

US-2

Scanverfahren in der Ultraschalltechnik

Christopher Krause
christopher2.krause@tu-dortmund.de

Lucas Witthaus
lucas.witthaus@tu-dortmund.de

Durchführung: 29.05.2018

Abgabe: 05.06.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Eigenschaften von Ultraschall	3
2.2	Verschiedene Verfahren der Ultraschallmessung	4
3	Durchführung	4
4	Auswertung	5
4.1	Bestimmung der Tiefe und der Größe von Fehlstellen	5
4.2	Bestimmung des Auflösungsvermögens	7
4.3	Bestimmung der Abmessungen der Störstellen mit dem B-Scan	7
4.4	Bestimmung des Herzvolumens	9
5	Diskussion	11
	Literatur	11

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll mit verschiedenen Verfahren, Fehlstellen in einem Acrylblock durch Ultraschall gemessen werden. Außerdem soll mit Ultraschall die Herzfrequenz und das Herzvolumen bestimmt werden.

2 Theorie

2.1 Eigenschaften von Ultraschall

Ultraschall ist eine Schallwelle, welche sich in dem Frequenzbereich von 20 kHz und 1 GHz befindet. Somit sind diese Wellen nicht mehr für den Menschen hörbar. Schall breitet sich über Druckschwankungen aus:

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

Hierbei ist $Z = c\rho$ die akustische Impedanz, $p(x, t)$ die räumlich und zeitliche Druckverteilung, ω die Frequenz der Welle, k der Wellenvektor, ρ die Dichte und v_0 die Anfangsgeschwindigkeit.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt von dem Medium. In Festkörpern sind auch transversale Wellen möglich. Ein Teil der Energie geht bei der Schallausbreitung verloren. Für die Intensität I gilt:

$$I = I_0 e^{\alpha x} \quad (2)$$

Dabei ist α der Absorptionskoeffizient der Schallamplitude.

Trifft die Schallwelle auf eine Grenzfläche, wird ein Teil transmittiert und ein gewisser Teil reflektiert. Für den Reflexionskoeffizient R und den Transmissionskoeffizient T von Ultraschall gilt:

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \quad (3)$$

$$T = 1 - R \quad (4)$$

Ultraschall kann mit piezoelektrischen Kristalle, zum Beispiel Quarze, erzeugt werden. In elektrischen Wechselfeldern werden sie zu Schwingungen angeregt, wenn eine polare Achse des Kristalls in Richtung des elektrischen Feldes zeigt. Dadurch strahlen sie Ultraschallwellen ab. Wenn Eigenfrequenz und Anregungsfrequenz übereinstimmen kommt es zu Resonanzeffekten, wodurch hohe Schallenergiedichten genutzt werden können.

2.2 Verschiedene Verfahren der Ultraschallmessung

Es werden zwei Verfahren in der Ultraschalltechnik verwendet. Bei dem Durchallungsverfahren, wird mit einem Sender ein kurzzeitiger Ultraschallimpuls ausgesendet, welcher durch die Probe läuft und dahinter von einem Empfänger aufgefangen wird. Ist in der Probe eine Fehlstelle vorhanden, wird dementsprechend eine geringere Intensität von dem Empfänger gemessen. Es ist keine Aussage über den Ort der Fehlstelle möglich.

Bei dem Impuls-Echo-Verfahren dient der Ultraschallsender ebenfalls als Empfänger. Hierbei werden die von der Probe reflektierten Schallwellen gemessen. Daraus kann die Größe der Fehlstelle berechnet werden. Ist die Schallgeschwindigkeit c in dem Medium bekannt, so kann zusätzlich der Ort s der Fehlstelle bestimmt werden.

$$s = \frac{1}{2}ct \quad (5)$$

3 Durchführung

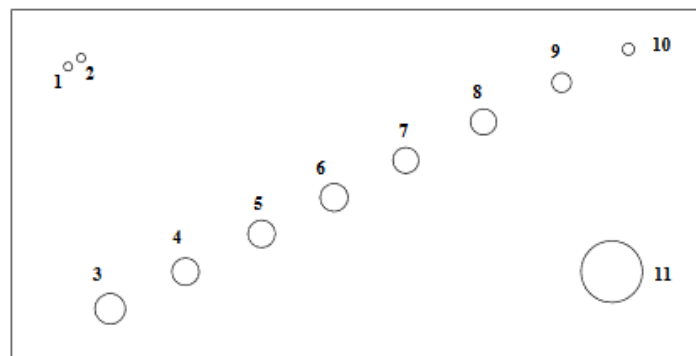


Abbildung 1: Abbildung des verwendeten Acrylblocks [1].

