

US2

Scanverfahren in der Ultraschalltechnik

Julian Hochhaus
julian.hochhaus@tu-dortmund.de

Niko Salewski
niko.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 13.06.2017

Abgabe: 20.06.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Grundlagen	3
2.2 Messverfahren mit Ultraschall	3
3 Durchführung	4
3.1 Versuchsaufbau	4
3.2 Versuchsbeschreibung	5
4 Auswertung	6
4.1 Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen über den A-Scan	7
4.2 Untersuchung des Auflösungsvermögen	8
4.3 Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen über den B-Scan	9
4.4 Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan	11
5 Diskussion	13
Literatur	14

1 Zielsetzung

Im vorliegenden Versuch werden verschiedene Ultraschall-Scan-Verfahren verwendet, um Materialien auf Fehlstellen zu untersuchen. Außerdem wird ein Herzmodell mittels Ultraschall untersucht.

2 Theorie

2.1 Grundlagen

Ultraschallwellen sind Schallwellen im Frequenzbereich von 20 kHz bis 1 GHz mit denen die Struktur von Materialien untersucht werden kann. Schallwellen können – wie elektromagnetische Wellen – reflektiert und gebrochen werden. Da sie sich aber aufgrund von Druckschwankungen im Raum fortbewegen, ist die Schallgeschwindigkeit c materialabhängig. Bei Flüssigkeiten zum Beispiel hängt die Schallgeschwindigkeit von der Kompressibilität κ und der Dichte ρ ab. Des Weiteren wird Schall von dem Material absorbiert, sodass die Schallamplitude exponentiell mit dem Ort x abfällt;

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}. \quad (1)$$

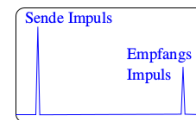
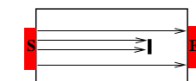
Die Absorptionsstärke wird vom materialabhängigen Absorptionskoeffizienten α festgelegt. Luft beispielsweise absorbiert Schall sehr stark, sodass in der Praxis ein Kontaktmittel an der Grenzfläche von dem untersuchten Material aufgetragen wird. Wenn Schall auf eine Grenzfläche trifft, wird ein Teil reflektiert und ein Teil transmittiert.

Ultraschall kann beispielsweise mit dem piezoelektrischen Effekt erzeugt werden. Durch ein elektrisches Wechselfeld kann ein piezo-elektrischer Kristall – z.B. Quarze – zu Schwingungen angeregt werden. Wird der Kristall mit Schwingungen, die der Eigenfrequenz des Kristalls entsprechen, angeregt, werden Ultraschallwellen mit höherem Schalldruck ausgesandt. Piezokristalle können auch durch Wechselwirkung mit Schallwellen zu Schwingungen angeregt werden. Im Folgenden werden die grundlegenden Messverfahren mit Ultraschall erläutert.

2.2 Messverfahren mit Ultraschall

Messungen mit Ultraschallwellen werden durch Laufzeitmessungen realisiert. Es lässt sich zwischen zwei elementaren Messverfahren unterscheiden: Bei dem Durchschallungs-Verfahren wird ein Impuls am Anfang des Probestücks mit einem Ultraschallsender

Durchschallungs-Verfahren



Impuls-Echo-Verfahren

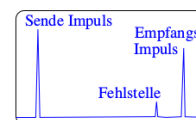
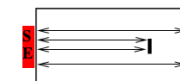


Abbildung 1: Prinzipielle Darstellung der Messverfahren. [3]

ausgesendet und am Ende des Probestücks wird die abgeschwächte Intensität des Impulses gemessen (vgl. Abbildung 1). Dieses Messverfahren bringt keine Aussage über die Lage einer Fehlstelle in einem Material.

Das Impuls-Echo-Verfahren hingegen ermöglicht eine Aussage über die Fehlstelle des Probestücks. Hierbei wird der ausgesandte Impuls nach einer Reflexion am Ende des Probestücks am Anfang des Probestücks gemessen (vgl. Abbildung 1). Liegt eine Fehlstelle im Probestück vor, wird der Schallimpuls an dieser reflektiert und die verkürzte Laufzeit t legt die Lage der Fehlstelle gemäß

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

fest.

