

TU Dortmund

US1 - Grundlagen der Ultraschalltechnik

Markus Stabrin
markus.stabrin@tu-dortmund.de

Kevin Heinicke
kevin.heinicke@tu-dortmund.de

Versuchsdatum: 18. Juni 2013

Abgabedatum: 25. Juni 2013

1 Einleitung

Die Ultraschalltechnik findet eine weit verbreitete Anwendung. Sie wird häufig im medizinischen Bereich zur Diagnostik, sowie im technischen Bereich zur Materialanalyse benutzt. Die grundlegende Funktionsweise dieser Technik soll hier näher untersucht werden.

2 Theorie

Schall bezeichnet im Allgemeinen Druckveränderungen in einem Medium. In Luft und Flüssigkeiten breiten sich diese Druckveränderungen als Longitudinalwellen aus. Die Frequenz ν dieser Wellen wird in vier Bereiche unterteilt. Der menschlichen Hörbereich liegt in etwa bei $\nu = 16 \text{ Hz}$ bis $\nu = 20 \text{ kHz}$. Bis zu einer Frequenz von etwa $\nu = 1 \text{ GHz}$ werden Schallwellen als Ultraschall bezeichnet. Bei noch höheren Frequenzen handelt es sich um Hyperschall. Der Bereich unter $\nu = 16 \text{ Hz}$ wird als Infraschall bezeichnet.

2.1 Ausbreitung von Schallwellen

Eine eindimensionale Schallwelle p , die sich in x -Richtung ausbreitet wird beschrieben durch

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

Dabei bezeichnet p_0 den Normaldruck, v_0 die Schallschnelle und $Z = \rho c$ die akustische Impedanz mit der Dichte ρ des durchstrahlten Materials und der Schallgeschwindigkeit c .

Für die Schallgeschwindigkeit c_{fl} in Flüssigkeiten und Gasen gilt der einfache Zusammenhang

$$c_{\text{fl}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \rho}}, \quad (2)$$

Mit der Kompressibilitätszahl κ .

In Festkörpern ist hängt die Schallgeschwindigkeit auf kompliziertere Art und Weise von der Beschaffenheit des Materials ab. Auf Grund der inneren Struktur und den daraus resultierenden Schubspannungen kann eine Schallwelle auch transversale Anteile enthalten. Die Schallgeschwindigkeit unterscheidet sich dann für die transversale und die longitudinale Welle. Für den Longitudinalanteil der Welle gilt mit dem Elastizitätsmodul E des Festkörpers

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

Auf dem Weg durch ein Material nimmt die Amplitude der Schallwelle exponentiell, abhängig vom Absorptionskoeffizienten α , ab:

$$I(x) \propto e^{\alpha x}. \quad (4)$$

Wie bei elektromagnetischen Wellen werden Schallwellen an Grenzflächen ebenso reflektiert oder transmittiert. Bezeichnen Z_1 und Z_2 die akustischen Impedanzen der beteiligten Materialien, gilt für den Reflexionskoeffizienten R und den Transmissionskoeffizienten T :

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

$$T = 1 - R. \quad (6)$$

2.2 Erzeugung von Ultraschall

Für die Erzeugung von Ultraschallwellen kann der reziproke piezzo-elektrischen Effekt genutzt werden. Ein piezzo-elektrischer Kristall, wie zum Beispiel Quarz, besitzt die Eigenschaft, sich unter Einwirkung eines elektrischen Feldes zu verformen. In Umkehrung induziert dieser Kristall bei einer Krafteinwirkung ein elektrisches Feld.

Wird ein solcher Kristall nun mit einem elektrischen Wechselfeld angeregt, emittiert er je nach Frequenz des Feldes Ultraschall. Bei Resonanz können damit große Ultraschallamplituden erzeugt werden.

Umgekehrt kann das Feld, welches der Kristall bei Ultraschalleinstrahlung erzeugt, gemessen werden, sodass er als Sender und Empfänger dient.

2.3 Ultraschallverfahren

Zunächst werden zwei Verfahren der Ultraschalltechnik vorgestellt. Beide Verfahren nutzen aus, dass Schall an Störstellen in einem Medium (z.B. Verschmutzungen, Materialfehler) reflektiert und teilweise absorbiert wird.

- Beim *Durchschallungsverfahren* wird die Probe zwischen eine Sender- und eine Empfängersonde gespannt. Nachdem der Sender einen Schallimpuls erzeugt, trifft dieser Impuls nach einer gewissen Zeit t auf den Empfänger. Die Intensität des empfangenen Impulses sinkt mit der Größe der Probe. Zudem wird sie verkleinert, falls der Schallimpuls in der Probe auf eine Störstelle trifft.
- Der Sender dient beim *Impuls-Echo-Verfahren* auch als Empfänger. Nachdem ein Schallimpuls gesendet wird, wird die Laufzeit t und die Intensität des reflektierten Impulses gemessen. Mit Kenntnis der Schallgeschwindigkeit c in der untersuchten Probe lässt sich der Abstand s der Störstelle zur Sonde bestimmen:

$$s = \frac{1}{2}ct. \quad (7)$$

Die Laufzeitdiagramme, die durch die genannten Ultraschallverfahren aufgenommen werden, lassen sich wiederum auf verschiedene Weise auswerten. In der Medizin gibt es drei unterschiedliche Darstellungsarten:

- Mit dem Amplituden-Scan (*A-Scan*) wird die Echoamplitude gegen die Laufzeit aufgetragen.
- Der Brightness-Scan (*B-Scan*) stellt die Echoamplituden in Farbstufen dar. Durch Bewegung der Sonde kann dadurch ein zweidimensionales Bild erzeugt werden.
- Der Time-Motion-Scan (*TM-Scan*) nimmt durch eine schnelle Abtastung der Probe, bzw. des zu untersuchenden Körperteiles eine zeitliche Bildfolge auf, wodurch sogar Bewegungen innerhalb der Probe sichtbar gemacht werden können.