Zu Beginn des Versuchs wird ein zu untersuchender Acryl-Block (zu erkennen in Abbildung 3) von Hand mit einer Schieblehre vermessen. Dabei werden jeweils seine Kantenlängen sowie auch die Abstände der einzelnen Fehlstellen zum oberen bzw. unteren Rand gemessen. Mit Abstand ist dabei die senkrechte Strecke vom Rand des Blocks bis zum entsprechend äußersten Punkt der Fehlstelle gemeint.

Anschließend wird der Acryl-Block dann mit einem Ultraschallechoskop untersucht. Dieses ist an einen Computer angeschlossen, welcher die gemessenen Daten graphisch darstellt. Mit einer an das Echoskop angeschlossenen Ultraschallsonde wird ein Ultraschallimpuls in den Acrylblock gegeben. Als Koppelmittel wird dabei destilliertes Wasser verwendet. Die Sonde kann ebenfalls eintreffende Impulse messen, sodass sie die von den Fehlstellen reflektierten Impulse wahrnimmt.

Zu Beginn wird ein sogenannter A-Scan durchgeführt. Dabei gibt der Computer die gemessenen reflektierten Ultraschallimpulse in Abhängigkeit von der Zeit auf dem Bildschirm aus. Daraus wird für die einzelnen Löcher jeweils die Zeit bestimmt, nach welcher der an ihnen reflektierte Impuls wieder an der Sonde eintrifft. Die Sonde muss also immer an den entsprechenden senkrechten Punkt des Randes zur Fehlstelle geschoben werden. Dies wird einmal von der Oberseite und einmal von der Unterseite des Acrylblocks durchgeführt.

Anschließend wird dann ein B-Scan durchgeführt. Dieser funktioniert ganz ähnlich, jedoch wird dabei nicht jede Fehlstelle einzeln ausgemessen. Stattdessen wird die Sonde nur ein einziges mal oben bzw. auch wieder unter über den Block geschoben. Der Rechner gibt dann in Abhängigkeit von der Zeit und der Tiefe den gemessenen Impuls aus. Aus dieser Graphik wird dann direkt für alle Fehlstellen die Tiefe abgelesen.

Als letztes wird dann noch ein Herzmodell untersucht. Dafür wird dieses zu einem Drittel mit Wasser gefüllt. Sodann wird eine Ultraschallsonde über der Wasseroberfläche befestigt, sodass diese das Wasser nur leicht berührt. Mit einem A-Scan wird der von der Unterseite des Modells reflektierte Ultraschallimpuls gemessen. Danach wird das Herzvolumen mit einem zur Verfügung stehenden Gummiball geändert, indem mit diesem Luft in das Modell gepumpt wird, welche eine bewegliche Membran von unten in das Wasser drückt. Dann wird erneut ein A-Scan durchgeführt. Anschließend wird dann ein TM-Scan gemacht. Bei diesem trägt der Rechner den gemessenen Impuls gegen die Zeit auf. Bei der Messung wird 20 mal mit dem Gummiball Luft in das Modell gepumpt und wieder abgelassen. Aus der entstehenden Graphik wird die Frequenz der sich ändernden Impulse sowie deren Amplitude bestimmt.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Tiefe und der Größe von Fehlstellen

Die Höhe des Acrylblockes beträgt 8,01 cm und die Schallgeschwindigkeit in Acryl ist $c_A = 2730 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die gemessene Zeit eines A-Scans ohne Fehlstelle beträgt $t = 59,12 \mu\text{s}$.