Weiterhin gibt es drei verschiedene Darstellungsarten für die Laufzeitdiagramme. Zum Einen wird beim A-Scan (Amplituden-Scan) ein eindimensionales Bild der Struktur eines Objekts aufgenommen. Hier werden die Echoamplituden gegen die Laufzeit aufgetragen. Des Weiteren lässt sich mit einem B-Scan (Brightness-Scan) ein zweidimensionales Bild erstellen. Es werden die Echoamplituden in unterschiedlichen Helligkeiten dargestellt. Außerdem kann mit einem TM-Scan (Time-Motion-Scan) der zeitliche Verlauf einer Bewegung beobachtet werden. Diese Methode wird beispielsweise bei der Untersuchung von Organen verwendet.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Der vorliegende Versuchsaufbau besteht aus einem Ultraschallechoskop, Ultraschallsonden verschiedener Frequenzen (farblich markiert: 1 MHz (blau), 2 MHz (rot), 4 MHz (grün)), sowie einem Rechner zur Datenaufnahme und-analyse. Am Echoskop kann über einen Kippschalter REFLEC./TRANS. eine Messung mittels einer Ultraschallsonde (Impuls-Echo-Verfahren), bzw. mittels zweier gleicher Ultraschallsonden (Durchschallungsverfahren) eingestellt werden.

Am Rechner können die erfassten Daten in dem Programm **A-Scan** angezeigt und ausgewertet werden. Im oberen Bereich des Programmfensters kann die Scan-Art gewählt werden. Erstellte Grafiken können ebenso wie aufgenommene Daten aus dem Programm heraus exportiert werden. Wird der Scan-Modus **A-Scan** gewählt, werden zwei Graphen dargestellt. Im oberen Fenster befindet sich der A-Scan. Die Amplitude lässt sich über die Programmeinstellung hierbei sowohl gegen die Eindringtiefe in Microsekunden, als auch gegen die Eindringtiefe in Millimetern auftragen. Für letzteres muss die Schallgeschwindigkeit im Probenmaterial in das Programm eingetragen werden.

Im unteren Fenster befindet sich die laufzeit-und tiefenabhängige Verstärkung des Signals (TGC; Time Gain Control). Diese kann über das Echoskop mittels der Verstärkungsparameter Treshold, Wide,Slope und Start am Ultraschallechoskop eingestellt werden.

Bei der Wahl des **TM-Mode** wird auf der y-Achse die Laufzeit der Impulse aufgetragen und auf der x-Achse wird kontinuierlich fortschreitend die Messzeit aufgetragen. Die

Messung kann über die Knöpfe START und STOP gestartet, bzw. gestoppt werden. Die Achsen lassen sich über die Zoom Area skalieren. Zudem lässt sich im Programm noch über den **FFT**-Modus das Frequenzspektrum und das zugehörige Cepstrum anzeigen. Zur Untersuchung steht ein Acrylblock mit elf Fehlstellen sowie ein Herzmodell, bestehend aus zwei Bechergläsern, einer Gummimembran und einem Handblasebalg zur Simulation des Herzschlags, zur Verfügung.

3.2 Versuchsbeschreibung

Zunächst wird der Acrylblock sowie die Fehlstellen mittels einer Schiebelehre vermessen.

Zur Bestimmung der Lage der Fehlstellen mit dem Impuls-Echo-Verfahren wird das Ultraschallechoskop über den Kippschalter auf den entsprechenden Messmodus (RE-FLEC.) gestellt. Zunächst wird die tatsächlich auftretende Laufzeit des Ultraschallsignals durch den Acrylblock bestimmt und mit dem theoretisch berechneten Wert verglichen, um die Dicke der Ausgleichsschicht bestimmen zu können. Die Ultraschallsonde mit 1 MHz wird mittels bidestillierten Wasser an den Acrylblock gekoppelt, welcher auf eine weiche Unterlage gestellt wird, um eine Beschädigung des Acrylblocks zu vermeiden. An verschiedenen Stellen des Acrylblocks wird über einen **A-Scan** die Schalllaufzeit zur Ermittlung der Lage der Störstellen gemessen. Selbige Prozedur wird wiederholt, nachdem der Block umgedreht wurde und die Ultraschallsonde von der anderen Seite an den Acrylblock gekoppelt wurde.

