

US2

Scanverfahren

Lukas Bertsch

lukas.bertsch@tu-dortmund.de

Steffen Kober

steffen.kober@tu-dortmund.de

Durchführung: 05.04.2022

Abgabe: 12.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Erzeugung von Ultraschall	3
1.2	Physikalische Grundlagen der Scanverfahren	3
1.3	Scanverfahren	4
2	Durchführung	4
2.1	Vorbereitungsaufgaben	5
2.2	Versuchsdurchführung	5
3	Auswertung	7
3.1	Abmessungen des Acrylblocks	7
3.2	A-Scan zur Bestimmung der Dicke der Kontaktmittelschicht	8
3.3	A-Scan zur Bestimmung der genauen Positionen der Fehlstellen	8
3.4	Untersuchung des Auflösungsvermögens	10
3.5	Bestimmung der Fehlstellen über einen B-Scan	11
3.6	Untersuchung des Brustmodells mit einem B-Scan	13
4	Diskussion	14
	Literatur	15

1 Theorie

Schallwellen sind Druckschwankungen in einem Medium, welche sich gemäß der Wellengleichung

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

ausbreiten. $Z = c \cdot \rho$ beschreibt dabei die materialabhängige akustische Impedanz, p_0 den Normaldruck des Mediums. Der Frequenzbereich des Schalls von 20 MHz bis 1 GHz befindet sich über dem Hörbaren und wird als *Ultraschall* bezeichnet. Schall dieses Frequenzbereiches kann zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung genutzt werden und findet so unter anderem Anwendung in der Medizin.

1.1 Erzeugung von Ultraschall

Um Ultraschall zu erzeugen, kann der *piezo-elektrische Effekt* genutzt werden. Ein piezoelektrischer Kristall wird in ein elektrisches Wechselfeld gesetzt, welches bei paralleler Anordnung einer polaren Achse des Kristalls zu den elektrischen Feldlinien diesen in Schwingung versetzt, wodurch Ultraschallwellen erzeugt werden. Passt die Anregungsfrequenz zur Eigenfrequenz des Kristalls (Resonanzfall), können große Schwingungsamplituden (Schallenergiedichten) erzeugt werden. Umgekehrt kann ein solcher Kristall als Empfänger genutzt werden, da er bei Anregung durch Schallwellen ebenfalls in Schwingung versetzt wird.

1.2 Physikalische Grundlagen der Scanverfahren

Bei Scanverfahren mit Ultraschall wird das Wellenverhalten des Schalls ausgenutzt. Anhand der Medium-abhängigen Schallgeschwindigkeit c können mithilfe der Laufzeit t eines Impulssignals und dem Weg-Zeit-Gesetz

$$s = v \cdot t \tag{1}$$

Abstände bestimmt werden. In Flüssigkeiten kann die Schallgeschwindigkeit mit der Kompressibilität κ über $c_{\text{Fl}} = \sqrt{1/\kappa\rho}$ bestimmt werden, in Feststoffen lautet die Gleichung $c_{\text{Fe}} = \sqrt{E/\rho}$, mit dem Elastizitätsmodul E . Über die Schallgeschwindigkeit c und die Frequenz f der Schallwelle kann die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2}$$

der Schallwelle berechnet werden. Die Intensität I des Signals nimmt exponentiell mit der Strecke x ab

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

wobei α ein materialabhängiger Absorptionskoeffizient ist. Da die Absorption in Luft sehr stark ist, wird in der Regel ein Kontaktmittel (z.B. Wasser) zwischen Sender und

Material verwendet. An Grenzflächen verschiedener Stoffe wird ein Teil der Schallwelle reflektiert. Der reflektierte Anteil R kann mit den akustischen Impedanzen $Z = \rho \cdot c$ der angrenzenden Materialien über

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

bestimmt werden. $T = 1 - R$ ist der transmittierte Anteil.

1.3 Scanverfahren

Grundlegend können zwei verschiedene Verfahren angewendet werden.

Bei dem *Durchschallungsverfahren* wird ein Schallimpuls an einer Seite des zu analysierenden Stückes ausgesendet und an der Anderen von einem Empfänger aufgenommen. Das Vorhandensein von Störstellen im Material lässt sich über abweichende Intensitäten des Empfangsimpulses feststellen, über die Größe dieser Störstelle kann keine Aussage getroffen werden.

Bei dem *Impuls-Echo-Verfahren* wird die Reflektion der Schallwelle an Grenzflächen ausgenutzt, indem der Sender gleichzeitig als Empfänger dient und den reflektierten Teil des Signals an Grenzflächen von Stoffen detektiert. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit lässt sich so eine Aussage über die Tiefe der Störstelle mit dem Weg-Zeit-Gesetz (1) und der Signallaufzeit treffen.

