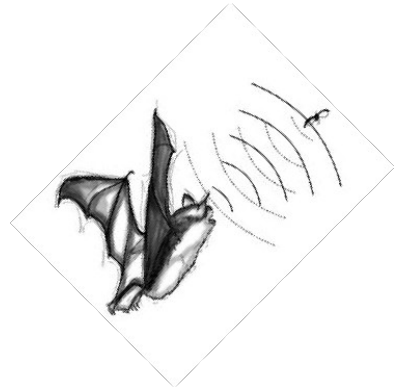


Fachbereich 1



**Laborprotokoll**  
**Ultraschall-Impulsecho-Verfahren (FP 12)**

Schriftliche Versuchsbeschreibung und  
Auswertung im Fortgeschrittenen-Praktikum,  
im SS 2007

Dozent: Prof. Dr. Thomas Schmidt  
Tutor: A. Zargham

vorgelegt von: Thorsten Schönbohm  
Linn Schneider  
und  
Sandra Erdmann

Bremen, 16.06.2007



## Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	2
2 Theoretischer Hintergrund.....	3
2.1 Wellenarten.....	3
2.2 Erzeugung.....	6
2.3 Wellenverhalten in verschiedenen Medien.....	7
2.4 Ultraschallanwendungen.....	9
2.4 A und B-Bild Verfahren.....	9
3 Versuchsdurchführung und Auswertung.....	11
3.1 Bestimmung der longitudinalen Schallgeschwindigkeit.....	11
3.2 Berechnung des Elastizitätsmoduls.....	12
3.3 Bestimmung der Lage der Fehlstellen im Acrylglaskörper.....	13
3.4 Aufnahme des Brightness-Bildes.....	15
3.5 Eigenfrequenz der Messköpfe.....	16
3.6 Schalldämpfungskoeffizienten der Materialien.....	17
3.7 Dispersion der Messfrequenzen.....	18
3.8 Transmissionsverhalten im Wasserbad.....	20
4 Fazit .....	22
5 Literaturangaben.....	23

## 1 Einleitung

Der durchgeführte Versuch *Ultraschall-Impulsecho-Verfahren* beschäftigt sich mit den Grundlagen und Anwendungen von Ultraschall. Für die Vorbereitung des Versuches sind Kenntnisse über die Erzeugung, Ausbreitung, Reflexion, Dämpfung und Dispersion sowie über Wellenarten und deren Verhalten in verschiedenen Medien nötig. Im Theorieteil werden diese Größen kurz vorgestellt. Die Anwendungen im Versuch beschränken sich auf das A-Bild und B-Bild Verfahren, diese Methoden werden im Versuch dazu benutzt, um so genannte Störstellen in einem Acrylglasquader aufzuspüren. Zusätzlich werden Materialkonstanten für verschiedene Materialien bestimmt und mit Literaturwerten verglichen. Für die 8 Versuche steht ein Ultraschallgerät (Typ: <sup>G</sup>A<sup>MPT</sup>-Scan) der Firma GAMPT mbH zur Verfügung, welches als Sender und auch als Empfänger dient. Als Zubehör gehören noch 1 MHz und 4 MHz Sonden sowie die verschiedenen Prüfkörper.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Man definiert einen Schallbereich oberhalb unseres Hörvermögens, den man als Ultraschall <lat. ultra »jenseits, über, über ... hinaus«> bezeichnet. Dieser ist in Abbildung 1, dem des Lichtbereiches gegenübergestellt.

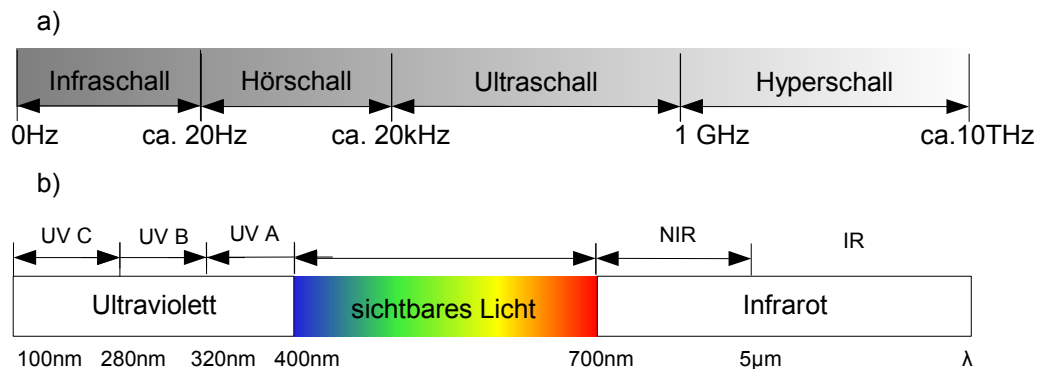


Abbildung 1: Gegenüberstellung des Schallwellen- und Lichtspektrums nahe des menschlichen Wahrnehmungsbereiches

Daten entnommen aus: Kuttruff, 1988 und Burrows Skript, Atom- u. Molekülphysik, 2007

Da die Ausbreitung von Schall im Gegensatz zu der elektromagnetischen Wellen stets an ein stoffliches Medium gebunden ist, wird sie von diesem entscheidend beeinflusst; sowohl die Geschwindigkeit des Schalls als auch seine Ausbreitungsdämpfung hängt stark von der Art des Mediums ab. Die theoretische Obergrenze von möglichen Schallwellen liegt bei ca. 10THz.<sup>1</sup> Für verschiedene Materialien ergibt sich eine Grenzfrequenz für elastische Festkörperschwingungen der sogenannten *Debye-Frequenz*. Die Wellenlängen können nicht kürzer werden als der doppelte Atomabstand  $2d$ . Bei  $\lambda = 2d$  schwingen benachbarte Atome gegenphasig, und jede geometrisch noch kürzere Welle wäre physikalisch gleichwertig einer längeren.<sup>2</sup>

### 2.1 Wellenarten

Materiewellen lassen sich in unterschiedlichen Formen einteilen. Die beiden Hauptvertreter sind die Longitudinal- und Transversalwellen. Um zu zeigen das es verschiedene Wellenformen gibt sind weitere Vertreter in Abbildung 2

<sup>1</sup> Kuttruff, Physik und Technik..., 1988, S. 20

<sup>2</sup> vergl. Meschede, Gerthsen Physik..., 2004, S. 197

schematisch aufgezeigt.