Zur Untersuchung des Auflösungsvermögens wird eine Impuls-Echo-Messung mit der 4 MHz-Sonde für die zwei nah nebeneinander liegende Störstellen (Fehlstellen 1&2 in Abbildung 2) durchgeführt und mit den Ergebnissen der Messung mit der 1 MHz-Sonde verglichen. Die Ultraschallsonde wird hierfür erneut mittels bidestillierten Wasser an den Acrylblock gekoppelt.

Die Bestimmung der Lage der Fehlstellen wird zudem über den **B-Scan** realisiert. Hierzu wird die 1 MHz-Sonde mittels bidestillierten Wassers an den Probenblock gekoppelt, die Aufnahme des **B-Scan** gestartet, und der Acrylblock wird mit der Ultraschallsonde langsam abgefahren. Ebenso wie beim A-Scan wird die Messung bei umgedrehten Block wiederholt.

Zur Untersuchung des Herzmodells wird das obere Becherglas des Herzmodells zu etwa einem Drittel mit bidestillierten Wasser gefüllt und die 1 MHz-Sonde so auf der Wasseroberfläche positioniert, dass sie soeben eintaucht. Mittels eines Handblasebalg ist es möglich, Luft in das untere Becherglas zu pumpen, sodass sich die zwischen beiden Bechergläsern befestigte Gummimembran bewegt, der Abstand zwischen der Ultraschallsonde und der Membran somit verringert wird. Hierbei muss die Verstärkung so gewählt werden, dass die Signale für beide Positionen der Gummimembran im **TM-Scan** deutlich zu sehen sind, zugleich aber auch nicht den Messbereich überschreiten. Es wird ein **TM-Scan** mit 10 s Laufzeit durchgeführt. Während der Messung wird der Handblasebalg möglichst gleichmäßig betätigt, um den Herzschlag zu simulieren.

4 Auswertung

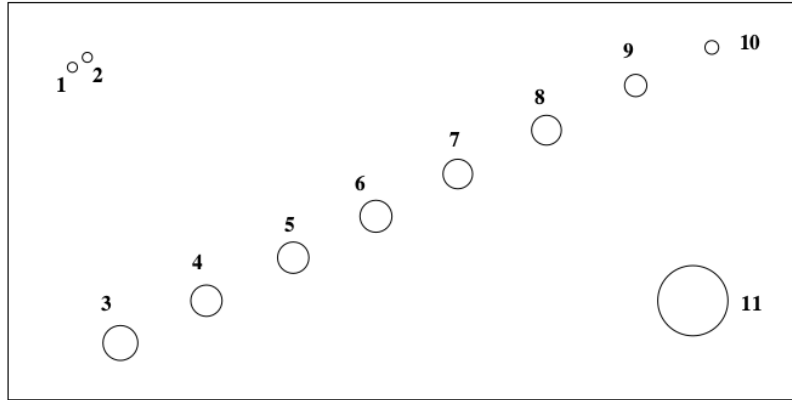


Abbildung 2: Schematische Darstellung des untersuchten Acrylblocks samt der durchnummerierten Fehlstellen. [3].

Zunächst werden die Durchmesser d_{SL} sämtlicher Fehlstellen mittels einer Schieblehre ausgemessen. Die Nummerierung n der Fehlstellen erfolgt nach dem Schema in Abbildung 2. Die bestimmten Durchmesser finden sich in Tabelle 1. Zusätzlich wurde

Tabelle 1: Durchmesser der Fehlstellen vermessen mittels Schieblehre.

n	d_{SL}/mm
1.0	1.3
2.0	1.3
3.0	5.8
4.0	4.8
5.0	4.0
6.0	2.9
7.0	2.9
8.0	2.9
9.0	2.9
10.0	2.9
11.0	9.5

der gesamte Acrylblock mittels der Schieblehre vermessen. Es ergibt sich eine Breite von 8 cm. Mit der Schallgeschwindigkeit $c = 2730 \text{ m/s}$ nach [2] und Formel (2) ergibt sich die Laufzeit des Ultraschallsignals durch den Acrylblock zu $t_{\text{theo}} = 58,6 \mu\text{s}$. Wird allerdings die tatsächliche Laufzeit des Ultraschallsignals in der Messung bestimmt, ergibt sich eine Laufzeit von $t_{\text{real}} = 60,6 \mu\text{s}$. Dies liegt an der Anpassungsschicht zwischen der

Ultraschallsonde und dem Acrylblock. Um in den weiteren Messungen die tatsächlichen Laufzeiten im Acrylblock zu bestimmen, muss von jedem bestimmten Wert daher die Laufzeit durch die Anpassungsschicht $\Delta t = 2 \mu\text{s}$ abgezogen werden.