Aufgenommene Messdaten der Signallaufzeit können in einem *A-Scan*, *B-Scan* oder *TM-Scan* dargestellt werden.

- Beim **A**mplituden-Scan werden lediglich die empfangenen Echoamplituden als Funktion der Laufzeit (oder als Funktion der Tiefe, unter Angabe von c) in einem Diagramm dargestellt.
- Beim **B**rightness-Scan kann der Sender entlang einer Linie bewegt werden, wobei ein zweidimensionales Bild des Querschnitts des untersuchten Materials erstellt wird. Die gemessenen Amplituden werden zu jeder Tiefe (Laufzeit) in Helligkeitsstufen (oder wahlweise Farbstufen) dargestellt.
- Beim **T**ime-**M**otion-Scan wird durch Aussenden mehrerer Signale eine Bildfolge aufgenommen. Dies macht es möglich Bewegungen, wie beispielsweise die eines Organs, in dem untersuchten Objekt/Körper sichtbar zu machen.

2 Durchführung

In diesem Versuch werden ein Acrylblock und ein Brustmodell mit verschiedenen Ultraschall Scan-Verfahren untersucht. Es genügt nicht die Ultraschallsonde auf das zu untersuchende Material zu halten, da sich dann zwischen der Sonde und dem Material eine Luftschicht befindet, wodurch die Messung misslingen würde. Um dies zu vermeiden wird ein Kontaktmittel auf das Material aufgetragen. Für den Acrylblock wird destilliertes Wasser verwendet. Die Dicke dieser Wasserschicht muss jedoch bei der Auswertung berücksichtigt werden, um systematische Abweichungen zu vermeiden.

2.1 Vorbereitungsaufgaben

Wie in Unterabschnitt 1.2 erwähnt, ist die Schallgeschwindigkeit c eine materialabhängige Konstante. Für den folgenden Versuch sind drei Schallgeschwindigkeiten relevant. Destilliertes Wasser hat bei 20 °C eine Schallgeschwindigkeit von 1483 m/s, in Acryl beträgt die Schallgeschwindigkeit 2730 m/s und in Luft (bei 20 °C) 344 m/s. Es werden zwei verschiedene Messsonden verwendet. Eine sendet Ultraschall mit einer Frequenz von 1 MHz und die Andere mit 2 MHz. Mittels Gleichung 2 kann die Wellenlänge und Periodendauer in Acryl bestimmt werden. Dazu wird die zuvor erwähnte Schallgeschwindigkeit verwendet. Mit einer Frequenz von 1 MHz ergibt sich eine Wellenlänge von 2,73 mm und eine Periodendauer von 1 μ s. Bei 2 MHz liegt die Wellenlänge bei 1,365 mm und die Periodendauer bei 0,5 μ s.

2.2 Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung mit Ultraschall wird ein Ultraschallechoskop und Ultraschallsonden verschiedener Frequenzen benötigt. Des Weiteren wird ein Acrylblock, welcher in Abbildung 1 dargestellt ist, und destilliertes Wasser benötigt. Das Ultraschallechoskop wird im Impuls-Echo-Verfahren verwendet. Die Sendefrequenz wird in einem Bereich von 0 dB bis 30 dB eingestellt. Die Empfängerfrequenz in einem Bereich von 0 dB bis 35 dB. Das Ultraschallechoskop wird mit einem Computer verbunden, an welchem das Programm *A-Scan* die Messwerte verarbeitet.

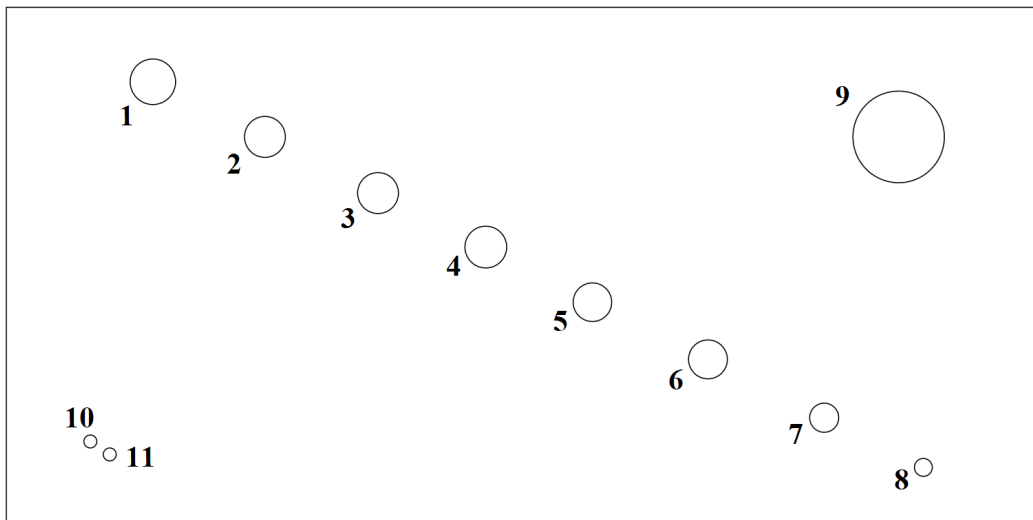


Abbildung 1: Dies ist eine Skizze des verwendeten Acrylblocks, den Fehlstellen wurden Nummern zugewiesen, auf die im Folgenden referenziert wird. [2].