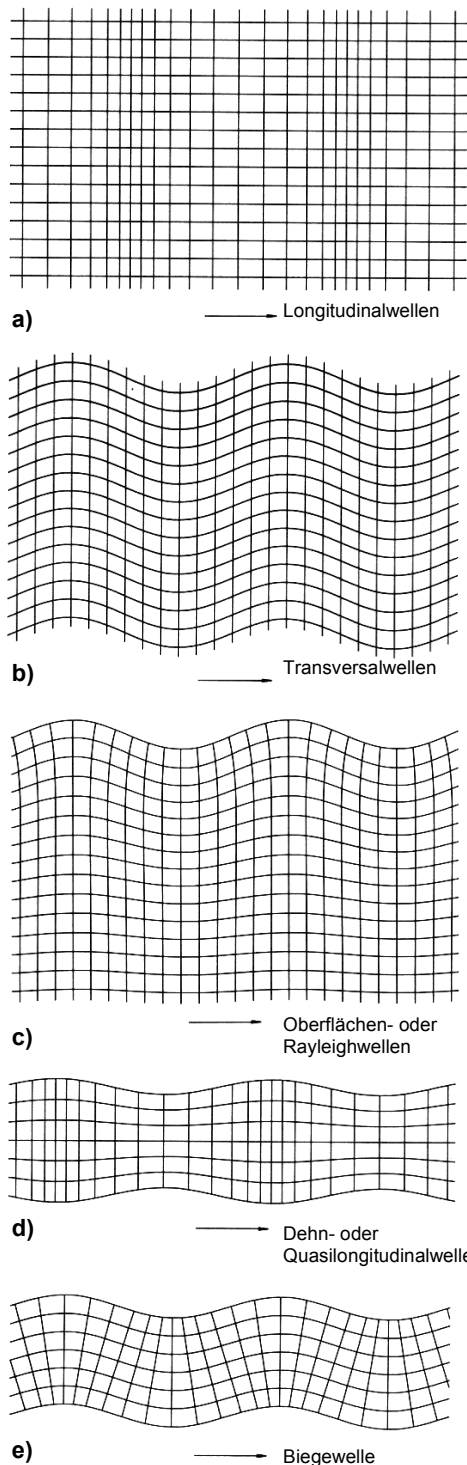


Abbildung 2: Verschiedene Wellenarten  
 Quelle: Kuttruff, Physik und Technik...,  
 1988

### Longitudinalwellen

Eine Longitudinal- oder Dichtewelle liegt dann vor, wenn die Partikelauslenkung im Medium in Richtung der Wellenausbreitung erfolgt. In festen elastischen Körpern besteht die Longitudinalwelle aus periodischen Änderungen der Normalspannung. Unter Normalspannung versteht man, dass der Körper sich im Ruhezustand befindet und nicht irgendwie belastet ist. In Flüssigkeiten und Gasen sind ausschließlich longitudinale Wellen möglich und keine transversalen Wellen (Beschreibung nächste Seite). Ein weiterer Unterschied zu den Transversalwellen im Festkörper besteht darin, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Longitudinalwelle größer ist als eine Transversalwelle  $C_L > C_T$ . Die Geschwindigkeit berechnet sich zu:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad 1)$$

Dabei ist E das Elastizitätsmodul (Young-Modul),  $\nu$  die Poisson-Zahl und  $\rho$  die Dichte des Mediums.

### Transversalwellen

Bei akustischen Transversal- oder Schubwellen schwingen die Materieteilchen senkrecht zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Sie besteht aus periodischen Änderungen der Schubspannung senkrecht zur Wellenausbreitung. Wie man in Abbildung 2 erkennt werden in einer Longitudinalwelle ursprünglich kubische Volumenelemente in Richtung der Ausbreitung gestreckt und gestaucht. Bei einer Transversalwelle bleibt der Inhalt der Volumenelemente dagegen erhalten; was sich beim Schalldurchgang ändert, ist lediglich ihre Form. Daher stammen auch die Namen Schub- oder Scherwellen. In Flüssigkeiten können keine Scherkräfte auftreten und dies ist auch der Grund das Transversalwellen ausschließlich in Festkörpern zu finden sind. Die Geschwindigkeit berechnet sich über das Elastizitätsmodul  $E$ , der Poisson-Zahl  $\nu$ , sowie der Dichte  $\rho$  zu:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} \quad 2)$$

Außerdem kann die Transversalwellengeschwindigkeit bei bekanntem Scher- bzw. Torsionsmodul  $G$  bestimmt werden zu:

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 3)$$

Anders herum setzt man das *Ultraschall-Impulsecho-Verfahren* dazu ein, gerade diese Elastizitätszahlen zu bestimmen. Der große Vorteil im Gegensatz zu Zug-Versuchen dabei ist den Prüfling zerstörungsfrei zu prüfen. Außerdem sind die äußeren Abmessungen im Vergleich zu den DIN EN genormten Prüflingen im Zugversuch nicht maßgeblich ausschlaggebend.

## 2.2 Erzeugung

In technischen Anwendungen werden Ultraschallwellen häufig von piezoelektrischen Wandlern (oder auch Transducer) erzeugt. Sie wandeln elektrische Wechselspannungen in mechanische Schwingungen (Piezoelektrischer Effekt) um.

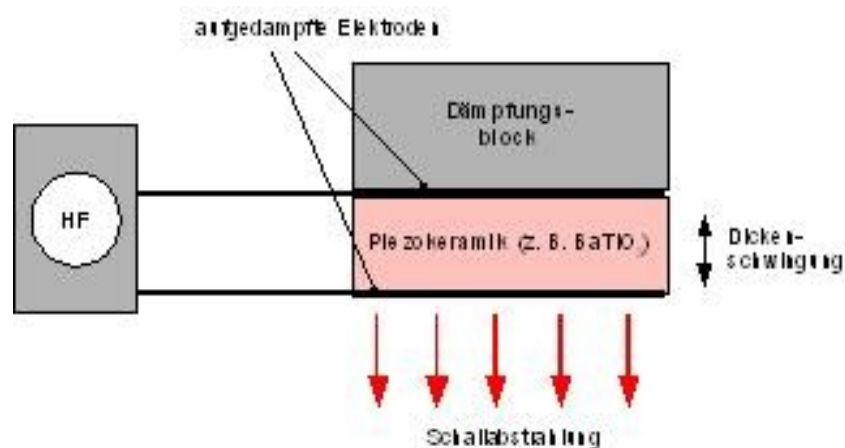


Abbildung 3: Prinzip eines piezoelektrischen Schallwandlers. a)-c) Zur Erklärung des piezoelektrischen Effekts bei Quarz.