Mit Gleichung (5) wird die Höhe h des Acrylblockes bestimmt.

$$h = \frac{1}{2}c_A t = 0.0807\text{m} = 8.07\text{cm}$$

Die so berechnete Höhe ist größer als die abgemessene Höhe, da der Ultraschall nicht ausschließlich durch den Acrylblock läuft, sondern auch durch die Schutzschicht der Sonde. Aus den beiden Höhen wird die Differenz Δs berechnet:

$$\Delta s = h - 8,01\text{cm} = 6 \cdot 10^{-4} \text{m}$$

Die mit der Schieblehre abgemessenen Abstände der Fehlstellen zu der oberen (s_o) und unteren (s_u) Kante werden in Tabelle 1 dargestellt. Die Nummerierung der Fehlstellen

entspricht dabei der gleichen wie in Abbildung 1. Zusätzlich werden auch die mit dem A-Scan bestimmten Laufzeiten (t_o und t_u) für die beiden Strecken, sowie die daraus resultierenden Strecken (s'_o und s'_u), in dieser Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Gemessene Abstände der Fehlstellen in dem Acrylblock.

Fehlstelle	s_o/cm	s_u/cm	$t_o/\mu\text{s}$	$t_u/\mu\text{s}$	s'_o/cm	s'_u/cm
1	1,905	5,97	14,44	43,97	1,91	5,94
2	1,74	6,15	13,23	45,20	1,75	6,11
3	6,11	1,33	45,18	9,84	6,11	1,28
4	5,40	2,18	40,42	16,50	5,46	2,19
5	4,63	3,01	34,37	22,55	4,63	3,02
6	3,89	3,89	28,86	28,90	3,88	3,89
7	3,08	4,66	22,91	34,85	3,07	4,70
8	2,29	5,48	17,08	40,58	2,27	5,48
9	1,49	6,18	11,27	46,43	1,48	6,28
10	0,70	7,17	5,43	-	0,68	-
11	5,55	1,58	40,99	11,57	5,54	1,52

Dabei wurde für die Strecken s'_o und s'_u die zusätzliche Strecke Δs bereits abgezogen. Für die zehnte Fehlstelle konnte kein Wert für t_u gemessen werden, da die elfte Fehlstelle diese überdeckt.

Die Größe d' der Fehlstelle wird durch $d' = h - s'_o - s'_u$ bestimmt. In Tabelle 2 wird die Größe d' der Fehlstellen und die Größe d der Fehlstellen angegeben. Dabei gilt $d = h - s_o - s_u$. Außerdem wird die relative Abweichung Δd dargestellt.

Tabelle 2: Dicke der Fehlstellen.

Fehlstelle	d/cm	d'/cm	$\Delta d/\%$
1	0,14	0,16	14,3
2	0,12	0,15	25,0
3	0,57	0,62	8,8
4	0,43	0,36	-16,3
5	0,37	0,36	-27
6	0,23	0,24	-4,3
7	0,27	0,24	-11,1
8	0,24	0,26	8,3
9	0,34	0,25	-26,5
10	0,14	-	-
11	0,88	0,95	8,0

4.2 Bestimmung des Auflösevermögens

Die Messergebnisse und die daraus errechneten Abstände der Messung der ersten beiden Fehlstellen mit der 4 MHz Ultraschallsonde werden analog zu obigen Ausführungen in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Gemessene Abstände der ersten beiden Fehlstellen in dem Acrylblock mit der 4 MHz Ultraschallsonde.

Fehlstelle	s_o/cm	s_u/cm	$t_o/\mu\text{s}$	$t_u/\mu\text{s}$	s'_o/cm	s'_u/cm
1	1,95	5,97	14,21	43,67	1,88	5,90
2	1,74	6,15	13,08	44,86	1,73	6,06

Dabei wurde wieder für die Strecken s'_o und s'_u die zusätzliche Strecke Δs bereits abgezogen.

In Tabelle 4 werden wieder die daraus errechneten Größen sowie die abgemessenen Größen der Fehlstellen, sowie die bestehende Abweichung dargestellt.

Tabelle 4: Dicke der Fehlstellen bei Messung mit 4 MHz Ultraschallsonde.

Fehlstelle	d/cm	d'/cm	$\Delta d/\%$
1	0,09	0,23	155,6
2	0,12	0,22	83,3

Die Abweichungen sind also wesentlich größer als bei der 2 MHz Sonde.

