

US1

Scanverfahren in der Ultraschalltechnik

Fritz Agildere
fritz.agildere@udo.edu

Amelie Strathmann
amelie.strathmann@udo.edu

Durchführung: 6. Juni 2023

Abgabe: 12. Juni 2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	2
2 Theorie	2
2.1 Grundlegendes Verhalten von Schallwellen	2
2.1.1 Geschwindigkeit	2
2.1.2 Übertragung	3
2.2 Medizinische Anwendung von Ultraschall	3
2.2.1 Piezoelektrizität	3
2.2.2 Scanverfahren	3
3 Durchführung	5
4 Auswertung	6
4.1 Fehlerrechnung	6
4.2 Vermessung des Acrylblocks mit einer Schieblehre	6
4.3 Untersuchung der Störstellen des Acrylblocks mit A-Scan	7
4.4 Untersuchung der Störstellen des Acrylblocks mit B-Scan	9
4.5 Untersuchung des Auflösungsvermögens	10
4.6 Untersuchung des Brustmodells mittels B-Scan	12
5 Diskussion	14
Literatur	15
Anhang	16

1 Zielsetzung

Die nachfolgende Versuchsreihe dient zur Analyse verschiedener Scanverfahren aus der Ultraschallechographie. Anhand eines als Modell dienenden Acrylblocks werden dazu die Laufzeitdiagrammdarstellungen und das frequenzabhängige axiale Auflösungsvermögen der Sonden betrachtet. Um die medizinische Anwendung zu simulieren, wird mit der Apparatur anschließend ein Brustmodell auf Tumore untersucht.

2 Theorie [1]

Das menschliche Gehör ist für Frequenzen von 16 Hz bis 20 kHz empfindlich. Unterhalb der Hörschwelle handelt es sich um Infraschall, weit oberhalb liegen die Hyperschallfrequenzen. Von besonderem Interesse ist der Bereich von 20 kHz bis 1 GHz. Dieser wird als Ultraschall bezeichnet und findet aufgrund seiner günstigen Eigenschaften zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung sowie in der Medizin vielfältige technische Anwendungen.

2.1 Grundlegendes Verhalten von Schallwellen

Schall lässt sich grundsätzlich als longitudinale Druckwelle der Form

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

beschreiben, wobei $Z = c\rho$ als akustische Impedanz oder auch Schallkennwiderstand bezeichnet wird.

2.1.1 Geschwindigkeit

Schallwellen teilen mit Phänomenen wie Reflexion und Brechung einige Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen, die Phasengeschwindigkeit c weist allerdings wegen Änderungen von Druck p und Dichte ρ im durchstrahlten Medium eine abweichende Materialabhängigkeit auf. In Flüssigkeiten ist

$$c_l = \sqrt{\frac{1}{\kappa\rho}}$$

mit der Kompressibilität κ angegeben. Wegen auftretender Schubspannungen bilden sich innerhalb von Festkörpern auch Transversalwellen aus, in diesem Fall bemisst

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

die Propagationsgeschwindigkeit des Schalls. Das Elastizitätsmodul E nimmt hier die Rolle der reziproken Kompressibilität an, weshalb die Schallgeschwindigkeit in Feststoffen im Allgemeinen richtungsabhängig ist.

2.1.2 Übertragung

Durch verlustbehaftete Interaktionen mit der Materie kommt es zur Absorption der Schallwelle, bei der die übertragene Energie in der Regel exponentiell mit der Distanz x über einen Term der Form

$$I(x) = I_0 \exp(\alpha x)$$

abfällt. Der Absorptionskoeffizient α verknüpft dabei die Ausgangsintensität I_0 mit der Intensität nach einer zurückgelegten Strecke. An Grenzflächen wird ein Intensitätsanteil

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (1)$$

reflektiert, dieser Reflexionskoeffizient setzt sich aus den Impedanzen Z der Grenzmedien zusammen. Die Transmission gehorcht entsprechend $T = 1 - R$.

2.2 Medizinische Anwendung von Ultraschall

In der Medizin werden meist Kontaktmittel zwischen Schallgeber und Material verwendet, da Ultraschall stark von der Umgebungsluft absorbiert wird. Auf diese Weise lassen sich dann Informationen über die innere Struktur durchstrahlter Materialien gewinnen. Die beschriebenen Methoden lassen sich größtenteils auf die Werkstoffprüfung übertragen.