Ursache des piezoelektrischen Effekts ist eine besondere, weit verbreitete Asymmetrie im Kristallaufbau. Sie führt dazu, dass bei einer elastischen Beanspruchung bzw. bei der von ihr bewirkten Deformation des Kristalls positiv geladene Ionen derart gegenüber den negativ geladenen verschoben werden, dass in jeder Kristallzelle ein elektrisches Dipolmoment entsteht, wie dies Abb. 3 a bis c in stark vereinfachter Form für Quarz (Siliziumdioxid, SiO<sub>2</sub>) zeigt. Es eignen sich die Kristallsubstanzen wegen der Umkehrbarkeit des piezoelektrischen Effekts grundsätzlich zur Herstellung von Ultraschallsendern sowie auch von Ultraschallempfängern.<sup>1</sup>

Der Dämpfungsblock in Abbildung 3 dient als Gegenlager, um die Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls zu bestimmen.

Neben der Erzeugung von Ultraschall mit piezoelektrischen Wandlern bestehen noch Möglichkeiten Ultraschall über Luftsäulen (Hundepfeife) oder schwingenden Seiten (z. B. Kehlkopf von Fledermäusen) zu erzeugen.

<sup>1</sup> Kuttruff, Physik und Technik..., 1988, S. 87



## 2.3 Wellenverhalten in verschiedenen Medien

Schallwellen verhalten sich bei Übergängen in anderen Medien ähnlich wie Lichtwellen. Änderungen oder gar Sprünge der akustischen Impedanz (z. B. Rissen in Werkstoffen) längs der Schallrichtung führen zu einer teilweisen Reflexion der akustischen Energie (Abb. 4). Der *Reflexionsgrad*  $R$  berechnet sich zu

$$R = \frac{I_R}{I_E} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad 4)$$

ebenso lässt sich der *Schalldissipationsgrad*  $\delta$

$$\delta = \frac{I_A}{I_E} \quad 5)$$

und der *Schalltransmissionsgrad*  $\tau$

$$\tau = \frac{I_T}{I_E} \quad 6)$$

$\tau$  im Idealfall

$$\tau = 1 - R \quad 7)$$

berechnen.  $I$  ist dabei die *Intensität* die ein Maß dafür ist wie viel Energie pro Zeiteinheit durch eine zur Ausbreitungsrichtung der Welle senkrechte Flächeneinheit transportiert wird.

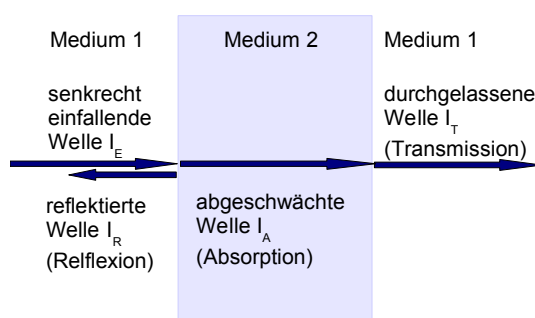


Abbildung 4: Eine Schallwelle durchdringt verschiedene Medien (schematische Darstellung)

Die Schwächung der Intensität die wiederum eine Schallwelle erfährt, wenn sie durch ein Medium läuft wird mit dem *Beer'schen Absorptionsgesetz* beschrieben

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad 8)$$

wobei  $x$  die Dicke des Materials und  $\mu$  der *Dämpfungskoeffizient* ist. Der Dämpfungskoeffizient ist von der Frequenz der Schallwelle abhängig. Z.B eine 1 oder 4 MHz Sonde.

Für die Frequenzabhängigkeit gilt

$$\mu(f) = \mu_0 \cdot f^n \quad 9)$$

wobei der Frequenzabhängiger Dämpfungskoeffizient und  $n$  Grad der Frequenzabhängigkeit sind.

Ursache für die *Absorption* von Schall und Ultraschallwellen in unterschiedlichen Medien sind verschiedene Energie verzehrende Mechanismen. Zum Beispiel findet beim Übergang in unterschiedlichen Medien ein Wärmeaustausch statt, die zwischen benachbarten Gebieten, durch Kompression erwärmt bzw. durch Dilatation abgekühlt sind. Die so ausgetauschte Energie geht dem Schallfeld verloren. Da der Austausch umso schneller erfolgt, je näher die verschiedenen temperierten Bereiche einander sind, werden hohe Töne stärker absorbiert als tiefe. Zur Absorption trägt ferner die innere Reibung bei. In mehratomigen Gasen und in flüssigen Medien kommt noch die *Relaxation* des thermischen Gleichgewichts hinzu: Bei niedrigen Frequenzen hat sie Zeit auf die Rotations-, Schwingungs- und sonstigen Freiheitsgrade übertragen zu werden. Bei hohen Frequenzen jedoch teilt sich die Schallenergie nur den translatorischen Freiheitsgraden der Moleküle mit. Eine *Dispersionsstufe* liegt im Übergang zwischen beiden Gebieten und des entsprechenden Absorptionsgebiets. Diese Relaxationsfrequenzen liegen sehr hoch, und umso höher, je dichter das Gas ist; daher wächst die Absorption im Allgemeinen mit steigender Frequenz und bei Gasen mit abnehmendem Druck.

Die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit  $v$  einer Welle von seiner Wellenlänge wird durch die *Dispersion* beschrieben. Man unterscheidet zwei Arten von Dispersion. Einmal die *normale Dispersion*, wobei die Phasengeschwindigkeit  $v$  bei wachsender Wellenlänge  $\lambda$  kleiner wird und die *anormale Dispersion*, wobei die Phasengeschwindigkeit  $v$  bei wachsender Wellenlänge  $\lambda$  größer wird.

## 2.4 Ultraschallanwendungen

In der Technik gibt es die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche für Ultraschall, einige davon sollen hier nur exemplarisch und stellvertretend für andere Anwendungen aufgelistet werden.

### *Anwendungen von Ultraschall mit hoher Intensität*

- Reinigen mit Ultraschall, Schweißen, Bohren Schneiden und Zertrümmern

### *Anwendungen in der medizinischen Diagnostik*

- Innere Medizin, Gynäkologie und Geburtshilfe, Kardiographie, Augenheilkunde

### *Zerstörungsfreie Materialprüfung*

- Auffinden von Fehlstellen bei Schweißnähten, Auffinden von Rissen

## 2.4 A und B-Bild Verfahren

Die Messanordnungen für das A und B-Bild Verfahren ist im Prinzip gleich, wie aus der Abbildung ersichtlich ist.