4.3 Bestimmung der Abmessungen der Störstellen mit dem B-Scan

Für den B-Scan ergeben sich folgende Bilder.



Abbildung 2: Abbildung des B-Scans von der oberen Kante.

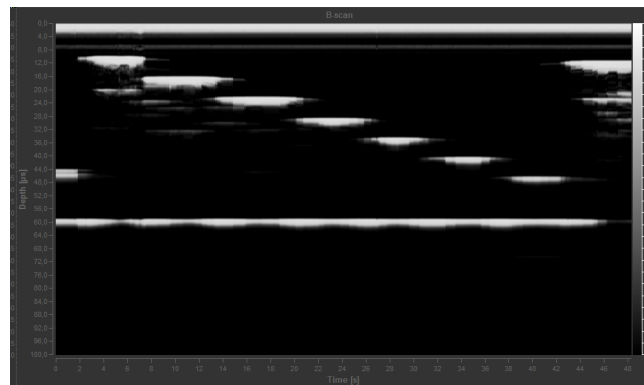


Abbildung 3: Abbildung des B-Scans von der unteren Kante.

Die mit dem B-Scan bestimmten Laufzeiten und die daraus resultierenden Strecken werden in Tabelle 3 dargestellt. Die Größe der Fehlstellen wird erneut aus den Strecken berechnet und ebenfalls in Tabelle 5, mit zugehöriger Abweichung zu den abgemessenen Werten, dargestellt.

Tabelle 5: Berechnete Werte bei einem B-Scan.

Fehlstelle	$t_{B,o}/\mu\text{s}$	$t_{B,u}/\mu\text{s}$	$s_{B,o}/\text{cm}$	$s_{B,u}/\text{cm}$	d_B/cm	$\Delta d/\%$
1	13,26	45,22	1,75	6,11	0,15	7,1
2	14,62	44,04	1,94	5,95	0,12	0
3	44,82	9,94	6,06	1,30	0,65	14,0
4	39,56	15,78	5,34	2,09	0,58	34,9
5	34,10	22,22	4,59	2,97	0,45	21,6
6	28,64	28,64	3,85	3,85	0,31	34,8
7	22,60	34,30	3,02	4,62	0,37	37,0
8	16,76	40,14	2,23	5,42	0,36	50,0
9	11,10	46,38	1,46	6,27	0,28	-17,6
10	5,26	-	0,66	-	-	-
11	40,74	11,30	5,50	1,48	1,03	17,0

4.4 Bestimmung des Herzvolumens

In Tabelle 6 werden für die 20 simulierten Herzschläge jeweils die gemessenen Amplituden t_s und die daraus berechneten Volumina V_s aufgeführt. In Abbildung 4 ist das Diagramm des erstellten TM-Scans zu erkennen, aus dem die besagten Amplituden bestimmt wurden. Das Luftvolumen, welches das Wasser beim Pumpen durch die bewegliche Membran verdrängt, wird als Kugelsegment angenähert. Das Volumen ergibt sich also aus

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

wobei

$$h = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_s$$

Der Radius beträgt $r = 2,46 \text{ cm}$.

Die Frequenz des simulierten Herzschlags beträgt $f = 0,47 \text{ Hz}$.