2.2.1 Piezoelektrizität

Wird ein elektrisches Wechselfeld parallel zu einer polaren Achse eines piezoelektrischen Kristalls geschaltet, kann dieser zu Schwingungen im Ultraschallbereich angeregt werden. Abstimmung von Anregungs- und Eigenfrequenz erlaubt durch Resonanz das Erzeugen großer Wellenamplituden. Verwenden dieses mit dem Begriff reziproker piezoelektrischer Effekt bezeichneten Phänomens ermöglicht die Nutzung extrem hoher Schallenergiedichten. Über den umgekehrten Effekt dient der Piezokristall auch als Detektor, indem er durch eintreffende Schallwellen in Schwingung versetzt wird. Wegen ihrer gleichbleibenden physikalischen Eigenschaften werden solche Messapparaturen typischerweise mithilfe von Quarzen realisiert.

2.2.2 Scanverfahren

Zur medizinischen Untersuchung von Körpern mittels Durchstrahlung werden häufig Laufzeitmessungen durchgeführt und ausgewertet. Die verwendete Ultraschalltechnik besteht prinzipiell daraus, einen kurz Schallimpuls auszusenden und nach definierter Strecke zu empfangen. Detektieren von Zeitintervall und Amplitude gibt so Aufschluss über den inneren Aufbau des Stoffes.

Durchschallung Wie in Abbildung 1 zu erkennen, werden zum Durchschallungs-Verfahren Schallsignale ausgesendet und auf der gegenüberliegenden Seite der Probe empfangen. Falls dazwischen Fehlstellen liegen, kann deren Einfluss in Form einer abgeschwächten Intensität am Ultraschalldetektor gemessen werden. Diese Methode lässt jedoch keine Rückschlüsse über Tiefe und Form der Störquelle zu.

Impuls-Echo Anhand Abbildung 1 wird deutlich, dass zur Anwendung des Impuls-Echo-Verfahrens der Ultraschallsender auch als Empfänger fungiert. Der ausgesendete Puls wird dazu nach (1) an Fehlstellen reflektiert, das resultierende Echo lässt sich aufzeichnen und bewerten. Dessen Höhe gibt Aufschluss über die räumliche Ausdehnung der Fehlstelle, bei bekannter Schallgeschwindigkeit folgt mit

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

die Lage innerhalb der Probe. Bei der Auswertung kommen in der Medizin verschiedene Darstellungsarten der Laufzeitdiagramme zum Einsatz.

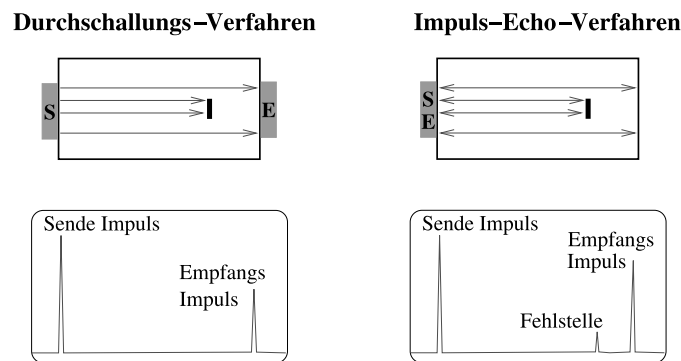


Abbildung 1: Exemplarische Signalverläufe und Impulsfolgen der Scanverfahren. [1]

Darstellungsformen

- Der eindimensionale **Amplitude-Scan** (A-Scan) ermöglicht Strukturabtastung, indem die Amplitude des Echos gegen die Laufzeit aufgetragen wird.
- Zur Durchführung eines **Brightness-Scans** (B-Scan) wird die Ultraschallsonde über die Oberfläche der Probe bewegt, sodass sich ein zweidimensionales Schnittbild aufnehmen lässt. Dazu werden die Echoamplituden als Helligkeitsstufen angezeigt.
- Mit dem **Time-Motion-Scan** (TM-Scan) wird durch schnelles Abtasten zeitliche Auflösung gewonnen, um etwa die Bewegung eines Organs sichtbar zu machen.

3 Durchführung

Zur Vorbereitung können die Schallgeschwindigkeiten von Acryl $c_{\text{Acryl}} = 2700 \text{ m s}^{-1}$ [2] sowie von destilliertem Wasser und Luft mit $c_{\text{Wasser}} = 1497 \text{ m s}^{-1}$ und $c_{\text{Luft}} = 346 \text{ m s}^{-1}$ [4] bei einer Temperatur von 25°C angegeben werden. Wegen $\lambda = c/\nu$ und $T = 1/\nu$ lauten Wellenlänge und Periode in Acryl bei Frequenzen von 1 MHz, 2 MHz und 4 MHz jeweils:

ν / MHz	λ / mm	$T / \mu\text{s}$
1	2,700	1,00
2	1,350	0,50
4	0,675	0,25

Zur Aufnahme und Analyse der Daten stehen ein Ultraschallechoskop im Impuls-Betrieb, Ultraschallsonden der Frequenzen 1 MHz und 2 MHz für das Impuls-Echo-Verfahren, sowie ein Rechner mit dem Programm AScan zur Verfügung. Damit lassen sich A- und B-Scans erstellen, wobei das Signal des A-Scans wahlweise als Funktion der Laufzeit oder bei bekannter Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Eindringtiefe dargestellt werden kann. Zum B-Scan werden die aufgenommenen Grafiken exportiert.