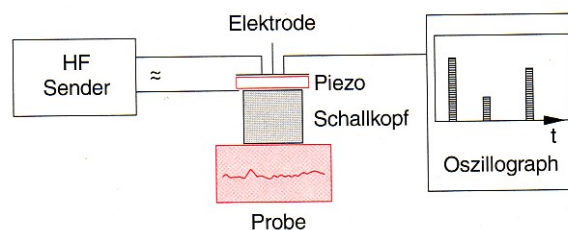
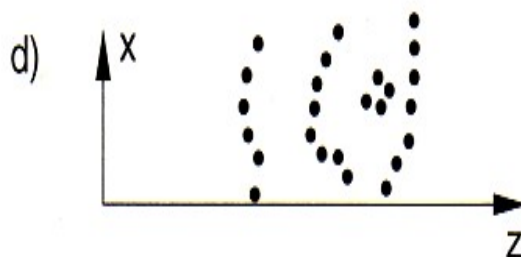
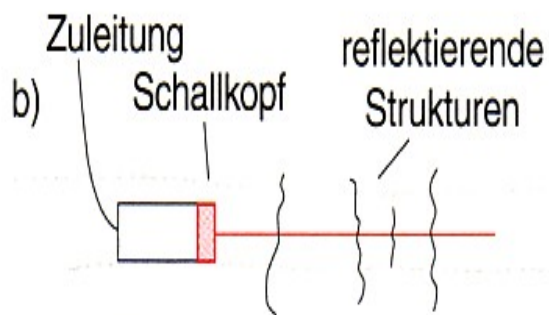
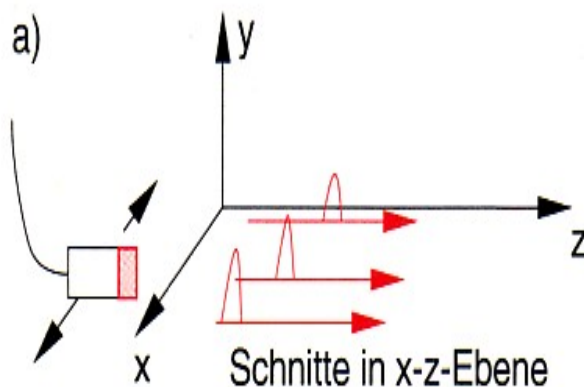


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Aufbaus zum Ultraschall-Impulsecho Verfahren  
Quelle: Demtröder Experimentalphysik I, 2005

Mit einem HF-Generator werden elektrische Schwingungen im Ultraschallbereich erzeugt. Diese werden dann vom Schallkopf in mechanische Wellen umgewandelt und in den Probekörper ggf. über ein Kopplungsmedium geschickt. Das Kopplungsmedium sorgt dafür dass an der Grenzfläche Schallkopf / Probekörper ein möglichst kleiner Impedanzunterschied besteht. Ansonsten würde ein Großteil der Schallwellen an diesem Grenzübergang bereits unerwünschter Weise reflektiert werden und nicht mehr in den eigentlichen Probekörper gelangen.



Die an Grenzflächen im Abstand  $l$  vom Sender reflektierten Impulse entsprechen der doppelten Laufzeit  $t$  des akustischen Impulses zwischen Sender und reflektierender Struktur (Hin- und Rücklauf). Bei bekannter Schallgeschwindigkeit  $v_s$  ist damit nach

$$v_s = \frac{2l}{t} \quad 10)$$

die Entfernung  $l$  zwischen beiden bestimmbar. Das Verfahren gibt also eine eindimensionale Darstellung (Abb. 5b, 5c) der untersuchten Struktur. Man spricht bei dieser Methode auch vom *A-Bild-Verfahren*, wobei A die Abkürzung für die Amplitude der reflektierten Pulse ist.

Abbildung 6: a) Verschiebung des Wandlers in  $x$ -Richtung um verschiedene Schnitte in der  $x$ - $z$ -Ebene zu erhalten.

b) Prinzip der Echomethode.

c) Eindimensionale Aufzeichnung. d) Zweidimensionale Aufzeichnung

Quelle: Demtröder, *Experimental-physik I...*, 2005

Beim *B-Bild-Verfahren* steht das B für bright-ness. Im Unterschied zum A-Bild-Verfahren liefert diese Methode ein zweidimensionales Bild (Abb. 5a, 5d). Dabei wird der Schallkopf in x-Richtung, quer zur Schallrichtung verschoben oder geschwenkt, so werden die einzelnen Schnittbilder aufgezeichnet, gespeichert und dann zu einem zweidimensionalen Bild zusammengesetzt. Die Intensität der reflektierten Impulse wird in Grauwerte oder Farben umgesetzt, sodass die untersuchten Strukturen besser erkannt werden können.

Beide Verfahren werden u. a. auch in der medizinischen Diagnostik angewandt. Der große Vorteil gegenüber zu Röntgendiagnostik besteht darin, dass - bei nicht zu großer Schallamplitude - keine Schädigungen des Körpers auftritt.

### 3 Versuchsdurchführung und Auswertung

#### 3.1 Bestimmung der longitudinalen Schallgeschwindigkeit

In diesem Versuch sollten zuerst die longitudinalen Schallgeschwindigkeiten der Materialien Acrylglas, Stahl, Aluminium und Messing bestimmt werden. Dazu wird an den Probekörpern eine Ultraschallsonde in Reflektion mittels eines dünnen Wasserfilms angekoppelt. Das bedeutet, der Ultraschallimpuls durchquert den Körper einmal, wird an der Körpergrenze reflektiert und läuft die selbe Strecke wieder zurück zum Ultraschallwandler, der gleichzeitig als Sender und Empfänger funktioniert. Im A-Bild-Modus kann die Laufzeit  $t$  zwischen Aussendung eines Impulses und Auftreffen des an der Grenzschicht des Körpers reflektierten Echos gemessen werden. Außerdem ist die Dicke der Probe, d.h. die Entfernung zwischen Ultraschallwandler und Körpergrenze zu bestimmen. Die longitudinale Schallgeschwindigkeit berechnet sich dann nach folgender Formel:

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

Die Messungen wurden sowohl mit der 1 MHz-Sonde als auch mit der 4 MHz-Sonde durchgeführt. Da bei der 4 MHz-Sonde der Ultraschall wesentlich stärker gedämpft wird als bei der 1 MHz-Sonde, musste man bei einigen Materialien (z.B. bei Messing und Acrylglas) an der kurzen Körperseite messen, da man sonst kein Echo erhalten hat. Der Fehler für die jeweiligen Schallgeschwindigkeiten in den Medien lässt sich wie folgt berechnen:

$$\Delta c_L = \pm \left\{ \left| \frac{2}{t} \Delta x \right| + \left| \frac{-x}{t^2} \Delta t \right| \right\} \quad (a)$$

Die weiteren Fehler der Messgrößen folgen aus dem zeitlichen Auflösungsvermögen der Messsensoren. Die folgende Tabelle stellt unsere gemessenen Werte, die Fehler und die errechneten Geschwindigkeiten dar:

Material	Sensor	Zeit		Dicke s in [m]	Signalweg		Geschwindigkeit	
		t in [µs]	Δt in [µs]		x in [m]	Δx in [m]	c in [ms <sup>-1</sup> ]	Δc in [ms <sup>-1</sup> ]
Stahl	1 Mhz	36,2	0,4	0,1000	0,200	0,004	5524,86	282
	4 Mhz	36,1					5540,17	283
Messing	1 Mhz	8,5	0,4	0,0150	0,030	0,004	3529,41	1107
	4 Mhz	7,8					3846,15	1223
Aluminium	1 Mhz	8,1	0,4	0,0250	0,050	0,004	6246,91	1292
	4 Mhz	8,12					6231,53	1289
Acrylglas	1 Mhz	30,4	0,4	0,0400	0,080	0,004	2631,58	298
	4 Mhz	29,7					2693,6	306

Die Zeiten wurden über mehrere Perioden ermittelt und sind anschließend auf eine Periode umgerechnet worden. Mitteln wir nun die Werte für die jeweilige Schallgeschwindigkeit in einem Medium, erhalten wir folgende Werte:

Material	Gerundetes Ergebnis c in [ms-1]	Gerundete Fehler Δc in [ms-1]	Literaturwerte c in [ms-1]
Stahl	5530	280	5000 bis 5900
Messing	3690	1220	3500 bis 4430
Aluminium	6240	1150	5110 bis 6420
Acrylglas	2660	310	2740

Unsere gemessenen Werte stimmen sehr gut mit den Literaturwerten überein.

### 3.2 Berechnung des Elastizitätsmoduls

Als nächstes sollte der Elastizitätsmodul  $E$  der Materialien mit Hilfe der Formel

$$E = c_L^2 \rho \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{1-\nu} \tag{2}$$

berechnet werden. Dabei ist  $\nu$  die Poissonzahl und  $\rho$  die Dichte der Materialien. Der Fehler für das Elastizitätsmodul lässt sich wie folgt berechnen, wobei die Poissonzahl als konstant angenommen wurde:

$$\Delta E = \pm \left\{ \left| 2 \cdot c_L \rho_o \frac{(1-2\nu_p)(1+\nu_p)}{1-\nu_p} \cdot \Delta c_L \right| + \left| c_L^2 \frac{(1-2\nu_p)(1+\nu_p)}{1-\nu_p} \cdot \Delta \rho_o \right| \right\} \tag{b}$$

In der Folgenden Tabelle sind unsere Ergebnisse dargestellt:

Material	Sensor	Geschwindigkeit		Dichte in [kgm <sup>-3</sup> ]		Poissonzahl $\nu_p$	E-Modul in [GPa]	
		c in [ms <sup>-1</sup> ]	$\Delta c$ in [ms <sup>-1</sup> ]	$P_0$	$\Delta P_0$		E	$\Delta E$
Stahl	1 Mhz	5524,86	282,04	7600	100	0,28	181,46	20,91
	4 Mhz	5540,17	282,99	7600	100	0,28	182,47	20,87
Messing	1 Mhz	3529,41	1107,27	8200	100	0,35	63,64	42,29
	4 Mhz	3846,15	1222,88	8200	100	0,35	75,58	53,52
Aluminium	1 Mhz	6246,91	1292,13	2700	100	0,34	68,45	33,26
	4 Mhz	6231,53	1289,46	2700	100	0,34	68,12	33,11
Acrylglas	1 Mhz	2631,58	297,78	1385	100	0,42	3,94	1,18
	4 Mhz	2693,60	305,64	1385	100	0,42	4,13	1,24

Unsere Werte stimmen mit den Literaturwerten innerhalb der Fehler überein. Die großen Fehler sind durch unsere großzügige Fehlerabschätzung bedingt.

Material	Gerundetes Ergebnis E in [Gpa]	Gerundete Fehler $\Delta E$ in [Gpa]	Literaturwerte
Stahl	181,97	20,89	200 bis 220
Messing	69,61	47,9	98
Aluminium	68,29	33,18	63
Acrylglas	4,04	1,21	3,30

### 3.3 Bestimmung der Lage der Fehlstellen im Acrylglaskörper

In dem zu untersuchenden Acrylglaskörper sind mehrere Bohrungen, deren genaue Position mit Hilfe des Ultraschalls bestimmt werden soll. Dazu wurden die seitlichen Flächen des Körpers mit dem Ultraschallwandler abgefahren. Es wurden sowohl die 1 MHz-Sonde als auch die 4 MHz-Sonde verwendet. Die 4 MHz-Sonde liefert aufgrund ihres besseren Auflösungsvermögens eine höhere Genauigkeit bei der Positionsbestimmung, allerdings können aufgrund der hohen frequenzabhängigen Dämpfung nicht alle Fehlstellen im Acrylglaskörper erreicht werden. Für diese tieferen Bohrungen wurde die 1 MHz-Sonde verwendet. Im A-Bild-Modus kann man nach Einstellung der bereits zuvor bestimmten Schallgeschwindigkeit in Acrylglas die Tiefen der Bohrungen ablesen. Die zurückgelegte Strecke lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$s = \frac{c_L \cdot t}{2} \tag{3}$$

Der Fehler für die zurückgelegte Strecke lässt sich durch folgende Formel berechnen, wobei der Fehler der Zeitmessung mit  $\Delta t = \pm 0,04 \mu s$  angenommen wird:



$$\Delta s = \pm \left\{ \left| \frac{t}{2} \Delta c_L \right| + \left| \frac{c_L}{2} \Delta t \right| \right\} \tag{c}$$

