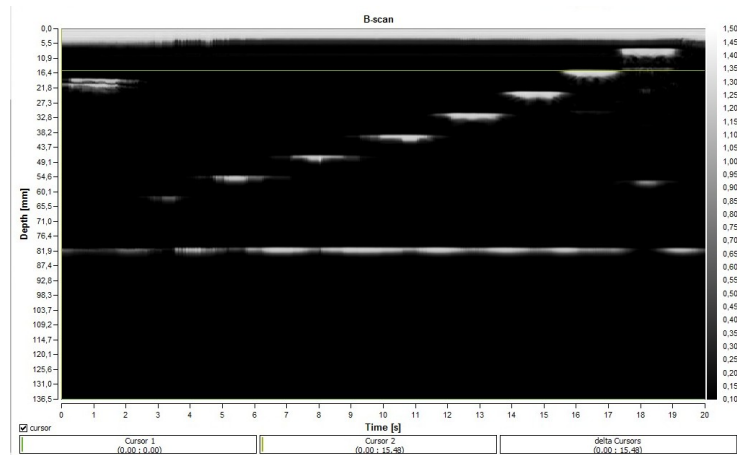


Abbildung 8: B-Scan des Acrylblocks.

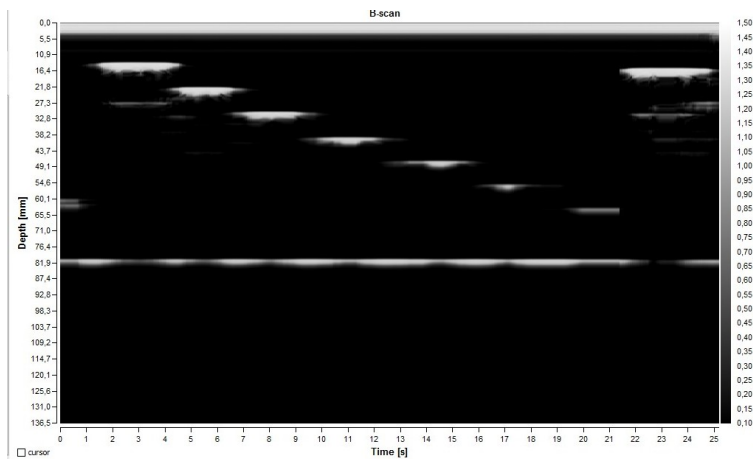


Abbildung 9: B-Scan des Acrylblocks, umgedreht.

Mit Hilfe der Curser-Funktion wurden die Tiefen s_{oben} und s_{unten} vermessen, die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zu sehen.

Tabelle 5: Messwerte für die Tiefe der Bohrungen mit der 2 MHz Sonde im B-Scan.

Bohrung	$s_{\text{oben}}/ \text{ mm}$	$s_{\text{unten}}/ \text{ mm}$	Größe der Bohrung $S/ \text{ mm}$
1	20,28	60,17	2,61
2	18,15	62,78	2,13
3	61,78	13,35	7,93
4	54,05	21,59	7,42
5	46,36	30,11	6,59
6	39,15	38,90	5,01
7	30,90	47,15	5,01
8	23,20	54,85	5,01
9	14,96	63,09	5,01
10	7,51	-	-
11	55,91	15,48	11,67

Für die Bohrung Nr.10 kann kein Wert berechnet werden, da für diese Bohrung kein Signal gemessen werden kann. Grund dafür ist, dass eine andere Bohrung im Weg liegt. Der Vergleich mit den berechneten Werten aus dem A-Scan zeigt, dass die Ergebnisse des B-Scans deutlich größere Werte ergeben als die des A-Scans.