Exemplarisch für eine Anwendung in der Werkstoffprüfung wird zunächst ein Acrylblock vermessen. Dieser enthält Bohrungen unterschiedlicher Größe und Position, unter Verwendung der 2 MHz Sonde werden diese Maße je mittels A- und B-Scan bestimmt. Durch Einsatz beider Sonden lässt sich anhand zwei benachbarter Störstellen zudem das Auflösungsvermögen der verfügbaren Frequenzen 1 MHz und 2 MHz vergleichen. Als Kontaktmittel wird bidestilliertes Wasser verwendet. Als Referenz werden alle Messungen auch mit einer Schieblehre durchgeführt.

Anschließend wird als Beispiel für eine medizinische Anwendung ein Brustmodell auf Lage, Größe und Art verschiedener Tumore untersucht. Diese werden dazu ertastet und dann per B-Scan aufgenommen. Hierbei dient ein zäheres Ultraschallgel als Kopplungsmittel.

4 Auswertung

4.1 Fehlerrechnung

Die Fehlerrechnung, für die Bestimmung der Messunsicherheiten, wird mit Uncertainties [3] gemacht. Die Formel der Gauß Fehlerfortpflanzung ist gegeben durch

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2}. \quad (3)$$

Für den Mittelwert gilt

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (4)$$

Der Fehler des Mittelwertes ist gegeben durch

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (5)$$

4.2 Vermessung des Acrylblocks mit einer Schieblehre

Der gegebene Acrylblock und dessen Bohrungen wurde wie in Abbildung 2 dargestellt, vermessen. Der Block ist 80,4 mm breit, 150,3 mm lang und 40,3 mm tief. Für die Abstände a_k und b_k und den Durchmesser d der jeweiligen Bohrungen wurde ein Ablesefehler von 0,05 mm angenommen.

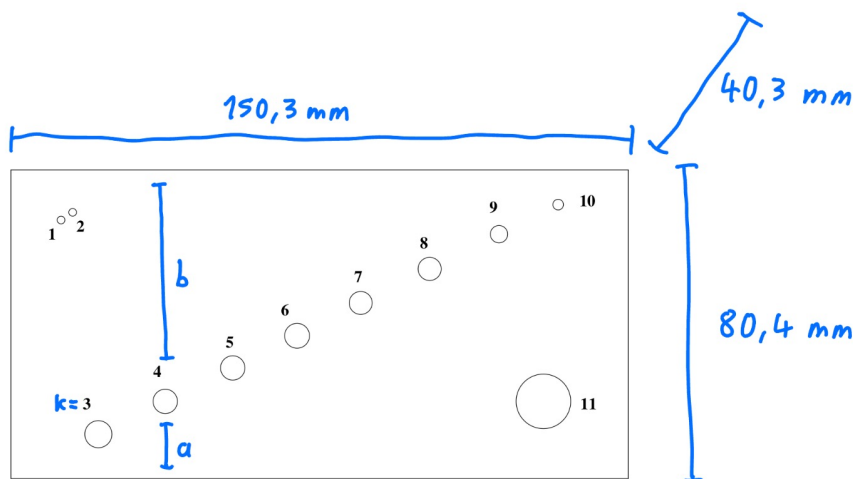


Abbildung 2: Acrylblock mit Bohrungen und Maßen. [1]

Die Messdaten der Abstände a_k und b_k sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Abmessung der Löcher des Acrylblocks.

Loch	a_k/mm	b_k/mm	d/mm
1	-	-	1.45
2	-	-	1.5
3	13.5	61.85	6
4	21.85	54.4	4.9
5	30.3	47.0	4
6	38.7	39.5	2.9
7	46.8	31.0	3
8	54.7	23.0	2.9
9	62.7	15.35	2.85
10	70.6	7.2	2.85
11	15.2	55.8	9.5

Die ersten beiden Löcher werden nur zur Untersuchung des Auflösungsvermögens verwendet, daher wurden nur die Durchmesser aufgenommen.