Die Nummerierung der Fehlstellen lässt sich aus folgender Graphik ablesen:

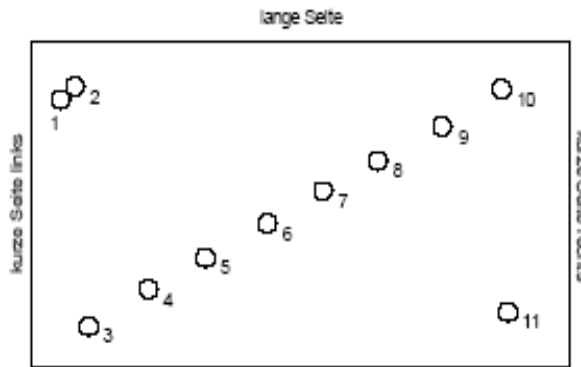


Abbildung 1: Skizzierte Darstellung des Probenkörpers

Da der 4MHz Sensor an manchen Stellen nicht tief genug ins Acrylglas eindringen konnte führten wir die Messungen von verschiedenen Seiten durch, die in der Tabelle mit links und rechts gekennzeichnet wurden.

Fehlstelle	Seite		Sensor	Zeit		Strecke	
	l	r		t in [µs]	s in [mm]	Δs in [mm]	
1	lang		4MHz	46,2	61,4	7,7	
	kurz	l	4MHz	14,0	18,6	2,7	
2	lang		4MHz	44,3	58,9	7,4	
	kurz	l	4MHz	11,7	15,6	2,3	
3	lang		4MHz	14,3	19,0	2,7	
	kurz	l	4MHz	21,0	27,9	3,8	
4	lang		4MHz	20,1	26,7	3,6	
	kurz	l	4MHz	32,6	43,4	5,6	
5	lang		4MHz	25,4	33,8	4,5	
	kurz	l	4MHz	44,2	58,8	7,4	
6	lang		4MHz	30,9	41,1	5,3	
	kurz	l	1MHz	56,9	75,7	9,4	
	kurz	r	1MHz	76,1	101,2	12,3	
7	lang		4MHz	36,9	49,1	6,3	
	kurz	l	1MHz	68,4	91,0	11,1	
	kurz	r	1MHz	60,8	80,9	10,0	
8	lang		4MHz	42,7	56,8	7,2	
	kurz	r	1MHz	46,0	61,2	7,7	
	kurz	r	4MHz	33,2	44,2	5,7	
9	lang		4MHz	48,5	64,5	8,0	
	kurz	r	1MHz	31,6	42,0	5,4	
	kurz	r	4MHz	22,1	29,4	4,0	
10	lang		4MHz	54,4	72,4	9,0	
	kurz	r	1MHz	17,0	22,6	3,2	
	kurz	r	4MHz	11,5	15,3	2,3	
11	lang		4MHz	18,7	24,9	3,4	
	kurz	r	4MHz	8,9	11,8	1,9	

Bei der Tabelle fällt auf, dass einige der Werte nicht passen. Der Abstand von den Fehlstellen ist zu groß. Erklären ließen sich diese Fehlabstände durch unsere Messdurchführung. Wir setzten des öfteren mit den Sonden ab und fuhren mehrmals zu den Stellen, so dass wir wohl manchmal das zu Untersuchende Loch verfehlten und das nächstliegende gemessen hatten.

### **3.4 Aufnahme des Brightness-Bildes**

Um die Lage der Fehlstellen im Acrylglaskörper zweidimensional darzustellen, wurde ein B-Bild jeweils mit dem 4 MHz-Ultraschallwandler und mit dem 1 MHz-Ultraschallwandler aufgenommen. Dazu musste die Messsonde möglichst gleichmäßig und langsam über die Probenoberfläche geführt werden. Die beiden B-Bilder sind in Abbildung (1) bzw. (2) zu sehen. Gut zu erkennen ist das wesentlich bessere Auflösungsvermögen im B-Bild des 4 MHz-Ultraschallwandlers, besonders die Bohrungen mit kleinem Abstand zum Wandler sind gut aufgelöst. Die Fehlstellen mit größerem Abstand sind dagegen aufgrund der hohen frequenzabhängigen Dämpfung nur noch schwach erkennbar. Weiterhin ist im unteren Teil des Bildes das Bodenecho des Acrylglaskörpers als schwache Linie zu sehen, die unterhalb der Fehlstellen unterbrochen ist.

Im Bild des 1 MHz-Ultraschallwandlers sind die Fehlstellen weniger scharf aufgelöst, dafür ist die Echointensität der tieferen Fehlstellen und des Bodenechos wesentlich höher als in der Abbildung (1). Die hellen und dunklen Linien im oberen Teil des Bildes werden durch Übersteuerung des Signals erzeugt.