Zuerst wird mit der händischen Vermessung des Acrylblocks begonnen. Dabei werden sowohl die Gesamtmaße des Blocks, wie auch die einzelnen Positionen und Größen der zu

untersuchenden Störstellen bestimmt. Nun wird das Ultraschallechoskop in Betrieb genommen und das Programm *A-Scan* gestartet. Der Acrylblock muss mit einer ausreichend großen Menge destilliertem Wasser benetzt werden. Mit Hilfe der grafisch dargestellten Peaks werden die Laufzeiten des Signals für sieben Fehlstellen bestimmt. Hierzu ist es nicht relevant welche Sonde verwendet wird. Aus diesen Werten kann in Abschnitt 3 die Abweichung zur erwarteten Laufzeit und somit die Dicke der Anpassungsschicht bestimmt werden.

Im nächsten Teil des Versuches wird die Lage aller Fehlstellen mit dem A-Scan-Verfahren ermittelt, wobei die 2 MHz Sonde verwendet wird. Auch hier wird das Ultraschallechoskop im Impuls-Echo-Verfahren verwendet. Sobald die Signallaufzeiten für alle Fehlstellen notiert sind, wird der Block auch von der gegenüberliegenden Seite untersucht. Die Einstellungen und das Messverfahren sind identisch zu dem vorherigen. Daraus kann die genaue Position und die Größe der Fehlstellen im Acrylblock bestimmt werden.

In dem Acrylblock befinden sich zwei Störstellen, welche unmittelbar nebeneinander liegen. Anhand dieser soll nun das Auflösungsvermögen der Sonden untersucht werden. Zuerst wird ein A-Scan dieser Stelle mittels der 1 MHz Sonde angefertigt. Dies wird für die 2 MHz Sonde wiederholt. Die jeweiligen Peaks werden als Graphiken exportiert.

Zuletzt wird nun ein B-Scan des Acrylblocks angefertigt. Dazu wird die 2 MHz Sonde verwendet. Sobald das Programm für den B-Scan gestartet wird, muss die Ultraschallsonde langsam, mit konstanter Geschwindigkeit, in einer geraden Linie über den Acrylblock geführt werden. Dies wird auf beiden Seiten des Acrylblocks durchgeführt. Der jeweils erstellte B-Scan wird gespeichert. Mittels der beiden Bilder können die Abmessungen der Störstellen berechnet werden.

Im letzten Teil des Versuches wird ein Brustmodell untersucht, in welchem sich zwei „Tumore“ befinden. Das Modell ist in Abbildung 2 abgebildet. Zu Beginn wird die ungefähre Lage der Tumore ertastet. Im A-Scan-Programm werden die Einstellungen des Ultraschallechoscops optimiert. Dabei wird getestet welche Einstellungen und welche Sonde die klaren Ergebnisse liefern. Es sollte eine Ultraschallgel als Kontaktmittel verwendet werden. Anschließend wird ein B-Scan durchgeführt. Der Scan findet erneut entlang einer geraden Linie statt. Es werden solange Scans angefertigt, bis die Art, Größe und Lage des Tumors bestimmt werden kann.



Abbildung 2: Dies ist ein Bild des verwendeten Brustmodells.

3 Auswertung

Im Folgenden wird die Schallgeschwindigkeit in Acryl als $c_{\text{Acryl}} = 2730 \text{ m/s}$ und die von destilliertem Wasser als $c_{\text{H}_2\text{O}} = 1483 \text{ m/s}$ [1] angenommen. Der verwendete Acrylblock hat eine Gesamthöhe $h_{\text{ges}} = 80,55 \text{ mm}$. Die Fehler zur Bestimmung der Dicke der Kontaktmittelschicht wurden gemäß des Standardfehlers des Mittelwertes durch

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

berechnet. Alle anderen Fehler genügen der gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta F = \sqrt{\sum_i \left(\frac{dF}{dy_i} \Delta y_i \right)^2}. \quad (4)$$

3.1 Abmessungen des Acrylblocks

In Tabelle 1 werden die Positionen und Durchmesser der Fehlstellen im Acrylblock aufgeführt. Die Nummerierung der Fehlstellen und die Bedeutung von „oben“ und „unten“ sind Abbildung 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Mit dem Messschieber bestimmte Realwerte der Abmessungen. N beschreibt die Nummer der Fehlstelle, 'o' die Tiefe der Fehlstelle von oben und 'u' die Tiefe der Fehlstelle von unten. d beschreibt den Durchmesser.