4.3 Untersuchung der Störstellen des Acrylblocks mit A-Scan

Mit Hilfe des A-Scans wurden die Laufzeiten für die Löcher $k = 3$ bis $k = 9$ bestimmt und in der Tabelle 2 aufgetragen. Es wurde dabei von oben gemessen und somit wurden die Laufzeiten für die a'_k s aufgenommen.

Tabelle 2: Laufzeit von Loch $k=3$ bis $k=9$.

Loch	Laufzeit $t/\mu\text{s}$
3	10.83
4	17.0
5	23.6
6	29.8
7	35.4
8	41.1
9	46.7

Die Messwerte der Laufzeiten wurden in einem Plot dargestellt, wobei eine lineare Regression der Form

$$f(x) = a \cdot x + b$$

durchgeführt wurde. Der Plot ist in der Abbildung 3 dargestellt.

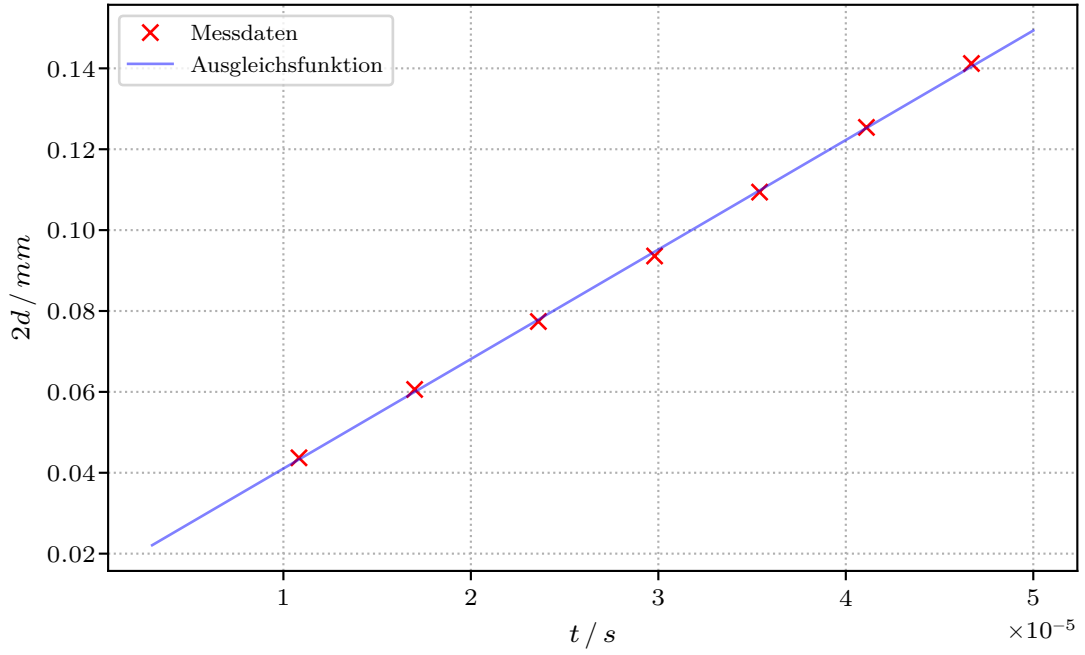


Abbildung 3: Die Laufzeit des A-Scans gegen die Abstände a_k aufgetragen und die lineare Ausgleichsgerade.

Für die Parameter der Ausgleichsfunktion gilt

$$a = (2708 \pm 23) \text{ m s}^{-1}$$

$$b = (14 \pm 0.7) \text{ mm}.$$

Dabei entspricht a der Steigung der Geraden, welche die Schallgeschwindigkeit ζ_{exp} in dem Material ist. Der Literaturwert der Schallgeschwindigkeit $\zeta_{\text{theo}} = 2700 \text{ m s}^{-1}$ [2] wird im weiteren Verlauf für die Messungen des A-Scans als auch des B-Scans verwendet. Der y-Achsen-Abschnitt b gibt die Dicke der Anpassungsschicht an.

Die aufgenommenen Messdaten des A-Scans sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Messwerte des A-Scan.