4.1 Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen über den A-Scan

Die Messwerte zur Bestimmung der Lage der Fehlstellen sind in Tabelle 2 aufgetragen. Hierbei wird die Lage der Fehlstelle im Acrylblock mit den gemessenen Laufzeiten und Formel (2) bestimmt. Für die Schallgeschwindigkeit in Acryl wird der Wert $c = 2730 \text{ m/s}$ verwendet. Weiterhin wird jeweils die Laufzeitkorrektur von $2 \mu\text{s}$ beachtet. Die Werte t_1 und s_1 gehören zur Messung mit der Ausrichtung wie in Abbildung 2 und t_2 und s_2 gehören entsprechend zur Messung mit dem gedrehten Acrylblock. Aus den Positionen

Tabelle 2: Messwerte der Laufzeiten mit der Lage der zugehörigen Fehlstelle nach Formel (2) bei der normalen Ausrichtung und dem gedrehten Block.

n	$t_1/\mu\text{s}$	s_1/mm	$t_2/\mu\text{s}$	s_2/mm
1	13.8	18.84	46.3	63.20
2	16.0	21.84	43.6	59.51
3	44.3	60.47	9.9	13.51
4	39.3	53.64	15.9	21.70
5	33.8	46.14	22.2	30.30
6	28.4	38.77	28.2	38.49
7	22.7	30.99	34.2	46.68
8	17.0	23.21	40.0	54.60
9	11.0	15.02	45.8	62.52
10	5.2	7.10	51.9	70.84
11	40.6	55.42	11.2	15.29

der Hin- und Rückseite der jeweiligen Fehlstellen lässt sich nun der Durchmesser der Fehlstellen durch

$$d = 8 \text{ cm} - s_1 - s_2$$

berechnen. Die so bestimmten Durchmesser der Fehlstellen sind in Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 3: Berechneten Durchmesser der Fehlstellen im Acrylblock.

n	d/mm
1	2.0
2	1.4
3	6.0
4	4.7
5	3.6
6	2.7
7	2.3
8	2.2
9	2.6
10	2.1
11	9.3

4.2 Untersuchung des Auflösungsvermögens

Zur Untersuchung des Auflösungsvermögens werden die Fehlstellen 1 und 2 aus Abbildung 2 betrachtet. Bei einem A-Scan mit einer 4 MHz Sonde wurden die beiden Laufzeiten bei Reflexionen an der Hinseite der Fehlstellen 1 und 2 zu

$$\begin{aligned}t_1 &= 13,6 \, \mu\text{s}, \\t_2 &= 14,8 \, \mu\text{s}.\end{aligned}$$

Damit ergeben sich mit Formel (2) die beiden Lagen der Fehlstellen zu

$$\begin{aligned}s_1 &= 18,6 \, \text{mm}, \\s_2 &= 20,2 \, \text{mm}.\end{aligned}$$

Da die 4 MHz Sonde durch die höhere Frequenz eine geringere Eindringtiefe hat, wird die Lage der Rückseite aus Tabelle 2 verwendet. Es ergeben sich die beiden Dicken der Fehlstellen 1 und 2 zu

$$\begin{aligned}d_1 &= 1,8 \, \text{mm}, \\d_2 &= 0,3 \, \text{mm}.\end{aligned}$$

Es lässt sich also sagen, dass eine höhere Frequenz durch die kleinere Wellenlänge für eine bessere Auflösung sorgt. Allerdings folgt aus einer höheren Frequenz auch eine geringere Eindringtiefe, sodass die Reflexionen an der Hin- und Rückseite der Fehlstelle an dem näheren Ende des Acrylblocks zu erkennen sein müssen. Da die Reflexion an der hinteren Seite der Fehlstelle nicht zu erkennen war, muss also für einen Vergleichswert die Laufzeit für die Reflexion mit der 1 MHz Sonde verwendet werden, was bei der zweiten Fehlstelle sogar für eine größere Abweichung vom gemessenen Durchmesser sorgt. Der erste Durchmesser hingegen liegt näher am erwarteten Wert.