N	$o(N)/\text{mm}$	$u(N)/\text{mm}$	d/mm
1	13,35	61,30	5,90
2	21,80	53,75	5,00
3	30,60	45,95	4,00
4	38,80	38,85	2,90
5	46,75	30,90	2,90
6	54,80	22,85	2,90
7	62,80	14,85	2,90
8	71,00	6,65	2,90
9	16,10	54,65	9,80
10	59,40	19,70	1,45
11	61,20	17,90	1,45

3.2 A-Scan zur Bestimmung der Dicke der Kontaktmittelschicht

Aus diesen Werten kann nun die theoretische Laufzeit des Ultraschallsignals durch den Acrylblock bestimmt werden. Unter Verwendung der Werte aus Tabelle 1 kann die theoretische Laufzeit des Ultraschallsignals im Acrylblock bestimmt werden, welche sich gemäß der Formel (5) bestimmt.

$$t_{\text{Theorie}} = 2 \cdot c_{\text{Acryl}} \cdot o(N) \quad (5)$$

Die gemessenen Werte der Laufzeit, welche in Tabelle 2 zu sehen sind, unterscheiden sich aufgrund der Kontaktmittelschicht von der Theorie. Um diesen systematischen Fehler zu eliminieren wird mittels einer Ausgleichsrechnung die Dicke der Anpassungsschicht bestimmt. Dazu wird zunächst der Betrag der Differenz zwischen den Theoriewerten und den Messwerten gebildet. Diese werden dann gemittelt, sodass ein Mittelwert und ein Mittelwertfehler (3) bestimmt werden können. Der Mittelwert der Differenzen mit Fehler ergibt sich zu $\overline{t_{\text{diff}}} = (1,60 \pm 0,07) \mu\text{s}$. Aus diesem Mittelwert kann nun über das Weg-Zeit-Gesetz (1) die Dicke der Anpassungsschicht b_A bestimmen. Diese beträgt $b_A = (1,19 \pm 0,05) \text{ mm}$.

3.3 A-Scan zur Bestimmung der genauen Positionen der Fehlstellen

Nun werden die Laufzeiten für alle Störstellen gemessen. Dabei wird der Acrylblock von beiden Seiten untersucht. Die Messwerte werden in Tabelle 2 dargestellt. Bei der Berechnung des Durchmessers wurde die Laufzeitkorrektur bereits vorgenommen.

Um die Laufzeitkorrektur der einzelnen Messwerte durchzuführen wird jeweils t_{diff} subtrahiert. Abbildung 3 zeigt eine grafische Gegenüberstellung der Messwerte aus dem Ultraschallverfahren (rot) gegenüber den Realwerten (blau). Die Laufzeiten wurden dabei mithilfe des Weg-Zeit-Gesetzes (1) in Tiefen umgerechnet.

Tabelle 2: In dieser Tabelle sind die durch einen A-Scan gemessenen Daten der Fehlstellen aufgeführt. N beschreibt die Lochnummer, "o" die Tiefe der Fehlstelle von oben, "u" die Tiefe der Fehlstelle von unten und d den Durchmesser dieser.

N	$o(N)$	$u(N)$	d
1	14,8	62,3	5,83
2	22,9	54,9	5,13
3	31,6	47,3	4,03
4	40,1	40,1	2,73
5	48,0	32,1	2,83
6	55,9	24,2	2,83
7	63,8	16,3	2,83
8		8,4	
9	16,3	56,4	10,23
10	60,5	20,6	1,83
11	62,1	19,2	1,63



Abbildung 3: In dieser Grafik sind die experimentell bestimmten Abmessungen der Fehlstellen dargestellt.

3.4 Untersuchung des Auflösungsvermögens

Um das Auflösungsvermögen zu untersuchen, werden die Fehlerstellen mit den Nummern 10 und 11 mit Ultraschallsonden unterschiedlicher Frequenzen untersucht. Wie man in Abbildung 4 erkennt, zeigt die 1 MHz Sonde nur einen Peak für beide Fehlerstellen an, weshalb die Positionen dieser nicht individuell bestimmt werden kann. Mit der 2MHz-Sonde, wie in Abbildung 5 zu sehen ist, lässt sich der Peak in zwei nah beieinander liegende Peaks trennen. Anhand dieser Frequenz ist es also möglich die einzelnen Tiefen der Fehlerstellen zu bestimmen.