Loch	a_k / mm	b_k / mm	a_k / a'_k	b_k / b'_k
3	14,7	63,0	1,089	1,019
4	23,5	55,4	1,076	1,018
5	32,1	47,8	1,059	1,017
6	40,8	40,4	1,054	1,023
7	48,4	32,2	1,034	1,039
8	56,2	24,4	1,027	1,061
9	64,2	16,8	1,024	1,094
10	73,1	8,7	1,035	1,208
11	17,2	56,8	1,132	1,018

In Tabelle 3 sind die mittels A-Scan aufgenommenen Werte sowie deren Verhältnisse zu den vorherigen Messungen mit der Schieblehre aus Tabelle 1 eingetragen. Die bereits in Tabelle 1 nachgehaltenen Messdaten werden an dieser Stelle zur Unterscheidung mit a'_k und b'_k markiert. Nach Formel (4) können daraus die mittleren Verhältnisse 1,059 für a_k / a'_k und 1,055 für b_k / b'_k berechnet werden. Die relativen Abweichungen lauten dann

$$\begin{aligned}\Delta a_k &= a_k / a'_k - 1 = 5,9 \% \\ \Delta b_k &= b_k / b'_k - 1 = 5,5 \% .\end{aligned}$$

4.4 Untersuchung der Störstellen des Acrylblocks mit B-Scan

Mittels des B-Scan wurden Aufnahmen von der oberen und der unteren Kante des Acryl-Blocks durchgeführt. Diese sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu sehen. Anhand des Cursors können die jeweiligen Störstellen lokalisiert werden.

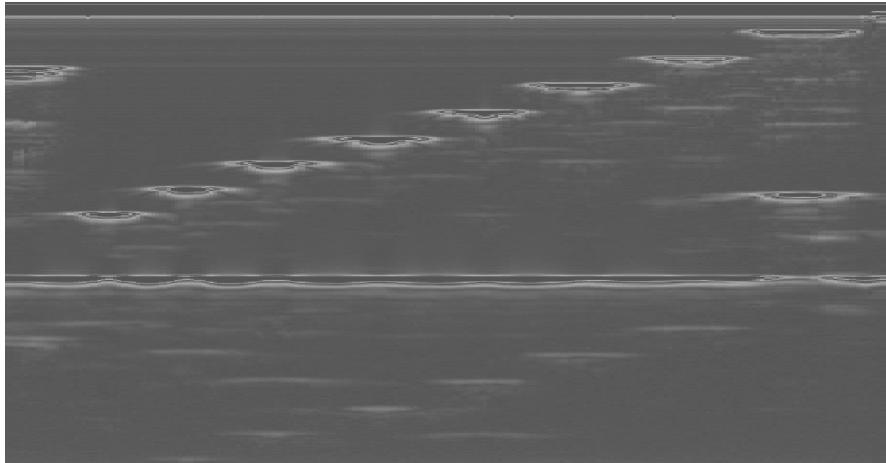


Abbildung 4: Abbildung des Acrylblocks mit B-Scan von oben.

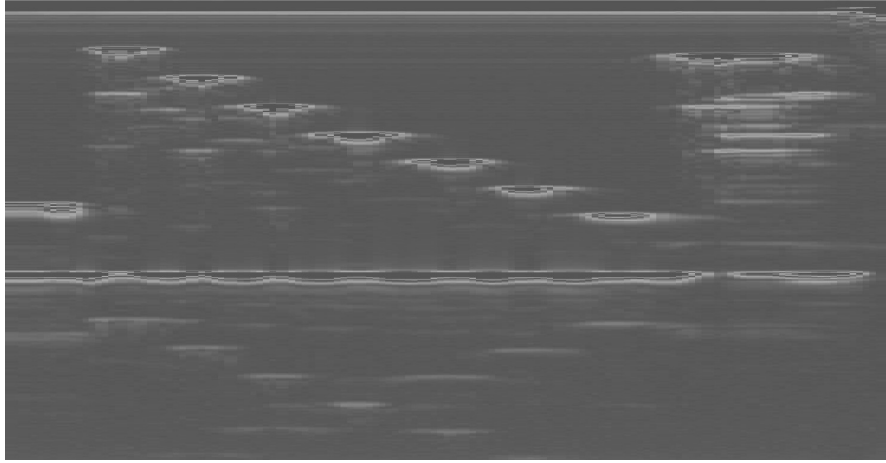


Abbildung 5: Abbildung des Acrylblocks mit B-Scan von unten.

Die Messwerte des B-Scan sind in der Tabelle 4 aufgetragen. Für $k = 10$ konnte kein Wert a_k aufgenommen werden, daher wird dieser im Folgenden ignoriert.

Tabelle 4: Messwerte des B-Scan.