3 Versuchsaufbau

Zu diesem Versuch liegen Ultraschallsonden bereit, die jeweils verschiedene Frequenzen liefern. Sie betragen $\nu_1 = 1 \text{ MHz}$, $\nu_2 = 2 \text{ MHz}$ und $\nu_4 = 4 \text{ MHz}$. Die Sonden können je als Empfangs- und Sendeteil genutzt werden und sind über ein Steuergerät mit einem Computer verbunden.

Dieser zeigt ein Amplituden-Laufzeit-Diagramm der aktiven Sonde an (*A-Scan*) oder kann bei Bewegung der Sonde ein Bild aufnehmen (*B-Scan*). Dabei kann am Steuergerät gewählt werden, ob das Impuls-Echo-Verfahren oder das Durchschallungsverfahren mit einer bzw. zwei identischen Sonden genutzt werden soll. Zudem lässt sich am Steuergerät ein Verstärkungssignal zuschalten, um auch schwache Amplituden erkennen zu können.

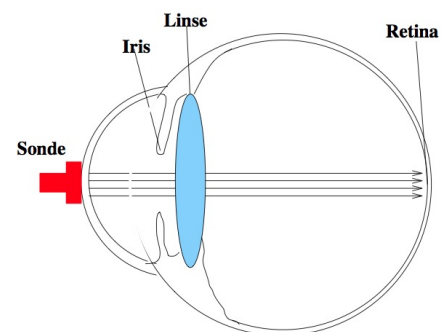


Abbildung 1: Aufbau des Augenmodells

Die zu untersuchenden Proben bestehen aus Acrylglas. Um eine Luftschicht zwischen Sonde und Probe zu verhindern, wird eine Ultraschallalbe oder Wasser als Übergangsmedium verwendet.

Durch einen großen Absorptionskoeffizienten α würde die Amplitude in der Luftschicht sonst zu stark abnehmen und der Schall kann nicht in die Probe eindringen.

Zusätzlich zu den Acrylkörpern soll ein Modell des menschlichen Auges untersucht werden. Dieses besitzt eine Glaslinse und ist mit Flüssigkeit gefüllt. Abbildung 1 verdeutlicht den Aufbau.

4 Durchführung

Zunächst wird die Schallgeschwindigkeit in Acrylglas bestimmt. Dazu werden drei Acryl-
zylinder unterschiedlicher Höhe jeweils mit jeder Sonde und einmal mit dem Durch-
schallungsverfahren, sowie dem Impuls-Echo-Verfahren untersucht. Beim Impuls-Echo-
Verfahren wird die Laufzeit t des Echos der Rückwand gemessen und es gilt für die
Höhe

$$h_{\text{IE}} = \frac{1}{2}ct. \quad (8)$$

Bei Durchschallungsverfahren fällt der Faktor $1/2$ weg, da das Signal direkt gemessen
wird:

$$h_{\text{D}} = ct. \quad (9)$$

Mit Kenntnis der Höhe h kann dann die Schallgeschwindigkeit c im Acrylglas bestimmt
werden.

Anschließend wird ein Acrylblock mit ver-
schiedenen Bohrungen untersucht. Durch
Nutzung des Impuls-Echo-Verfahrens wird
dabei mit einem A-Scan der Abstand der
Bohrungen zur Oberfläche des Glases be-
stimmt. Durch Messungen, ausgehend von
Ober- und Unterseite kann dann der Durch-
messer der Bohrungen bestimmt werden.
Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau
der Probe.

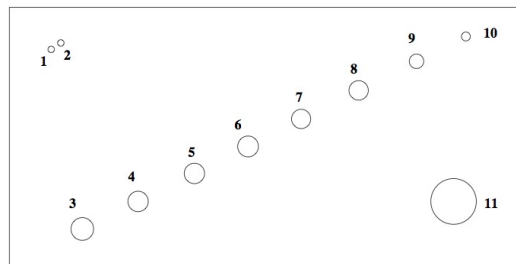


Abbildung 2: Aufbau der gestörten Probe

Zusätzlich zum A-Scan wird hier ein B-Scan
durchgeführt. Bei langsamer Bewegung der
Sonde über eine Seite der Probe kann so die
Lage der Bohrungen visualisiert werden. Hier werden alle drei Sonden benutzt und die
entsprechenden Bilder werden verglichen.

Schließlich wird ein Modell des menschlichen Auges mit Hilfe der Ultraschallsonden ver-
messen. Durch den inneren Aufbau des Modells sind insgesamt vier Amplitudenpeaks zu
erwarten, die durch Reflexion entstehen. Der erste Peak entspricht dabei einer Reflexion
an der Iris, der zweite und dritte Peak einer Reflexion an der Vorder- bzw. Rückseite der
Linse, die durch die verschiedenen Schallgeschwindigkeiten in Glas und Augenflüssigkeit
hervorgerufen wird. Der letzte Peak entspricht der Reflexion an der Retina. Durch die
Laufzeitmessung und mit Kenntnis der Schallgeschwindigkeiten in Linse ($c_L = 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)
und in der Flüssigkeit ($c_{\text{Fl}} = 1410 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) können dann die Größen im Auge bestimmt wer-
den.

5 Auswertung

5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acrylglas

Puls-Echo		Durchschall	
Länge[mm]	Laufzeit[μ s]	Länge[mm]	Laufzeit[μ s]
39.65	15.60	39.65	16.60
80.40	30.55	80.40	31.70
120.40	45.15	120.40	46.40

Tabelle 1: Meßergebnisse zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acrylglas der 1Mhz Sonde.

Puls-Echo		Durchschall	
Länge[mm]	Laufzeit[μ s]	Länge[mm]	Laufzeit[μ s]
39.65	15.15	39.65	15.40
80.40	30.10	80.40	30.80
120.40	44.75	120.40	45.50

Tabelle 2: Meßergebnisse zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acrylglas der 2Mhz Sonde.