4.3 Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen über den B-Scan

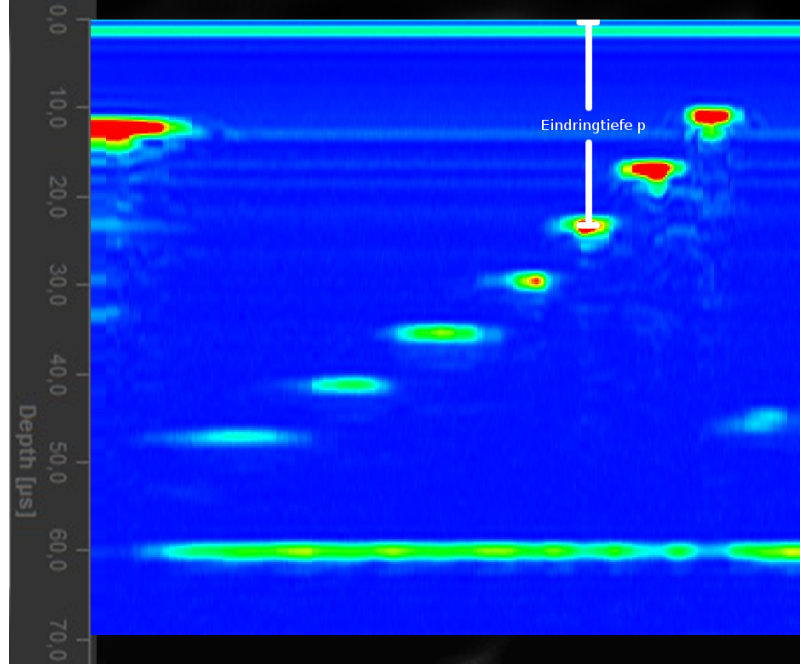


Abbildung 3: Darstellung zur Verdeutlichung des verwendeten Skalierungsverfahrens.

Zur Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen über den B-Scan wird der Abstand p jeder Fehlstelle mittels des freien Grafikprogramms „Gimp“ in Pixeln bezüglich der oberen Bildkante bestimmt (vgl. dazu Abbildung 3). Diese Skalierung kann umgerechnet werden auf die Eindringtiefe s_{msec} in Microsekunden, da bekannt ist, dass die Bildhöhe von $h = 724$ Pixeln einer Eindringtiefe von $69 \mu\text{s}$ entspricht. Es ergibt sich die Umrechnung:

$$s_{\text{sec}} = \frac{69 \mu\text{s}}{724} \cdot p. \quad (3)$$

Zusätzlich wird, wie zu Beginn der Auswertung erläutert, von jedem so ermittelten Wert die Anpassungsschicht abgezogen. Diese wird graphisch bestimmt zu $t = 0,9 \mu\text{s}$. In Tabelle 4 finden sich die so berechneten Eindringtiefen in Microsekunden s_{sec} sowie die hieraus nach Formel (2) berechneten Eindringtiefen in Millimetern s_{mm} .

Die Schallgeschwindigkeit in Acryl ist $c_{\text{Acryl}} = 2730 \text{ m/s}$.

Hierbei bezeichnet $s_{\text{h,sec}}$ und $s_{\text{h,mm}}$ den Scan der Oberseite (vgl. dazu Abbildung 5) und $s_{\text{r,sec}}$ sowie $s_{\text{r,mm}}$ den Scan der Unterseite (siehe Abbildung 4). In der sechsten Spalte findet sich schließlich der mittels B-Scan bestimmte Durchmesser d_{B} der Fehlstellen. Außerdem wird der experimentell bestimmte Durchmesser verglichen mit dem mittels Schieblehre ermittelten Durchmesser d_{SL} der Fehlstellen. Einige Fehlstellen konnten nicht aus den Plots abgelesen werden und sind daher nicht angegeben.