Loch	a_k / mm	b_k / mm	a_k / a'_k	b_k / b'_k
3	15,1	63,3	1,119	1,023
4	23,6	55,8	1,080	1,026
5	32,4	48,2	1,069	1,026
6	40,8	40,8	1,054	1,033
7	48,9	33,0	1,045	1,065
8	56,5	24,8	1,033	1,078
9	64,7	16,8	1,032	1,094
10	-	9,0	-	1,250
11	17,2	57,4	1,132	1,029

Analog zu den Daten in Tabelle 3 lassen sich aus den Verhältnissen in Tabelle 4 die Mittelwerte 1,070 für a_k / a'_k und 1,069 für b_k / b'_k nach Vorschrift (4) berechnen. Gleiches Vorgehen wie zuvor liefert dann die prozentualen Abweichungen

$$\Delta a_k = a_k / a'_k - 1 = 7,0 \%$$

$$\Delta b_k = b_k / b'_k - 1 = 6,9 \%$$

4.5 Untersuchung des Auflösungsvermögens

Die Löcher $k = 1$ und $k = 2$ wurden mittels A-Scan jeweils mit einer 1 MHz Sonde und mit einer 2 MHz näher betrachtet. Die dabei aufgenommenen Messergebnisse sind in

Abbildung 6 und Abbildung 7 zu sehen.

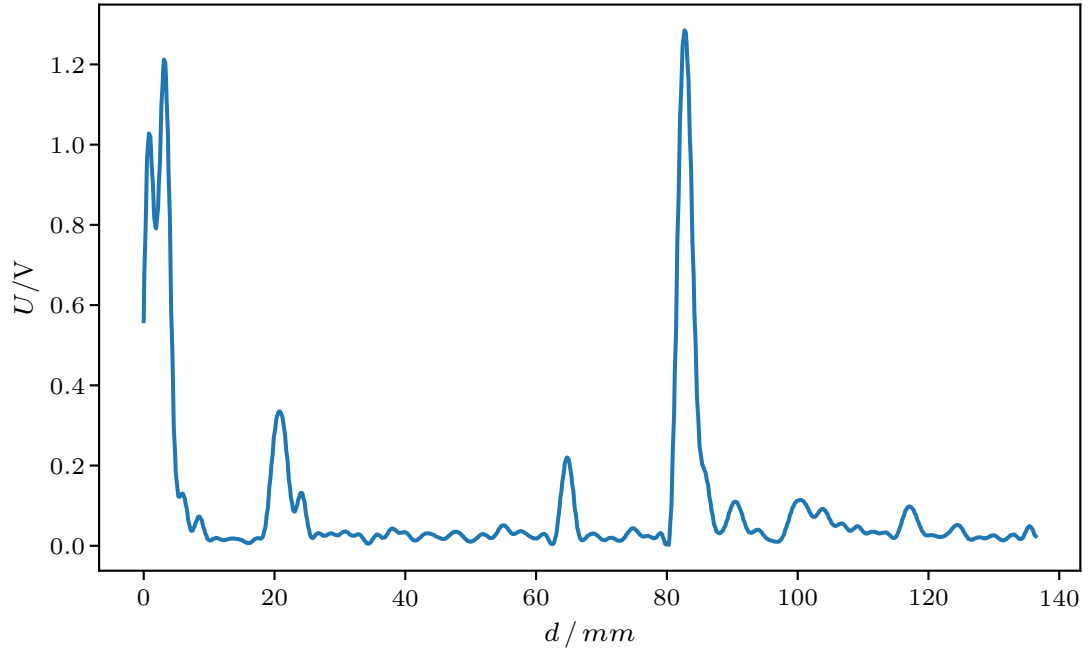


Abbildung 6: A-Scan für die Löcher $k = 1$ und $k = 2$ mit einer 1 MHz Sonde.

In der Abbildung 6 ist bei $d = 20$ mm nur ein breiter Peak zu sehen, anhand dessen können die beiden Löcher nicht unterschieden werden.