Puls-Echo		Durchschall	
Länge[mm]	Laufzeit[μ s]	Länge[mm]	Laufzeit[μ s]
39.65	14.85	39.65	15.40
80.40	29.75	80.40	30.30
120.40	44.35	120.40	44.90

Tabelle 3: Meßergebnisse zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acrylglas der 4Mhz Sonde.

In den Tabellen 1, 2 und 3 sind die Messergebnisse aufgetragen, die sich beim Puls-Echo und beim Durchschallungs Verfahren ergaben. Eine lineare Ausgleichsrechnung der Verfahren mittels $f(x) = m \cdot x + a$ ergibt die gesuchten Größen. Die Steigung m gibt dabei die Schallgeschwindigkeit v an. Die Verschiebung des Y-Achsenabschnitts gibt eine effektive Länge des Zylinders an. Diese entspricht der zu durchlaufenden Schicht der Sonde unter der Annahme, dass in dieser die Schallgeschwindigkeit gleich der in Acrylglas ist. Somit ist der Betrag von a gleich δs , was die zweifache Differenz der effektiven mit der realen Länge des Zylinders entspricht.

5.1.1 1 MHz Sonde

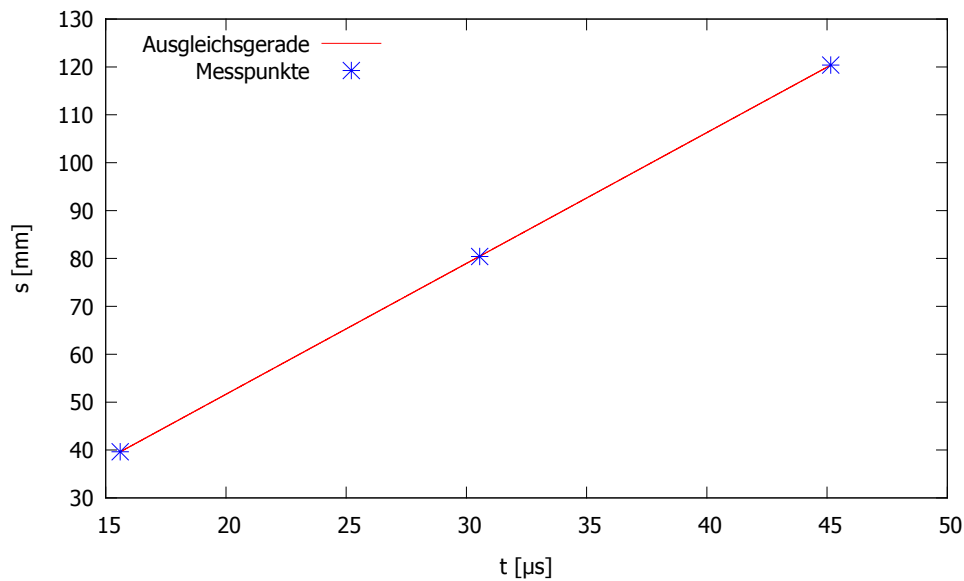


Abbildung 3: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Acrylglas mit dem Puls-Echo Verfahren. Dabei ist die Zeit, welche von der Schallwelle benötigt wird um den Zylinder einmal zu durchqueren, gegen die Höhe des Zylinders aufgetragen.

In Graphik 3 sind die Ergebnisse des Puls-Echo Verfahrens aufgetragen. Es wurde eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche zu folgenden Ergebnissen führte:

$$\begin{aligned}
 m = v &= (2,732\,63 \pm 0,004\,03) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 |a| = |2 \cdot \delta s| &= |(-3,013\,01 \pm 0,132\,00) \text{ mm}| \\
 \delta s &= (1,506\,51 \pm 0,066\,00) \text{ mm}
 \end{aligned}$$

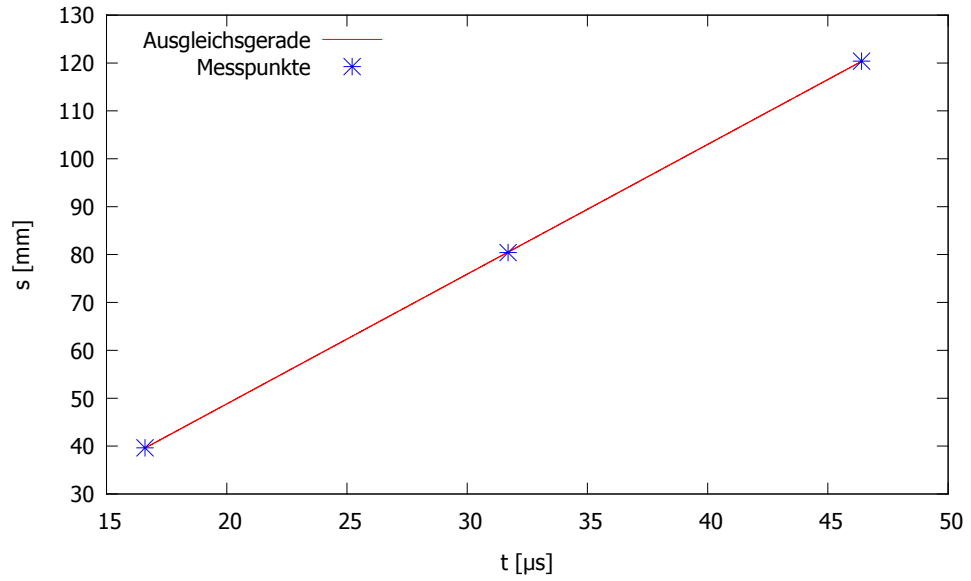


Abbildung 4: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Acrylglas mit dem Durchschallungs Verfahren. Dabei ist die Zeit, welche von der Schallwelle benötigt wird um den Zylinder einmal zu durchqueren, gegen die Höhe des Zylinders aufgetragen.