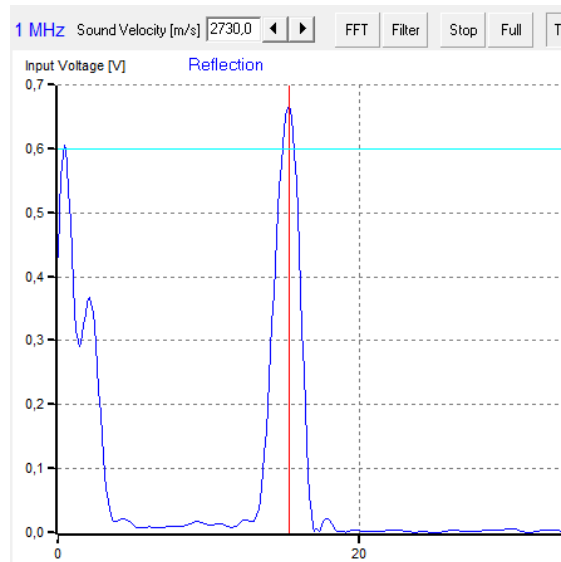


Abbildung 4: In dieser Grafik wird mit einer 1MHz-Sonde ein A-Scan der Fehlerstellen 11 und 12 dargestellt.

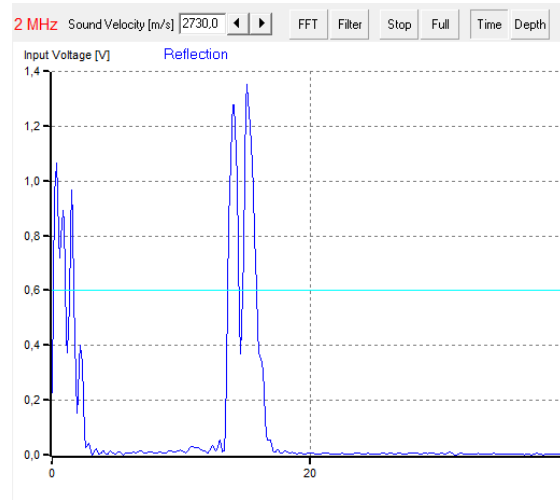


Abbildung 5: In dieser Grafik wird mit einer 2MHz-Sonde ein A-Scan der Fehlstellen 11 und 12 dargestellt.

3.5 Bestimmung der Fehlstellen über einen B-Scan

Mithilfe eines Brightness-Scans kann eine zweidimensionale Aufnahme des Querschnittes des Acrylblockes erstellt werden. Die gesuchten Fehlstellen erscheinen als weiße Flächen in der erzeugten Grafik. Anhand eines Maßstabes können anschließend die Distanzen zwischen den Fehlstellen und der Blockoberseite ermittelt werden. In den Abbildungen 6 und 7 sind die erstellten Aufnahmen zu sehen. Die weiße Linie im unteren Viertel der Bilder entspricht der Unterseite des Blockes, an welcher ein Teil des Ultraschalls reflektiert wird. Anhand dieser Linie und der bekannten Höhe des Acrylwerkstückes lässt sich ein Maßstab finden, mit welchem die Abstände in Pixeln in metrische Distanzen umgerechnet werden können. Es ist zu beachten, dass zusätzlich zur Höhe des Acrylblockes die Dicke der Anpassungsschicht $b_A = 1,19$ mm addiert werden muss. Diese ist als weiße Schicht an der oberen Kante der Bilder zu erkennen.

Die grafisch ermittelten Abstände werden in Tabelle 3 gegen die realen Abstände dargestellt. Dabei muss die Dicke der Anpassungsschicht von den in den Abbildungen 6 und 7 dargestellten Werten wieder subtrahiert werden, um den Messwert zu erhalten. Die relative Abweichung der grafisch ermittelten Werte zu den Realen berechnet sich gemäß

$$\Delta_{\text{relativ}}(x) = \frac{|\bar{x} - x|}{\bar{x}},$$

mit Theoriewert \bar{x} und Messwert x .

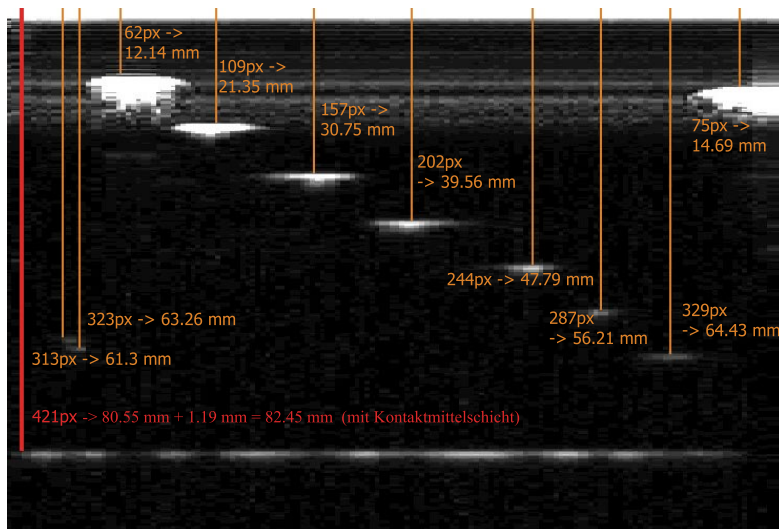


Abbildung 6: Aufnahme des B-Scans der oberen Seite des Acrylblockes. Die 8. Fehlstelle wurde nicht detektiert. Die relevanten Abstände sind an den jeweiligen Fehlstellen markiert.