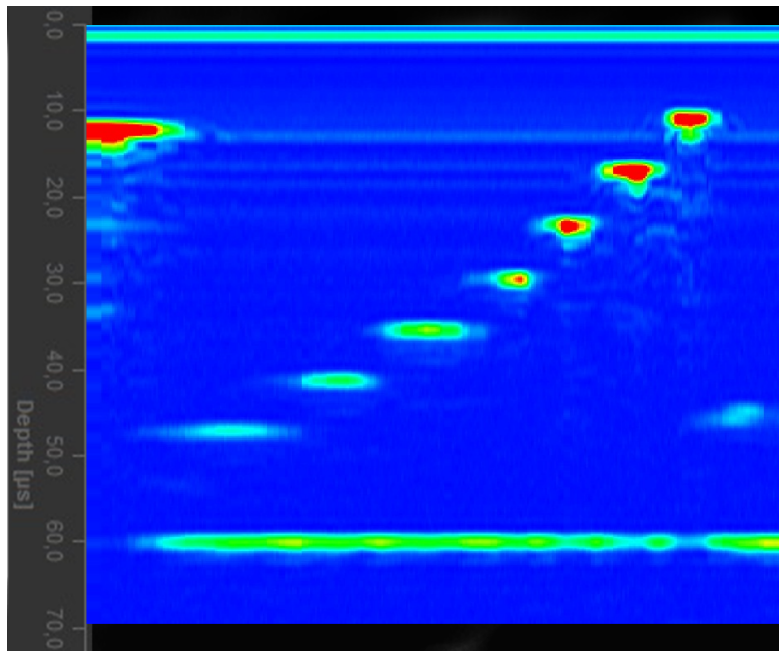


Abbildung 4: B-Scan des Acrylblocks zur Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen (Unterseite).

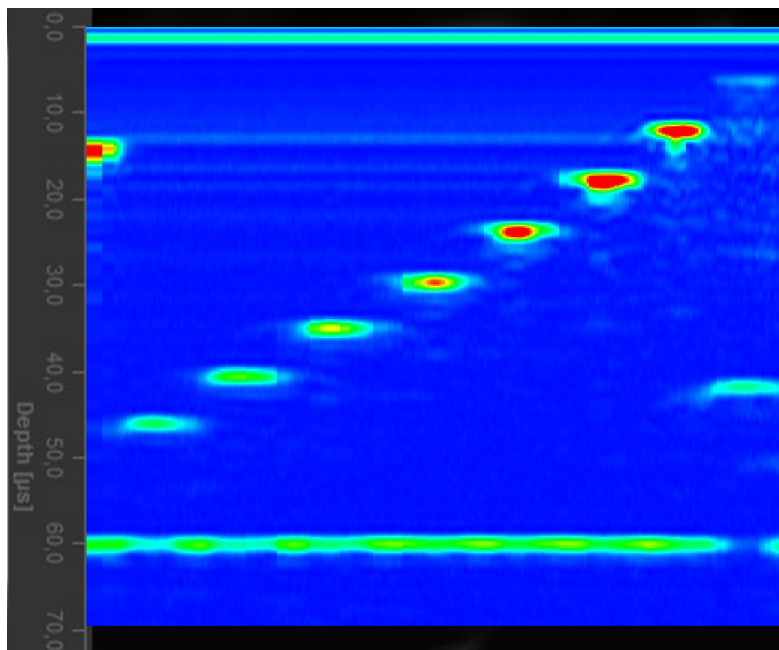


Abbildung 5: B-Scan des Acrylblocks zur Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen (Oberseite).

Tabelle 4: Bestimmung der Abmessung der Fehlstellen anhand des B-Scans.

n	$s_{h,sec}/\mu s$	$s_{r,sec}/\mu s$	$s_{h,mm}/cm$	$s_{r,mm}/cm$	d_B/cm	d_{SL}/cm	Δd in %
1.0	–	43.6	–	5.95	–	0.13	–
2.0	12.8	44.7	1.75	6.1	0.15	0.13	15.4
3.0	44.8	10.0	6.11	1.36	0.53	0.58	8.6
4.0	39.2	16.0	5.35	2.18	0.47	0.48	2.1
5.0	33.6	22.3	4.59	3.04	0.38	0.4	5.0
6.0	28.3	28.5	3.86	3.88	0.26	0.29	10.3
7.0	22.5	34.4	3.08	4.69	0.23	0.29	20.7
8.0	16.5	40.2	2.26	5.48	0.26	0.29	10.3
9.0	10.8	46.0	1.48	6.28	0.25	0.29	13.8
10.0	5.0	–	0.68	–	–	0.29	–
11.0	40.5	11.2	5.52	1.53	0.95	0.95	0