In Graphik 4 sind die Ergebnisse des Durchschallungs Verfahrens aufgetragen. Es wurde eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche zu folgenden Ergebnissen führte:

$$\begin{aligned}
 m = v &= (2,709\,68 \pm 0,006\,46) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 |a| = |2 \cdot \delta s| &= |(-5,385\,61 \pm 0,218\,80) \text{ mm}| \\
 \delta s &= (2,692\,81 \pm 0,109\,40) \text{ mm}
 \end{aligned}$$

In Tabelle 4 sind die wichtigen größen noch einmal zusammengefaßt. δt gibt ist dabei aus den Mittelwerten von v und δs errechnet worden. Dies ist die konstante Laufzeitkorrektur für die 1 MHz Sonde, welche durch die Anpassungsschicht entsteht.

Puls-Echo		Durchschall	
$v_e [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$\delta s [\text{mm}]$	$v_d [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$\delta s [\text{mm}]$
$2,733 \pm 0,004$	$3,013 \pm 0,132$	$2,710 \pm 0,006$	$5,386 \pm 0,219$
\bar{v}	$2,721 \pm 0,004$	$\bar{\delta s}$	$4,199 \pm 0,128$
δt	$1,543 \pm 0,047$		

Tabelle 4: Ergebnisse der linearen Regression für die 1 MHz Sonde.

5.1.2 2 MHz Sonde

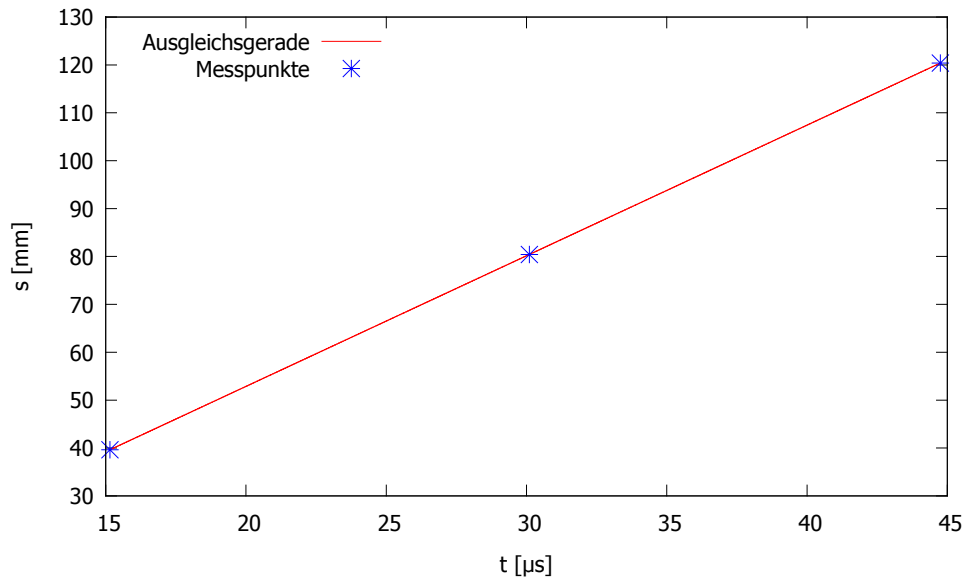


Abbildung 5: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Acrylglas mit dem Puls-Echo Verfahren. Dabei ist die Zeit, welche von der Schallwelle benötigt wird um den Zylinder einmal zu durchqueren, gegen die Höhe des Zylinders aufgetragen.

In Graphik 5 sind die Ergebnisse des Puls-Echo Verfahrens aufgetragen. Es wurde eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche zu folgenden Ergebnissen führte:

$$\begin{aligned}
 m = v &= (2,728\,03 \pm 0,001\,33) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 |a| = |2 \cdot \delta s| &= |(-1,690\,98 \pm 0,043\,16) \text{ mm}| \\
 \delta s &= (0,845\,49 \pm 0,021\,58) \text{ mm}
 \end{aligned}$$

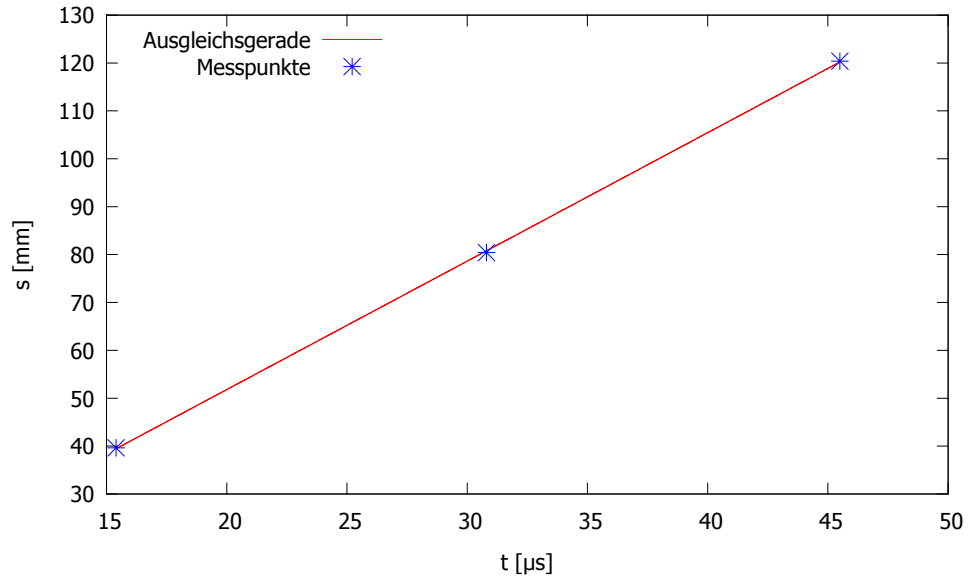


Abbildung 6: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Acrylglas mit dem Durchschallungs Verfahren. Dabei ist die Zeit, welche von der Schallwelle benötigt wird um den Zylinder einmal zu durchqueren, gegen die Höhe des Zylinders aufgetragen.