4.3 Herzmodell TM-Scan

Aus dem A-Scan ergeben sich eine Wasserhöhe von $h = 31,04 \text{ mm}$ und der Durchmesser des Zylinders beträgt $d = 49,00 \text{ mm}$. In Abbildung 10 ist der TM-Scan des Herzmodells zu sehen, es werden 10 Ausschläge in einem Zeitintervall von $t = 18,39 \text{ s}$ gemessen. Damit ergibt sich eine Frequenz von

$$\nu_{\text{Herz}} = 1,84 \text{ Hz.} \quad (9)$$

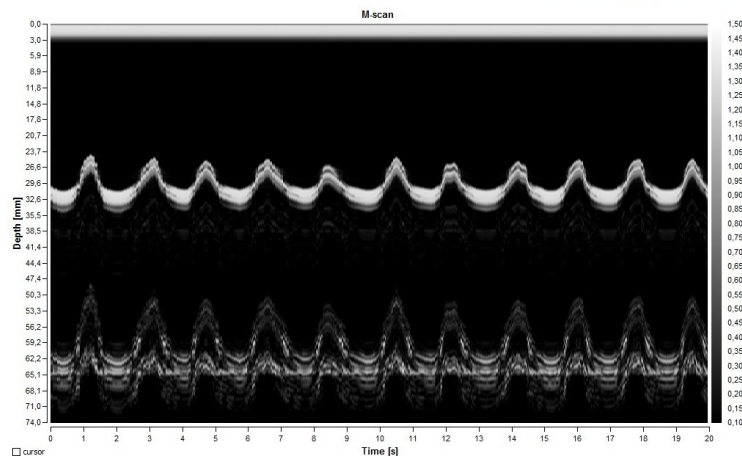


Abbildung 10: TM-Scan des Herzmodells.

Nach der Formel $V = \pi h r^2$ wird das Volumen im Ruhezustand und mit aufgeblasener Membran berechnet

$$EDS = \pi \cdot 24,5 \text{ mm}^2 \cdot 31,04 \text{ mm} = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$HDV = \pi \cdot 24,5 \text{ mm}^2 \cdot 24,86 \text{ mm} = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3.$$

Mit der Formel 7 ergibt sich für das Herzvolumen

$$HZV = 2,21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}, \quad (10)$$

das entspricht 0,022 L/s.

5 Diskussion

Die Ergebnisse für die Größe der Störstellen sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Dort ist auch die Abweichung der gemessenen Größen mit den Messwerten der Schieblehre zu finden.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse und deren Abweichungen.

Bohrung	$S_{\text{Schieblehre}} / \text{mm}$	$S_{\text{A-Scan}} / \text{mm}$	Abweichung A-Scan	$S_{\text{B-Scan}} / \text{mm}$	Abweichung B-Scan
1	-	1,82	-	2,61	-
2	-	1,83	-	2,13	-
3	6,00	4,46	25,67	7,93	32,17
4	5,00	3,88	22,40	7,42	48,40
5	4,00	3,12	22,00	6,59	64,75
6	3,00	1,68	44,00	5,01	67,00
7	3,00	1,68	44,00	5,01	67,00
8	3,00	1,68	44,00	5,01	67,00
9	3,00	1,97	34,33	5,01	67,00
10	3,00	1,65	45,00	-	-
11	10,00	8,28	17,20	11,67	16,7

Es ist zu erkennen, dass der A-Scan eine geringere Abweichung aufweist als der B-Scan. Die Bohrungen wurden sowohl mit einer 1 MHz Sonde als auch einer 2 MHz Sonde ausgemessen, die Ergebnisse stehen in Tabelle 7.

Tabelle 7: Bohrung 1 und 2, Vergleich der Sonden mit 1 MHz und 2 MHz.

Bohrung	$S_{2 \text{ MHz}} / \text{mm}$	$S_{1 \text{ MHz}} / \text{mm}$
1	1,82	2,12
2	1,83	1,97

Diese Ergebnisse können nicht mit Messwerten der Schieblehre verglichen werden, da diese Bohrungen zu klein sind um sie zu vermessen.

Aus den Messwerten des TM-Scans wurde die Herzfrequenz des Modells zu

$$\nu_{\text{Herz}} = 1,84 \text{ Hz} \quad (11)$$

bestimmt, daraus konnte das Herzvolumen

$$HZV = 2,21 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \quad (12)$$

berechnet werden. Das entspricht 0,022 L/s.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu US2: Scanverfahren in der Ultraschalltechnik*.
- [2] *Schallgeschwindigkeit Acryl*. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>.
- [3] *Schallgeschwindigkeit von Luft, Wasser, Blut und Knochen*. URL: <https://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/01/01H139/t4.pdf>.