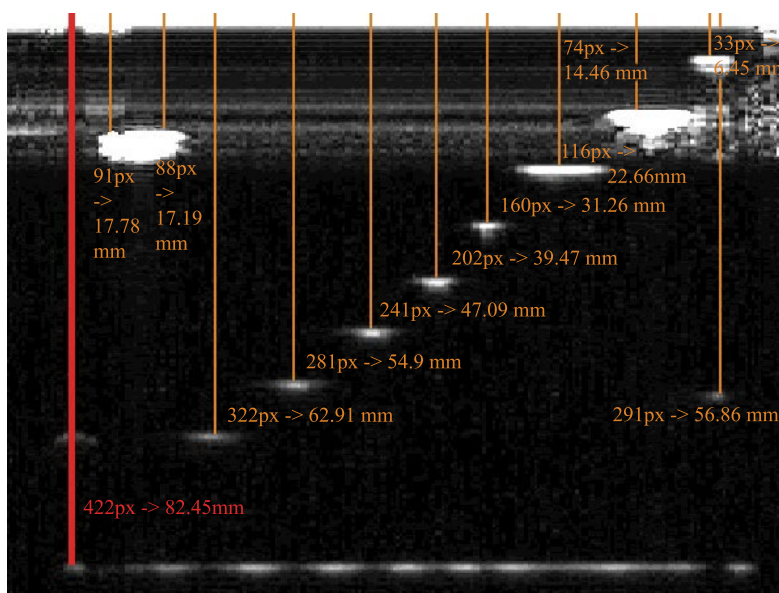


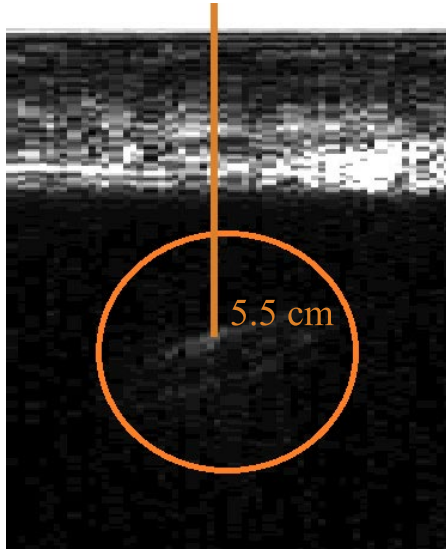
Abbildung 7: Aufnahme des B-Scans der unteren Seite des Acrylblockes.

Tabelle 3: Reale Maße der Bohrungen und aus B-Scan ermittelte Längen. o: Abstand zur Oberkante des Acrylblocks, u: untere Kante

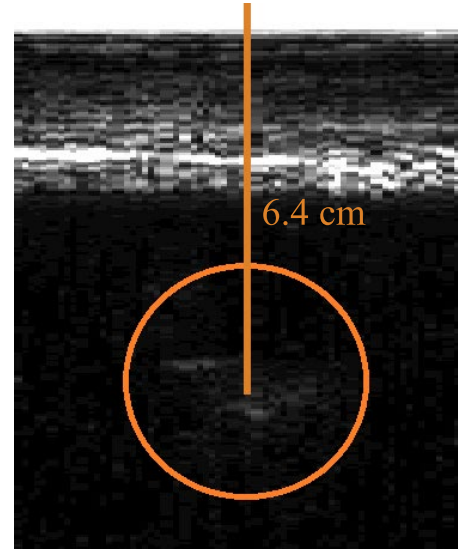
Fehlstelle-Nr.	$o_{\text{real}}/\text{mm}$	o/mm	$\Delta_{\text{rel}}(o)/\%$	$u_{\text{real}}/\text{mm}$	u/mm	$\Delta_{\text{rel}}(u)/\%$
1	13,35	10,95	17,98	61,3	61,72	0,69
2	21,8	20,16	7,52	53,75	53,71	0,07
3	30,6	29,56	3,40	45,95	45,9	0,11
4	38,8	38,37	1,11	38,85	38,28	1,47
5	46,75	46,6	0,32	30,9	30,07	2,69
6	54,8	55,02	0,40	22,85	21,47	6,04
7	62,8	63,24	0,70	14,85	13,27	10,64
8	71,0			6,65	5,26	20,90
9	16,1	13,5	16,15	54,65	55,67	1,87
10	59,4	60,11	1,18	19,7	16,59	15,79
11	61,2	62,07	1,42	17,9	16,0	10,61