In Graphik 6 sind die Ergebnisse des Durchschallungs Verfahrens aufgetragen. Es wurde eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche zu folgenden Ergebnissen führte:

$$\begin{aligned}
 m = v &= (2,682\,43 \pm 0,021\,63) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 |a| = |2 \cdot \delta s| &= |(-1,843\,06 \pm 0,712\,60) \text{ mm}| \\
 \delta s &= (0,921\,53 \pm 0,356\,30) \text{ mm}
 \end{aligned}$$

In Tabelle 5 sind die wichtigen Größen noch einmal zusammengefaßt. δt gibt es dabei aus den Mittelwerten von v und δs errechnet worden. Dies ist die konstante Laufzeitkorrektur für die 2 MHz Sonde, welche durch die Anpassungsschicht entsteht.

Puls-Echo		Durchschall	
$v_e [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$\delta s [\text{mm}]$	$v_d [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$\delta s [\text{mm}]$
$2,728 \pm 0,001$	$1,691 \pm 0,043$	$2,682 \pm 0,022$	$1,843\,06 \pm 0,007\,13$
$\bar{v} [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$2,705 \pm 0,011$	$\bar{\delta s} [\text{mm}]$	$1,767 \pm 0,357$
δt	$0,653 \pm 0,132$		

Tabelle 5: Ergebnisse der linearen Regression für die 2 MHz Sonde.

5.1.3 4 MHz Sonde

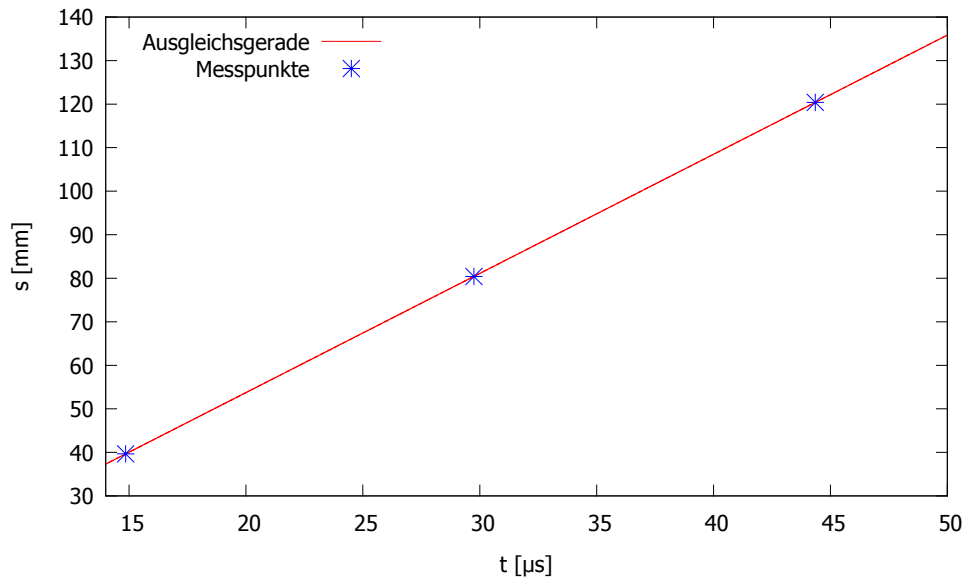


Abbildung 7: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Acrylglas mit dem Puls-Echo Verfahren. Dabei ist die Zeit, welche von der Schallwelle benötigt wird um den Zylinder einmal zu durchqueren, gegen die Höhe des Zylinders aufgetragen.

In Graphik 7 sind die Ergebnisse des Puls-Echo Verfahrens aufgetragen. Es wurde eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche zu folgenden Ergebnissen führte:

$$\begin{aligned}
 m = v &= (2,737\,28 \pm 0,001\,39) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 |a| = |2 \cdot \delta s| &= |(-1,010\,35 \pm 0,044\,58) \text{ mm}| \\
 \delta s &= (0,505\,18 \pm 0,022\,29) \text{ mm}
 \end{aligned}$$

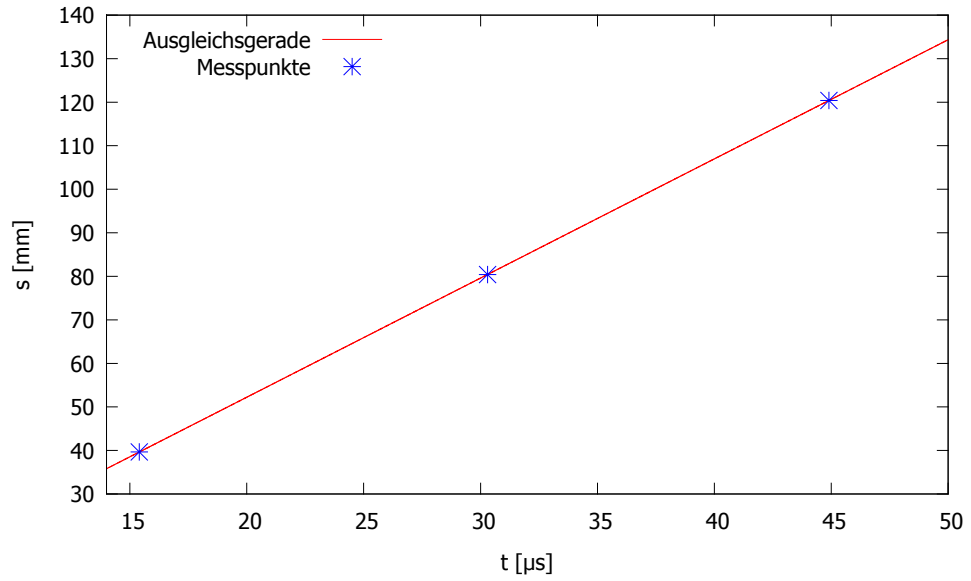


Abbildung 8: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Acrylglas mit dem Durchschallungs Verfahren. Dabei ist die Zeit, welche von der Schallwelle benötigt wird um den Zylinder einmal zu durchqueren, gegen die Höhe des Zylinders aufgetragen.