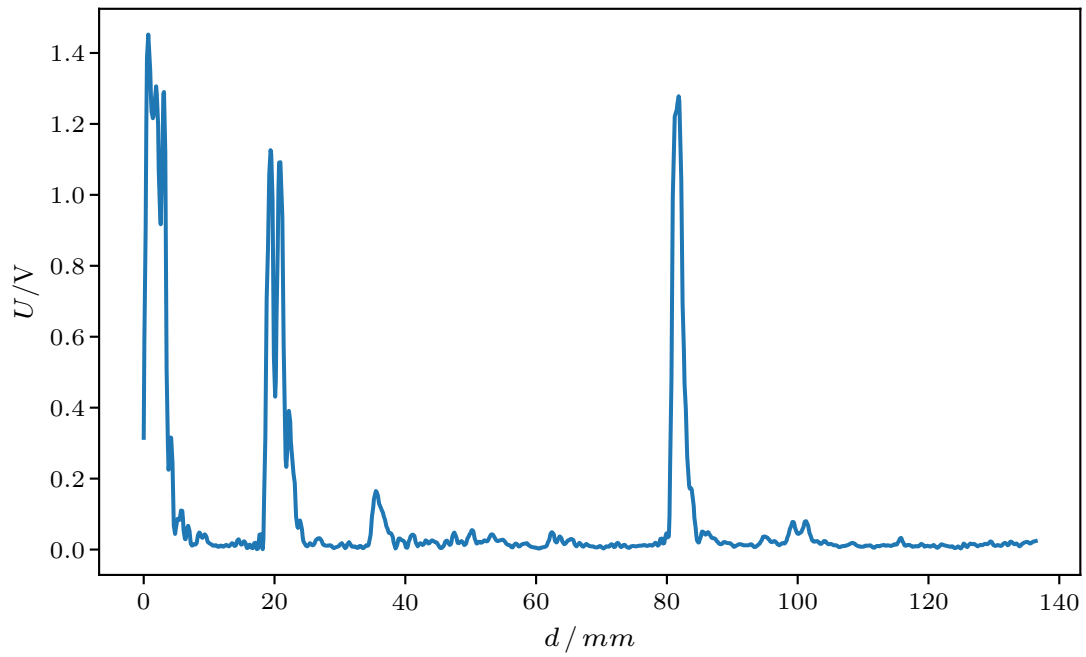


Abbildung 7: A-Scan für die Löcher $k = 1$ und $k = 2$ mit einer 2 MHz Sonde.

An der Stelle $d = 20$ mm sind zwei eindeutige Peaks zu erkennen, welche den beiden Löchern $k = 1$ und $k = 2$ zugeordnet werden können.

4.6 Untersuchung des Brustmodells mittels B-Scan

Das gegebene Brustmodell wurde mittels B-Scan mehrmals untersucht, dabei waren die Messungen nicht alle gut, daher wurden die unbrauchbaren Bilder verworfen.

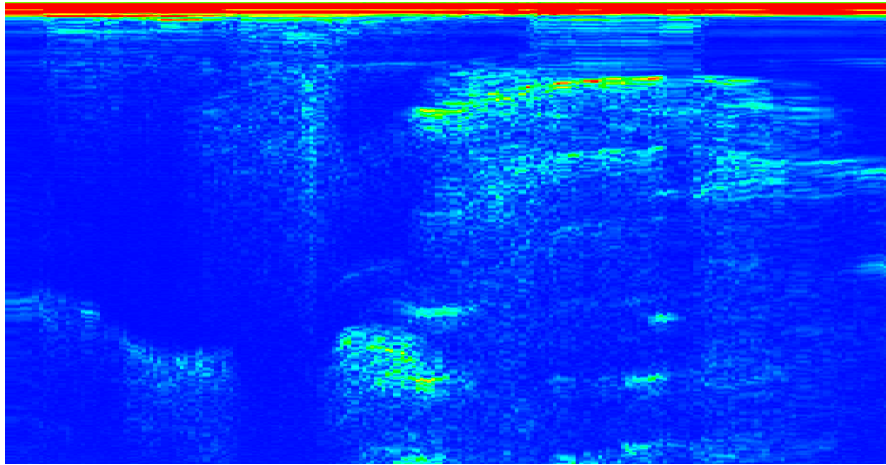


Abbildung 8: Erster B-Scan der Brustmodells.

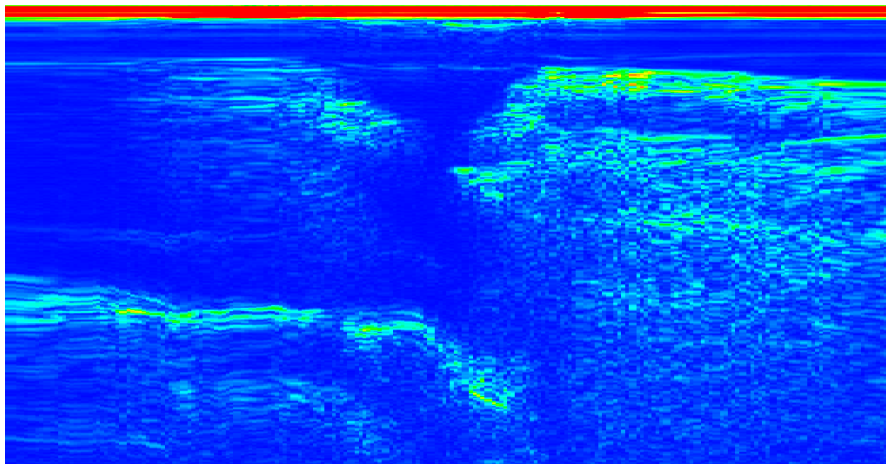


Abbildung 9: Zweiter B-Scan der Brustmodells.