3.6 Untersuchung des Brustmodells mit einem B-Scan

Im letzten Teil des Versuches wird ein B-Scan verwendet, um Tumore in einem Brustmodell ausfindig zu machen. Zuvor wird die ungefähre Position dieser ertastet, um anschließend einen B-Scan entlang einer Linie über den Tumor durchführen zu können. Anhand der Aufnahmen lässt sich die ungefähre Lage und Größe der Tumore bestimmen. Das Reflektionsverhalten könnte Aufschluss über die Art des Tumors geben. Es ergibt sich, dass die Tumore in einer Tiefe von 5,5 cm und 6,4 cm lokalisiert sind und einen Durchmesser von 1 bis 1,5 cm aufweisen.



(a) B-Scan des ersten Tumors.



(b) B-Scan des zweiten Tumors.

Abbildung 8: B-Scans der beiden Tumore des Brustmodells. Die orangen Markierungen zeigen die Tumore und deren ungefähre Tiefe.

4 Diskussion

Zuerst wurden mittels eines A-Scans die Tiefen aller Fehlstellen bestimmt. Bei diesen Werten fällt auf, dass sie um einen näherungsweise konstanten Wert vom Theoriewert abweichen. Dies liegt an der Kontaktschicht. Um diesen Fehler auszubessern wurde die Dicke der Kontaktschicht zu $b_A = (1,19 \pm 0,05)$ mm bestimmt. Unter Berücksichtigung dieser Korrektur ergeben sich relative Abweichungen der Tiefen der Fehlstelle, die im Mittel lediglich $\Delta l = 0.05\%$ betragen.

Im nächsten Teil des Versuches wurde das Auflösungsvermögen verschiedener Sonden untersucht. Hierbei wurde erwartet, dass die Sonde mit höherer Frequenz ein höheres Auflösungsvermögen bietet und somit die beiden Peaks separieren kann. Dies hat sich im Unterabschnitt 3.4 bestätigt.

Bei Bestimmung der Fehlstellen durch den B-Scan treten neben den Fehlerquellen des A-Scans noch weitere Ungenauigkeiten auf. Beim B-Scan muss die Tiefe aus einem 2D-Bild bestimmt werden, welches jedoch auf Grund der Auflösung verschwommen wirkt. Außerdem führt die manuelle Bewegung der Messsonde zu Unregelmäßigkeiten. Zusätzlich lässt sich bei der Auswertung der Bilder teilweise der Beginn einer Fehlstelle nur schwer differenzieren, denn dieser ist durch das verschwommene Bild nicht eindeutig sichtbar. Durch diese Fehlerquellen ergeben sich bei diesem Verfahren relative Abweichungen zwischen $\Delta l = 0.07\%$ und $\Delta l = 20.9\%$, weshalb sich dieses Verfahren zur Bestimmung der Fehlstellen weniger bewährt hat als der A-Scan.

Zuletzt wurde ein B-Scan des Brustmodells angefertigt. Bei diesem liegen dieselben Fehler des B-Scans vor. Darüber hinaus ergibt sich beim Brustmodell eine schwierigere Messung