In Graphik 8 sind die Ergebnisse des Durchschallungs Verfahrens aufgetragen. Es wurde eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche zu folgenden Ergebnissen führte:

$$\begin{aligned}
 m = v &= (2,737\,28 \pm 0,001\,40) \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 |a| = |2 \cdot \delta s| &= |(-2,515\,85 \pm 0,045\,30) \text{ mm}| \\
 \delta s &= (1,257\,93 \pm 0,022\,65) \text{ mm}
 \end{aligned}$$

In Tabelle 6 sind die wichtigen Größen noch einmal zusammengefaßt. δt gibt es dabei aus den Mittelwerten von v und δs errechnet worden. Dies ist die konstante Laufzeitkorrektur für die 4 MHz Sonde, welche durch die Anpassungsschicht entsteht.

Puls-Echo		Durchschall	
$v_e [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$\delta s [\text{mm}]$	$v_d [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$\delta s [\text{mm}]$
$2,737 \pm 0,001$	$1,010 \pm 0,044$	$2,737 \pm 0,001$	$2,516 \pm 0,045$
$\bar{v} [\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}]$	$2,737 \pm 0,001$	$\bar{\delta s} [\text{mm}]$	$1,763 \pm 0,032$
δt	$0,644 \pm 0,012$		

Tabelle 6: Ergebnisse der linearen Regression für die 4 MHz Sonde.

5.2 Bestimmung der Lochbreite im Acrylglas

1 MHz		2 MHz		3 MHz	
Peak1[μs]	Peak2[μs]	Peak1[μs]	Peak2[μs]	Peak1[μs]	Peak2[μs]
42.1	13.2	40.9	12.2	40.6	11.8
12.2	48.2	11.2	47.1	10.9	46.6
18.2	42.3	17.1	41.2	16.7	40.7
24.1	36.4	23.0	35.3	22.6	34.8
30.1	30.5	29.0	29.3	28.5	28.9
35.5	24.4	34.4	23.2	33.9	22.8
41.2	18.0	40.0	16.8	39.5	16.4
46.5	11.7	45.5	10.7	45.0	10.4
15.0	46.3	14.0	45.6	13.6	45.1
16.1	45.5	15.3	44.4	14.9	43.8

Tabelle 7: Durch das Puls-Echo Verfahren erhaltene Werte zur Bestimmung der Lochgröße.

Die Höhe der gestörten Probe beträgt:

$$h = (79,7 \pm 0,2) \text{ mm}$$

In Tabelle 7 sind die gemessenen Werte zur Bestimmung der Breite der Störstellen nach 4 Abb. 2 in Acrylglas aufgelistet. Es ist zu beachten, dass die Breite der Störstelle 10 nicht untersucht werden konnte, da diese nur von einer Seite beschallt werden konnte. Zu erklären ist dies, weil diese im Schatten der sehr viel größeren Störstelle 11 liegt.

Zur Bestimmung der Breite ist es zunächst notwendig die Strecke von beiden Seiten zur Störstelle zu ermitteln. Da dies mit Impuls-Echo Verfahren durchgeführt wird, muss die Zeit t halbiert werden. Diese entspricht nun der Zeit, welche zum Erreichen der Störstelle gebraucht wird. Aus den zuvor ermittelten Schallgeschwindigkeiten für die einzelnen Sonden lässt sich daraus die Strecke nach Gleichung (8) berechnen. Nun muss noch die Länge δs abgezogen werden, da diese dem Weg in der Sonde entspricht. Das gleiche wird mit den Ergebnissen auf der Rückseite durchgeführt. Nun gilt für die Breite der Störstellen:

$$\begin{aligned}
 b &= h - (d_{\text{hin}} - d_{\text{rück}}) \\
 \Delta b &= \sqrt{(\Delta h)^2 + (\Delta s_1)^2 + (\Delta s_2)^2} \\
 \Delta s_{1,2} &= \sqrt{(\Delta s_{\text{eff},1,2})^2 + (\Delta \delta s)^2} \\
 \Delta s_{\text{eff},1,2} &= \frac{1}{2} t \Delta v
 \end{aligned}$$

5.2.1 1 MHz Sonde

$\frac{1}{2}t_1[\mu\text{s}]$	$\frac{1}{2}t_2[\mu\text{s}]$	$s_{\text{eff},1}[\text{mm}]$	$\Delta s_{\text{eff},1}[\text{mm}]$	$s_{\text{eff},2}[\text{mm}]$	$\Delta s_{\text{eff},2}[\text{mm}]$
21.05	6.60	57.28	0.08	17.95	0.02
6.10	24.10	16.59	0.02	65.57	0.09
9.10	21.15	24.76	0.03	57.55	0.08
12.05	18.20	32.78	0.04	49.52	0.06
15.05	15.25	40.95	0.05	41.49	0.05
17.75	12.20	48.30	0.06	33.19	0.04
20.60	9.00	56.05	0.07	24.49	0.03
23.25	5.85	63.26	0.08	15.91	0.02
7.50	23.15	20.40	0.02	62.99	0.08
8.05	22.75	21.90	0.03	61.90	0.08
$s_1[\text{mm}]$	$\Delta s_1[\text{mm}]$	$s_2[\text{mm}]$	$\Delta s_2[\text{mm}]$	$b[\text{mm}]$	$\Delta b[\text{mm}]$
55.18	0.10	15.85	0.06	8.66	0.24
14.49	0.06	63.48	0.11	1.72	0.24
22.66	0.07	55.45	0.10	1.58	0.24
30.69	0.07	47.42	0.09	1.58	0.23
38.85	0.08	39.39	0.08	1.45	0.23
46.20	0.09	31.09	0.07	2.40	0.23
53.95	0.10	22.39	0.07	3.35	0.24
61.16	0.10	13.81	0.06	4.71	0.24
18.30	0.06	60.89	0.10	0.50	0.24
19.80	0.07	59.80	0.10	0.09	0.24

Tabelle 8: Daten zur Bestimmung der Lochbreiten b mit einer 1 MHz Sonde. Dabei ist s_{eff} die Strecke inklusive des Sondenwegs, s die Strecke ohne Sondenweg, t die Laufzeit und b die Lochbreite.