Anhand der Abbildung 9 kann gesagt werden, dass es sich bei den zwei oberen Arealen um die gesuchten Störstellen handelt. Der rechte obere Fleck ist aufgrund der farblich

gekennzeichneten höheren Dichte der Tumor. Die rötlichen Farben entsprechen helleren Bereichen und damit höheren reflektierten Anteilen, folglich ist das Gewebe dichter. Der linke Bereich deutet auf eine Zyste hin, da diese kein Knoten, sondern ein Hohlraum ist und auf dem Bild diffuser erscheint.

5 Diskussion

Die experimentell bestimmte Schallgeschwindigkeit $\zeta_{\text{exp}} = (2708 \pm 23) \text{ m s}^{-1}$ weicht von dem theoretischen Wert $\zeta_{\text{theo}} = 2700 \text{ m s}^{-1}$ [1] um 0.3% ab. Damit kann der Theoriewert bestätigt werden.

Bei der Bestimmung der Abmessungen der Störstellen des Acrylblocks wurde zunächst eine Schieblehre verwendet. Die bestimmten Abstände wurden dann mit einem A-Scan und mit einem B-Scan untersucht. Schließlich wurden die Messwerte mittels Schieblehre mit denen des A-Scan und des B-Scan verglichen, indem die Differenzen der Abstände gebildet worden sind und diese darauf gemittelt wurden. Die gemittelten Differenzen sind im Unterabschnitt 4.4 zu finden. Dabei fällt auf, dass die Differenz der b_k größer ist, sowohl bei dem A-Scan als auch bei dem B-Scan. Die Abweichungen kommen zustande, da bei dem B-Scan, die Abstände graphisch bestimmt worden sind. Dies führte wiederum zu zufälligen Fehlern, die beispielsweise beim Ablesen passiert sind. Zusammenfassend weist der A-Scan eine höhere Präzision auf als der B-Scan.

Für die Untersuchung des Auflösungsvermögen wurde eine 1 MHz Sonde und eine 2 MHz Sonde verwendet. Es konnte festgestellt werden, dass die 2 MHz Sonde eine bessere Auflösung hergibt. Damit kann die Theorie, dass eine höhere Frequenz der Sonde zu einem bessern Ergebnis führt, bestätigt werden.

Das Brustmodell konnte grob untersucht werden. Durch vorheriges Abtasten war die ungefähre Position der Gewebeknoten bestimmt. Bei dem B-Scan wurde entlang einer gedachten Linie gemessen, dass führte dazu, dass die Bilder leicht verzerrt wirkten. Ohne medizinisches Wissen kann keine exakte Aussage über die genaue Lage und die Art des Gewebes getroffen werden. Stattdessen wurde eine ungefähre Einschätzung anhand der Bilder aufgestellt.

Literatur

- [1] *Anleitung zu Ultraschall 1, Scanverfahren mit Ultraschall*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.
- [2] *Anleitung zu Ultraschall 3, Dopplersonographie*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] „Speed of Sound in Various Media“. In: David R. Lide. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Section 14: Geophysics, Astronomy, and Acoustics. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005, S. 42.

Anhang

USA
Acryl Block

Breite 80,4 mm
Länge 150,3 mm
Tiefe 40,3 mm

→ Schief Ansatz von Schrauben

2 MHz

Abstand zwischen 0,9

Rück

	ax/mm	bx	d	a/mm
3	13,5	61,85	6	1,45
4	21,85	54,4	4,9	1,5
5	30,3	47,00	4	
6	38,7	39,5	2,9	
7	46,8	31,0	3	
8	54,7	23,0	2,9	
9	62,7	15,35	2,85	
10	70,6	7,2	2,85	
11	78,2	55,8	9,5	

	Laufzeit t in μs	
3	10,83	2730
4	17,0	Schallgeschw. Acryl
5	23,6	
6	29,8	Zeiten für a
7	35,4	
8	41,1	
9	46,7	
10		
11		Runen

Peaks Auflösung

- 1) 19,3 mm 2MHz
- 2) 20,9 mm

	ax 1mm	bx 1mm	B-Scan 1mm	0
3	14,7	63,0	63,3	15,1
4	23,5	55,4	55,8	23,6
5	32,1	47,8	48,2	32,4
6	40,8	40,4	40,8	40,8
7	48,4	32,2	33,0	48,9
8	56,2	24,4	24,8	56,5
9	64,2	16,8	16,8	64,7
10	73,1	8,7	9,0	/
11	17,2	56,8	57,4	17,2

Puer