4.4 Untersuchung eines Herzmodells mit dem TM-Scan

Das Herz arbeitet in einem wellenartigen Pumpvorgang. Grundlegend kann zwischen zwei Phasen unterschieden werden. Einmal der diastolischen Phase, in dieser ist der Herzmuskel entspannt und das Herz füllt sich mit Blut und erreicht sein maximales Volumen (enddiastolisches Volumen EDV); anschließend tritt die systolische Phase auf; das Herz zieht sich zusammen und das zuvor in ihm befindliche Blut wird in den Lungenkreislauf beziehungsweise in den Körperkreislauf gepumpt. Das Herz erreicht schließlich sein kleinstes, das sogenannte endsystolische Volumen (ESV).

Das sogenannte Herzzeitvolumen (HZV) bezeichnet die pro Zeiteinheit durch das Herz gepumpte Blutmenge und wird berechnet über die Herzfrequenz und der Herzvolumendifferenz zwischen Systole und Diastole:

$$HZV = (EDS - EDV) \cdot \nu_{\text{Herz}}. \quad (4)$$

Aus dem TM-Scan des schlagenden Herzens (vgl. Abbildung 6) lässt sich die Herzfrequenz über die Anzahl der Maxima $n = 13$ und die Laufzeit des TM-Scan $\Delta t = 10\text{ s}$ bestimmt zu

$$\nu_{\text{Herz}} = \frac{13}{10} = 1,3\text{ Hz}.$$

Aus dem TM-Scan lässt sich zudem nach der selben Methode wie in Abschnitt 4.3 die jeweilige Eindringtiefe des Ultraschalls bestimmen. Die Umrechnung ergibt sich hier zu

$$s_{\text{sec}} = \frac{69\text{ }\mu\text{s}}{706} \cdot p. \quad (5)$$

In Tabelle 5 finden sich die mittels Umrechnung bestimmten Eindringtiefen für alle Minima $s_{t,\min}$ und Maxima $s_{t,\max}$, sowie die daraus berechneten Eindringtiefen in Millimetern.

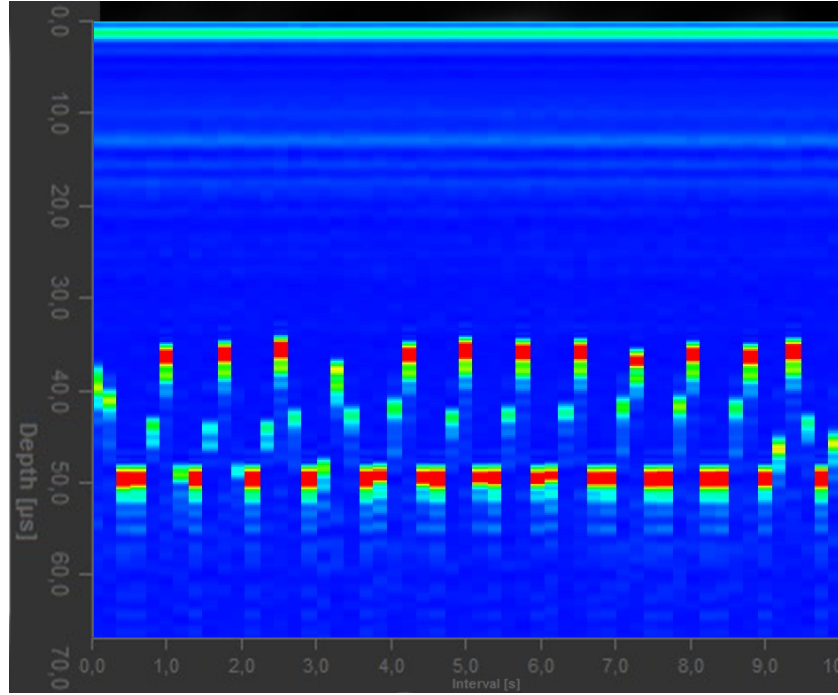


Abbildung 6: TM-Scan des pumpenden Herzmodell.