In Tabelle 8 sind die Breiten der Störstellen, sowie die zur Berechnung benötigten Werte aufgelistet. Hierbei konnte besonders gut weiter entfernte Störstellen und die Rückwand erkannt werden. Dabei geht jedoch die Schärfe verloren.

5.2.2 2 MHz Sonde

$\frac{1}{2}t_1[\mu\text{s}]$	$\frac{1}{2}t_2[\mu\text{s}]$	$s_{\text{eff},1}[\text{mm}]$	$\Delta s_{\text{eff},1}[\text{mm}]$	$s_{\text{eff},2}[\text{mm}]$	$\Delta s_{\text{eff},2}[\text{mm}]$
21.05	6.60	55.32	0.23	16.50	0.07
6.10	24.10	15.15	0.07	63.71	0.26
9.10	21.15	23.13	0.10	55.73	0.23
12.05	18.20	31.11	0.13	47.75	0.20
15.05	15.25	39.23	0.16	39.63	0.17
17.75	12.20	46.53	0.19	31.38	0.13
20.60	9.00	54.10	0.22	22.72	0.10
23.25	5.85	61.54	0.25	14.47	0.06
7.50	23.15	18.94	0.08	61.68	0.25
8.05	22.75	20.70	0.09	60.06	0.25
$s_1[\text{mm}]$	$\Delta s_1[\text{mm}]$	$s_2[\text{mm}]$	$\Delta s_2[\text{mm}]$	$b[\text{mm}]$	$\Delta b[\text{mm}]$
54.44	0.42	15.62	0.36	9.64	0.59
14.27	0.36	62.82	0.44	2.61	0.61
22.25	0.37	54.84	0.42	2.61	0.60
30.23	0.38	46.86	0.41	2.61	0.59
38.34	0.39	38.75	0.39	2.61	0.59
45.65	0.41	30.50	0.38	3.56	0.59
53.22	0.42	21.84	0.37	4.64	0.60
60.66	0.44	13.59	0.36	5.45	0.60
18.05	0.37	60.80	0.44	0.85	0.60
19.81	0.37	59.17	0.43	0.72	0.60

Tabelle 9: Daten zur Bestimmung der Lochbreiten b mit einer 2 MHz Sonde. Dabei ist s_{eff} die Strecke inklusive des Sondenwegs, s die Strecke ohne Sondenweg, t die Laufzeit und b die Lochbreite.

In Tabelle 9 sind die Breiten der Störstellen, sowie die zur Berechnung benötigten Werte aufgelistet. Bei diesem Verfahren konnten sowohl nahe als auch weiter entfernte Störstellen relativ scharf dargestellt werden.

5.2.3 4 MHz Sonde

$\frac{1}{2}t_1 [\mu\text{s}]$	$\frac{1}{2}t_2 [\mu\text{s}]$	$s_{\text{eff},1} [\text{mm}]$	$\Delta s_{\text{eff},1} [\text{mm}]$	$s_{\text{eff},2} [\text{mm}]$	$\Delta s_{\text{eff},2} [\text{mm}]$
21.05	6.60	55.57	0.03	16.15	0.01
6.10	24.10	14.92	0.01	63.78	0.03
9.10	21.15	22.86	0.01	55.70	0.03
12.05	18.20	30.93	0.02	47.63	0.02
15.05	15.25	39.01	0.02	39.55	0.02
17.75	12.20	46.40	0.02	31.20	0.02
20.60	9.00	54.06	0.03	22.45	0.01
23.25	5.85	61.59	0.03	14.23	0.01
7.50	23.15	18.61	0.01	61.73	0.03
8.05	22.75	20.39	0.01	59.95	0.03
$s_1 [\text{mm}]$	$\Delta s_1 [\text{mm}]$	$s_2 [\text{mm}]$	$\Delta s_2 [\text{mm}]$	$b [\text{mm}]$	$\Delta b [\text{mm}]$
54.69	0.04	15.27	0.03	9.75	0.21
14.04	0.03	62.90	0.05	2.77	0.21
21.97	0.03	54.82	0.04	2.90	0.21
30.05	0.04	46.75	0.04	2.90	0.21
38.12	0.04	38.67	0.04	2.90	0.21
45.52	0.04	30.32	0.04	3.86	0.21
53.18	0.04	21.56	0.03	4.96	0.21
60.71	0.04	13.35	0.03	5.64	0.21
17.73	0.03	60.84	0.04	1.12	0.21
19.51	0.03	59.06	0.04	1.12	0.21

Tabelle 10: Daten zur Bestimmung der Lochbreiten b mit einer 4 MHz Sonde. Dabei ist s_{eff} die Strecke inklusive des Sondenwegs, s die Strecke ohne Sondenweg, t die Laufzeit und b die Lochbreite.

In Tabelle 10 sind die Breiten der Störstellen, sowie die zur Berechnung benötigten Werte aufgelistet. Weiter entfernte Störstellen waren nicht mehr gut messbar, doch nahe Störstellen wurden besonders scharf dargestellt.