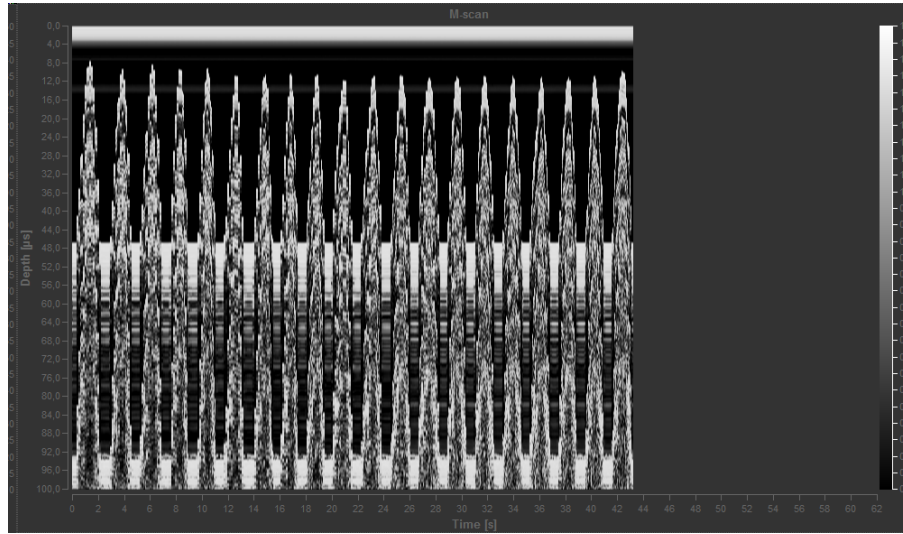


Abbildung 4: Abbildung des TM-Scans für den simulierten Herzschlag.

Tabelle 6: Gemessene Amplituden bei Herzschlagsimulation.

Schlag	$t_s/\mu\text{s}$	V_s/cm^3
1	38,96	40,17
2	37,22	37,32
3	38,58	39,54
4	37,60	37,93
5	37,80	38,26
6	36,44	36,09
7	36,45	36,11
8	36,47	36,14
9	36,46	36,12
10	35,26	34,28
11	36,24	35,78
12	36,24	35,78
13	35,86	35,19
14	35,90	35,26
15	36,04	35,47
16	36,04	35,47
17	36,01	35,42
18	36,01	35,42
19	36,24	35,78
20	37,42	37,64

Als Mittelwert ergibt sich ein Volumen von $V_m = (36,46 \pm 1,49) \text{ cm}^3$.

Aus

$$V_{\text{Herz}} = V_m \cdot f$$

ergibt sich das gesuchte Herzvolumen zu

$$V_{\text{Herz}} = (17,1 \pm 0,7) \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

5 Diskussion

Mit dem A-Scan konnten die Tiefen der Fehlstelle zumeist Millimeter genau bestimmt werden. Bei dem B-Scan waren die Abweichungen der Orte ein wenig größer. Beide Verfahren weisen große Abweichungen bei der Größe der Fehlstelle auf. Die Abweichungen bei dem B-Scan können an dem ungenauen Bestimmen der Laufzeiten aus den Abbildungen 2 und 3 liegen. Für den B-Scan wird idealerweise das Koppelmittel vernachlässigt, welches jedoch ebenfalls zu Abweichungen von den realen Werten führt. Bei dem A-Scan war zudem nicht eindeutig zu erkennen, wo der Peak der reflektierten Schallwellen des Koppelmittels war. So konnten Fehler bei der Bestimmung der Laufzeit auftreten.

Bei der Untersuchung des Auflösungsvermögens ist zu erkennen, dass die Messung mit der 4 MHz Sonde wesentlich größere Abweichungen aufzeigt als die Messung mit der 2 MHz Sonde. Dies widerspricht in jeglicher Hinsicht den Erwartungen. Eine höhere Frequenz sollte eigentlich auch eine höhere Genauigkeit bedeuten. Dies ist jedoch nicht der Fall. Grund dafür müssen systematische Fehler sein. Zum einen werden die Werte mit per Hand eingestellten Cursor gemessen und zum anderen könnte auch z.B. das Koppelmittel nicht richtig auf dem Acrylblock aufgetragen sein. Dadurch könnten entsprechenden Abweichungen zustande kommen.

Bei der Messung des Herzvolumens konnte der Herzschlag gut simuliert werden. Es ist an der Abbildung unschwer zu erkennen, dass über den gesamten Zeitraum ein relativ konstantes Schlagvolumen erzeugt werden konnte und auch die Schlagfrequenz weicht an keiner Stelle sichtlich ab. Daher ergibt sich auch durch die Mittelung keine große Abweichung zu irgendeinem der gemessenen Werte. Soweit ist die Berechnung des Herzvolumens also gut möglich. Jedoch ist anzumerken, dass trotzdem noch die Näherung von dem Kugelsegment als verdrängendem Volumen durchgeführt wurde. Trotz guter Bestimmbarkeit der Größe h sollten dadurch also trotzdem noch gewisse Abweichungen auftreten. Der errechnete Wert wird also nicht genau dem tatsächlichen Wert entsprechen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung des Versuchs US-2, Scanverfahren in der Ultraschalltechnik*. 2018.