Tabelle 5: TM-Scan des pumpenden Herzens zur Bestimmung des Herzzeitvolumens.

n	$s_{\min, \text{sec}} / \mu\text{s}$	$s_{\max, \text{sec}} / \mu\text{s}$	$s_{\min, \text{mm}} / \text{cm}$	$s_{\max, \text{mm}} / \text{cm}$
1	50.14	39.88	3.75	2.98
2	50.63	36.94	3.79	2.77
3	50.24	36.85	3.76	2.76
4	50.43	36.06	3.77	2.7
5	50.04	38.31	3.75	2.87
6	50.14	36.55	3.75	2.74
7	50.14	36.16	3.75	2.71
8	49.94	36.45	3.74	2.73
9	50.14	36.55	3.75	2.74
10	50.43	37.63	3.77	2.82
11	50.33	36.75	3.77	2.75
12	50.14	36.85	3.75	2.76
13	50.53	36.55	3.78	2.74

Die hierfür verwendete Schallgeschwindigkeit in bidestillierten Wasser beträgt $c = 1497 \text{ m/s}$ nach [2]. Das enddiastolische Volumen (EDV) entspricht einem Zylinder mit Höhe $h_{\text{dia}} = \bar{s}_{\text{mm},\text{min}}$ und Radius $r = 6 \text{ cm}$. Das endsystolische Volumen errechnet sich aus dem Zylinder des enddiastolischen Volumens abzüglich des durch die gewölbte Gummimembran gebildete Kugelsegments. Das Volumen eines Kugelsegments errechnet sich über

$$V = \frac{\pi}{3} h^2 (3 \cdot r - h) \quad (6)$$

nach [1]. Der Radius $r = 6 \text{ cm}$ entspricht hier dem Radius des Gummimembran des Herzmodells und die Höhe des Kugelsegments berechnet sich über:

$$h = h_{\text{dia}} - h_{\text{sys}} = \bar{s}_{\text{mm},\text{min}} - \bar{s}_{\text{mm},\text{max}} = 3,76 \text{ cm} - 2,77 \text{ cm} = 0,99 \text{ cm}.$$

Damit gilt für das Schlagvolumen:

$$V_{\text{Schlag}} = EDS - EDV = 17,41 \text{ cm}^3,$$

das Herzzeitvolumen ergibt sich daher zu:

$$HZV = (EDS - EDV) \cdot \nu_{\text{Herz}} = \left(\frac{\pi}{3} h^2 (3 \cdot r - h) \right) \nu_{\text{Herz}} = 22,638 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}.$$

5 Diskussion

Tabelle 6: Bestimmten Durchmesser der Fehlstellen im Acrylblock mit zugehörigen Fehlern.

n	d_A/mm	d_{SL}/mm	Δd_A	d_B	Δd_B
1	2.0	1.3	53,8 %	—	—
2	1.4	1.3	7,7 %	1.5	15,8 %
3	6.0	5.8	3,4 %	5.3	8,6 %
4	4.7	4.8	2,1 %	4.7	2,1 %
5	3.6	4.0	10,0 %	3.8	5,0 %
6	2.7	2.9	6,9 %	2.6	10,3 %
7	2.3	2.9	20,7 %	2.3	20,7 %
8	2.2	2.9	24,1 %	2.6	10,3 %
9	2.6	2.9	10,3 %	2.5	13,8 %
10	2.1	2.9	27,6 %	—	—
11	9.3	9.5	2,1 %	9.5	0,0 %

Ein Großteil der mittels Ultraschall-Scan ermittelten Werte liegt relativ nahe an den erwarteten Werten. Insgesamt lässt sich sagen, dass sehr kleine Fehlstellen mit deutlich größerer Ungenauigkeit, beziehungsweise sogar gar nicht über den Ultraschallscan vermessen werden konnten. Je größer die Fehlstelle war, desto kleiner ist bei beiden Messverfahren tendenziell der Fehler zum mittels Schiebelehre ermittelten Durchmesser.

Literatur

- [1] I.N. Bronstein und K.A. Semendjaew. *Springer-Handbuch der Mathematik I*. E. Zeidler, 2013.
- [2] Olympus Cooperation. *Material Sound Velocities*. URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/> (besucht am 14.06.2017).
- [3] TU Dortmund. *US2, Scanverfahren in der Ultraschalltechnik*. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/RoentgenAbs.pdf> (besucht am 28.05.2017).