5.3 B-Scan einer gestörten Probe

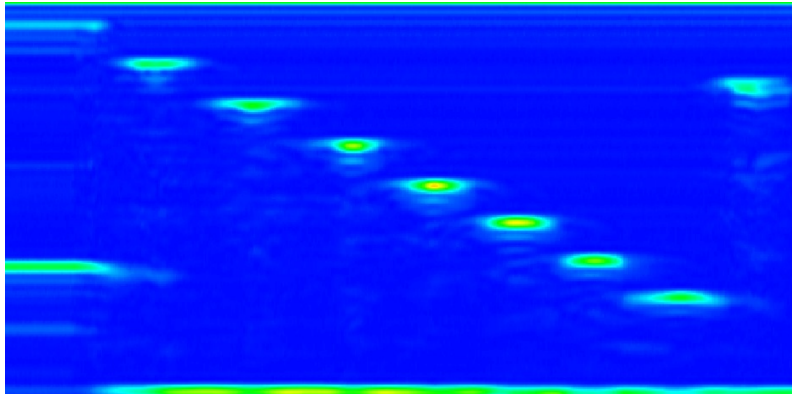


Abbildung 9: B-Scan der gestörten Probe mit einer 1 MHz Sonde.

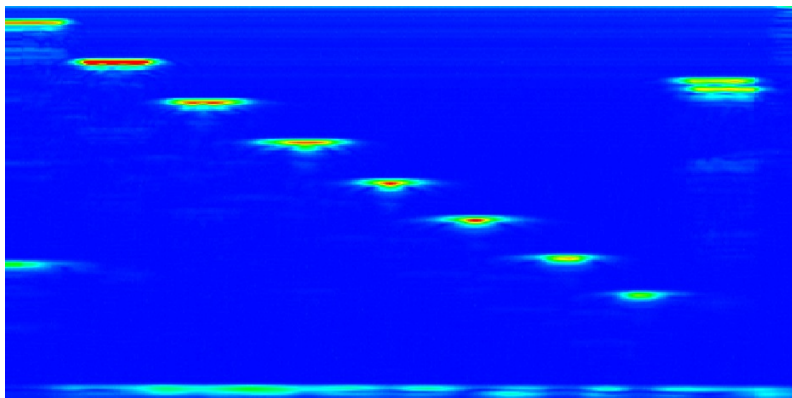


Abbildung 10: B-Scan der gestörten Probe mit einer 2 MHz Sonde.

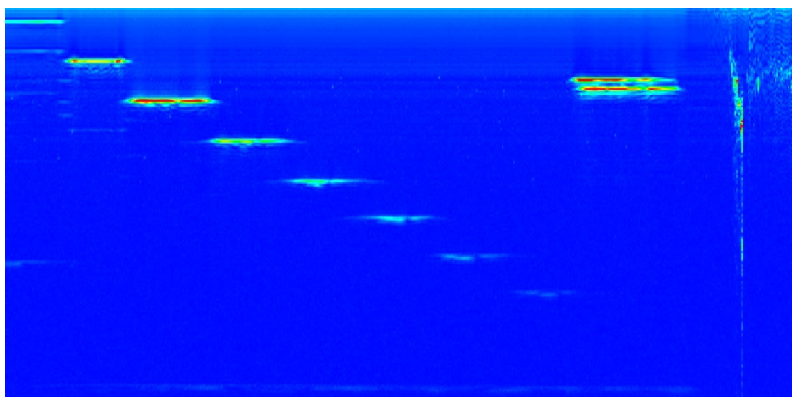


Abbildung 11: B-Scan der gestörten Probe mit einer 4 MHz Sonde.

Es ist zu erkennen, dass die Reichweite der Ultraschallwelle mit zunehmender Frequenz abnimmt. Jedoch nimmt auch die Schärfe der dargestellten Störstellen zu. Es kann gesagt werden, dass hohe Frequenzen zwar weniger tief eindringen, doch im nahen Bereich eine sehr gute Auflösung erreichen, während mit weniger hohen Frequenzen mehr ein Gesamtüberblick erreicht wird, doch keine genauen Aussagen getroffen werden können.

5.4 Abmessungen eines Auges

Sonde[MHz]	Peak1[μs]	Peak2[μs]	Peak3[μs]	Peak4[μs]
1	12.4	18.3	26.3	72.8
2	12.0	17.6	24.4	71.7
4	11.7	16.6	24.8	71.1

Tabelle 11: Messdaten zur Berechnung der Maße der Nachbildung eines Auges.

In Tabelle 11 sind die Messdaten des Auges aufgelistet.

Die Schallgeschwindigkeiten in der Linse v_L und dem Rest v_{GK} des Auges beträgt:

$$v_L = 2,5 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}$$

$$v_{GK} = 1,41 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}$$

Bei dieser Methode muss zunächst die Laufzeitkorrektur $2\delta t$ von den gemessenen Zeiten abgezogen werden. Um den Abstand zwischen Sonde und Iris zu berechnen, muss nun die neue Zeit durch zwei geteilt werden und diese mit v_{GK} multipliziert werden.

Bei den weiteren Abständen wird die, für den vorherigen Abstand, gemessene Zeit von der nun benötigten Zeit abgezogen. Es bleibt die Zeit übrig, welche die Welle benötigt um von dem vorherigen Meßpunkt wieder an diesen zurückzukehren. Diese Zeit durch zwei geteilt und mit der dort wirkenden Geschwindigkeit multipliziert ergibt nun den gesuchten Abstand.

Die Abstände der einzelnen Messbereiche sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Sonde[MHz]	$d_{S,I}$ [mm]	$d_{I,L1}$ [mm]	$d_{L1,L2}$ [mm]	$d_{L2,R}$ [mm]	d_{ges} [mm]
1	7.66	4.16	10.00	32.78	54.60
2	8.00	3.95	8.50	33.35	53.80
4	7.79	3.45	10.25	32.64	54.13

Tabelle 12: Abmessungen des Auges mithilfe verschiedener Ultraschallsonden. Dabei ist $d_{S,I}$ der Abstand zwischen Sonde und Iris, $d_{I,L1}$ der Abstand zwischen Iris und Linse1, $d_{L1,L2}$ der Abstand zwischen Anfang der Linse und Ende der Linse, $d_{L2,R}$ der Abstand zwischen Ende der Linse und der Retina.

6 Diskussion

Literatur

- [1] Physikalisches Anfängerpraktikum der TU Dortmund: Versuch US1 - Grundlagen der Ultraschalltechnik. <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf>. Stand: Juni 2013.