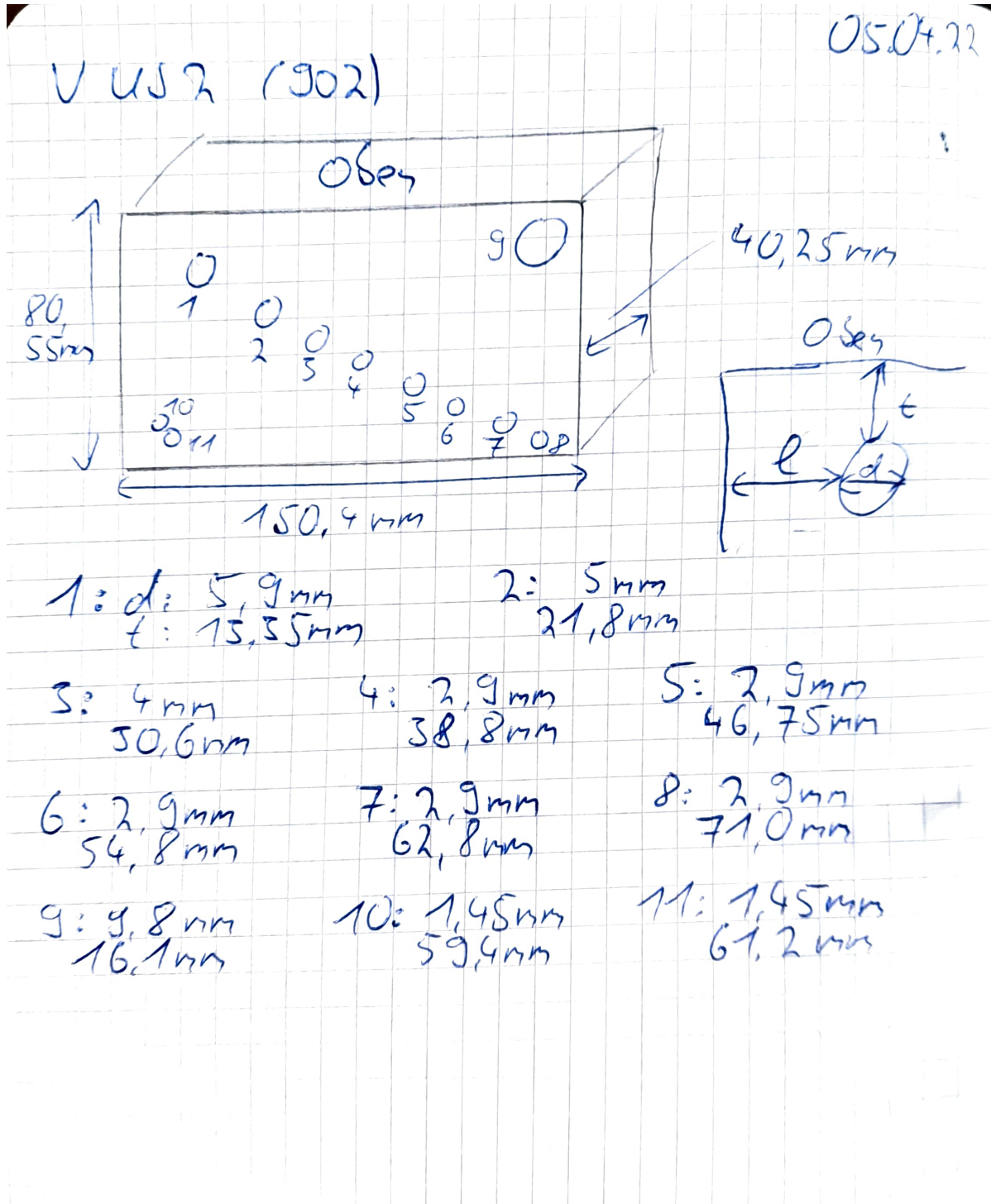
aufgrund der unebenen Oberfläche. Eine ungefähre Aussage über die Position und Größe der Tumore lässt sich dennoch treffen.

Der Versuch hat zu dem Schluss geführt, dass für ein einfaches Objekt, wie den Acrylblock, der A-Scan eine höhere Präzision liefert. Allerdings ist es bei komplexeren Körpern, wie dem Brustmodell, mittels eines A-Scan nicht möglich qualitative Aussagen zu treffen, weshalb ein B-Scan benötigt wird.

Literatur

- [1] Horst Czichos und Manfred Hennecke. *Das Ingenieurwissen*. Springer Verlag, 2012. ISBN: 978-3-642-22850-6.
- [2] *US2 - Scanverfahren in der Ultraschalltechnik*. TU Dortmund. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977256/mod_resource/content/2/US2.pdf (besucht am 08.04.2022).

Anhang



Messung 1: Laufzeiten

Loch 1:	11,7 μ s	2:	17,6 μ s
3:	24,0 μ s	4:	30,2 μ s
5:	35,9 μ s	6:	41,6 μ s
9:	13 μ s		

Messung 2: Tiefen (von oben)

1:	14,8 mm	2:	22,9 mm
3:	31,6 mm	4:	40,1 mm
5:	48,0 mm	6:	55,9 mm
7:	63,8 mm	8:	?
9:	16,3 mm	10:	60,5 mm
		11:	62,1 mm

von unten:

1:	62,3 mm	2:	54,9 mm
3:	47,3 mm	4:	40,1 mm
5:	32,1 mm	6:	24,2 mm
7:	16,3 mm	8:	8,4 mm
		9:	56,4 mm
10:	20,6 mm	11:	19,2 mm

Messung 1: Laufzeiten

Loch 1:	11,7 μ s	2:	17,6 μ s
3:	24,0 μ s	4:	30,2 μ s
5:	35,9 μ s	6:	41,6 μ s
9:	13 μ s		

Messung 2: Tiefen (von oben)

1:	14,8 mm	2:	22,9 mm
3:	31,6 mm	4:	40,1 mm
5:	48,0 mm	6:	55,9 mm
7:	63,8 mm	8:	?
9:	16,3 mm	10:	60,5 mm
		11:	62,1 mm

von unten:

1:	62,3 mm	2:	54,9 mm
3:	47,3 mm	4:	40,1 mm
5:	32,1 mm	6:	24,2 mm
7:	16,3 mm	8:	8,4 mm
		9:	56,4 mm
10:	20,6 mm	11:	19,2 mm