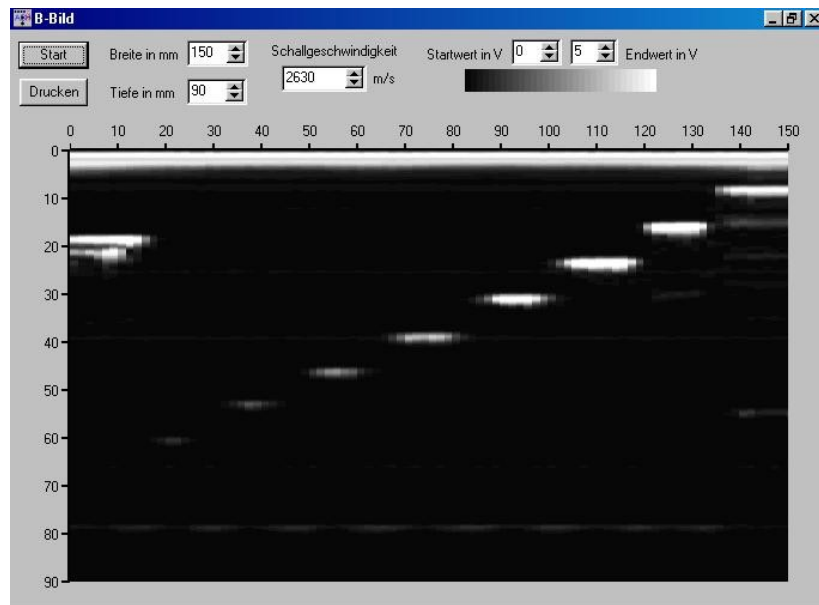


Abb. (1): B-Bild des 4 MHz-Ultraschallwandlers

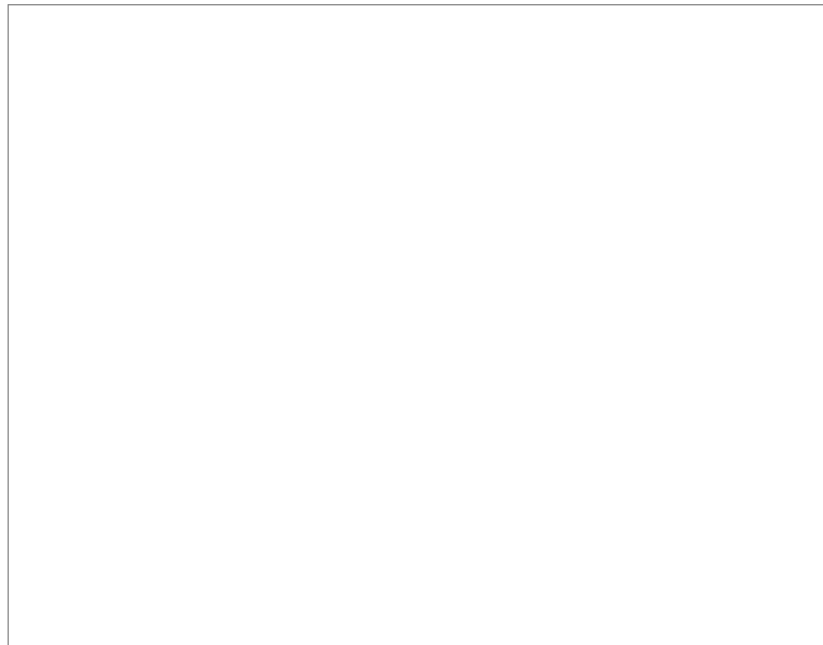


Abb. (2): B-Bild des 1 Mhz-Ultraschallwandlers

Abbildung 1 und 2 zeigen eine Seitenansicht des Probenkörpers mit den Fehlstellen. Die x- und y-Achse sind dabei die Ausmessung der Probe in mm. An den Fehlstellen des Probenkörpers kommt es zur verstärkten Reflexion, so dass wir diese Stellen in den Bildern als helle Flächen sehen können. Die 4 MHz Sonde hat ein deutlich besseres Auslösevermögen. Dies kann man hervorragend an den Bildern erkennen

### 3.5 Eigenfrequenz der Messköpfe

Die Eigenfrequenz der Messköpfe wurde mit Hilfe der Zoomfunktion aus dem Hochfrequenzbild bestimmt, indem der zeitliche Abstand  $t$  zwischen zwei benachbarten Schwingungsmaxima ermittelt wurde. Man erhält die Eigenfrequenz  $f$  der Messköpfe durch die Beziehung

$$f = \frac{1}{t} \quad (3)$$

Wir kamen zu folgenden Ergebnissen:

Sensor	Zeitmessung		Frequenz	
	t in [ $\mu$ s]	$\Delta t$ in [ $\mu$ s]	f in [Mhz]	$\Delta f$ in [Mhz]
1 Mhz	1,02	0,04	0,98	0,04
4 Mhz	0,28	0,04	3,57	0,51

Der Fehler für die Zeitmessung wurde wieder mit  $\Delta t = \pm 0,04 \mu\text{s}$  angenommen.

Für den Fehler der Frequenz wurde folgende Formel verwandt:

$$\Delta f = \pm \left\{ \left| \frac{-1}{t^2} \Delta t \right| \right\} \quad (d)$$

Auf Grund des relativ kleinen Zeitrahmens bei der Messung mit der 4 Mhz Sonde kommt es hierbei zu deutlich größeren Fehlern.

Unsere gemessenen Werte stimmen hierbei mit den tatsächlichen Werten gut überein.

### 3.6 Schalldämpfungskoeffizienten der Materialien

Die Intensität einer Ultraschallwelle nimmt mit zunehmender Entfernung ab, weil Energie durch Absorption im Medium (z.B. Entstehung von Wärme) verloren geht. Der Schwächungskoeffizient  $\mu$  wurde mit der Formel

$$\mu = \frac{1}{x_1 - x_2} \ln \left( \frac{A_2}{A_1} \right) \tag{5}$$

berechnet. Dabei ist  $A_1$  die Amplitude eines Echos und  $x_1$  die Strecke, die der Ultraschall von diesem Echo bis dahin zurückgelegt hat,  $A_2$  ist die Amplitude eines späteren Echos und  $x_2$  die dazugehörige Strecke. Der Faktor  $\frac{1}{2}$  in der Formel (5) ergibt sich aus dem doppelten Weg des Schalls bei der Messung in Reflexion.  $x_1$  und  $x_2$  können aus den Laufzeiten der Echos berechnet werden,  $A_1$  und  $A_2$  werden direkt im A-Bild bestimmt. Um die Werte für  $\mu$  mit Literaturwerten vergleichen zu können, muss folgende Umrechnung berücksichtigt werden:

$$\mu \left[ \frac{1}{\text{cm}} \right] = \frac{\mu \left[ \frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right]}{20 \text{Lg}(e)} = \frac{\mu \left[ \frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right]}{8,686} \tag{6}$$

Der frequenzunabhängige Absorptionskoeffizient ergibt sich aus  $\mu$  durch

$$\mu_0 = \frac{\mu}{f^n} \tag{7}$$

In der folgenden Tabelle sind unsere Werte aufgelistet:

Material	Sensor	Amplituden		Strecke		Dämpfungskoeffizient				Frequenzabhängigkeit		Unabh. Dämpfungs-Koeffizient	
						in [dB/cm]		in [dB/μs]		in [dB/cmMHz]		in [dB/cmMHz]	
						$\mu$	$\Delta\mu$	$\mu$	$\Delta\mu$	n	$\Delta n$	$\mu_0$	$\Delta\mu_0$
Stahl	1 Mhz	1,97	1,22	5,48	10,90	0,044	0,012	0,0073	0,0073	0,765	0,908	0,0449	0,01313
	4 Mhz	0,62	0,41	1,90	3,64	0,119	0,107	0,0650	0,0650	0,765	0,908	0,0449	0,09223
Messing	1 Mhz	3,54	1,87	1,73	3,12	0,230	0,024	0,0328	0,0328	-0,442	0,339	0,2276	0,02536
	4 Mhz	1,76	1,24	1,60	2,95	0,130	0,043	0,0354	0,0354	-0,442	0,339	0,2276	0,17401
Aluminium	1 Mhz	4,45	1,74	2,78	4,82	0,230	0,015	0,0204	0,0204	-2,379	0,625	0,2196	0,01667
	4 Mhz	4,73	4,51	2,74	4,98	0,011	0,008	0,0049	0,0049	-2,379	0,625	0,2196	0,33823
Acrylglas	1 Mhz	3,73	0,60	4,20	8,20	0,228	0,023	0,0199	0,0199	0,295	0,159	0,2297	0,02410
	4 Mhz	5,19	0,38	4,13	8,04	0,334	0,034	0,0297	0,0297	0,295	0,159	0,2297	0,07007
Wasser	1 Mhz	4,76	2,05	4,85	4,99	6,017	0,007	0,0171	0,0171	-0,113	0,002	6,0037	0,00750
	4 Mhz	5,10	1,90	4,70	4,89	5,197	0,008	0,0198	0,0198	-0,113	0,002	6,0037	0,02496

Die Fehler lassen sich aus den folgenden Formeln bestimmen wobei der Fehler für die Amplitude mit  $\Delta A = \pm 0,01 \text{ V}$ , der Fehler für die Strecke  $\Delta x = \pm 0,02 \text{ cm}$  angenommen wurde:

$$\Delta \mu_0 = \pm \left\{ \left| \frac{1}{f^n} \Delta \mu \right| + \left| -\ln(f) \frac{\mu}{f^n} \Delta n \right| \right\} \quad (\text{e})$$

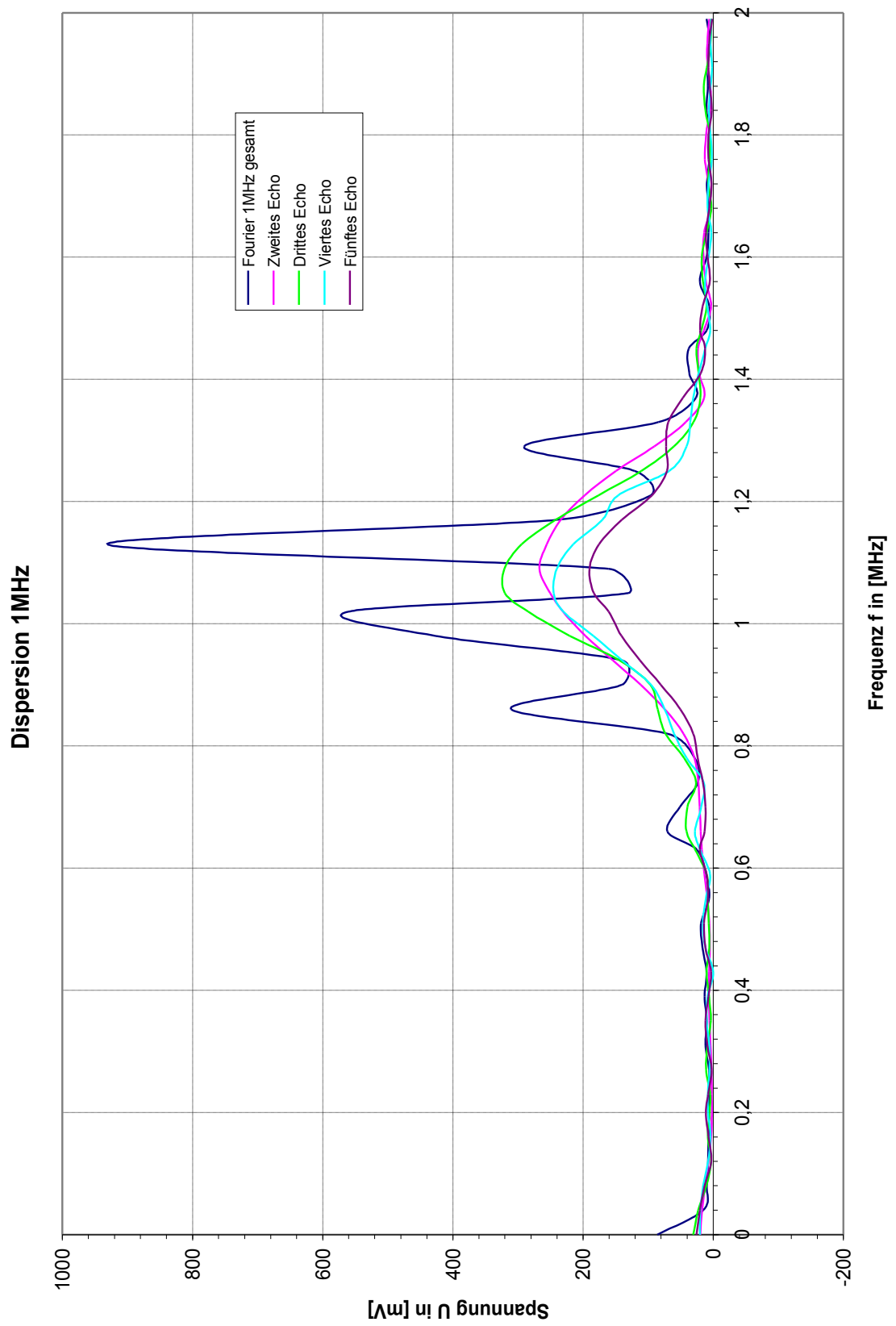
$$\Delta n = \pm \left\{ \left| \frac{1}{(\ln(f_{1\text{MHz}}) - \ln(f_{4\text{MHz}})) \mu_{1\text{MHz}}} \Delta \mu_{1\text{MHz}} \right| + \left| \frac{-1}{(\ln(f_{1\text{MHz}}) - \ln(f_{4\text{MHz}})) \mu_{4\text{MHz}}} \Delta \mu_{4\text{MHz}} \right| \right\} \quad (\text{f})$$

Wir waren mit den Ergebnissen leider nicht ganz zufrieden, da die Messungen bei der 1 MHz und der 4 MHz Sonde stark unterschieden. Bei Aluminium und Stahl insbesondere. Am meisten Probleme hatten wir bei den Messungen mit der 4 MHz Sonde und somit vermuten wir, dass die Messung von der 1 MHz Sonde eher zutreffen.

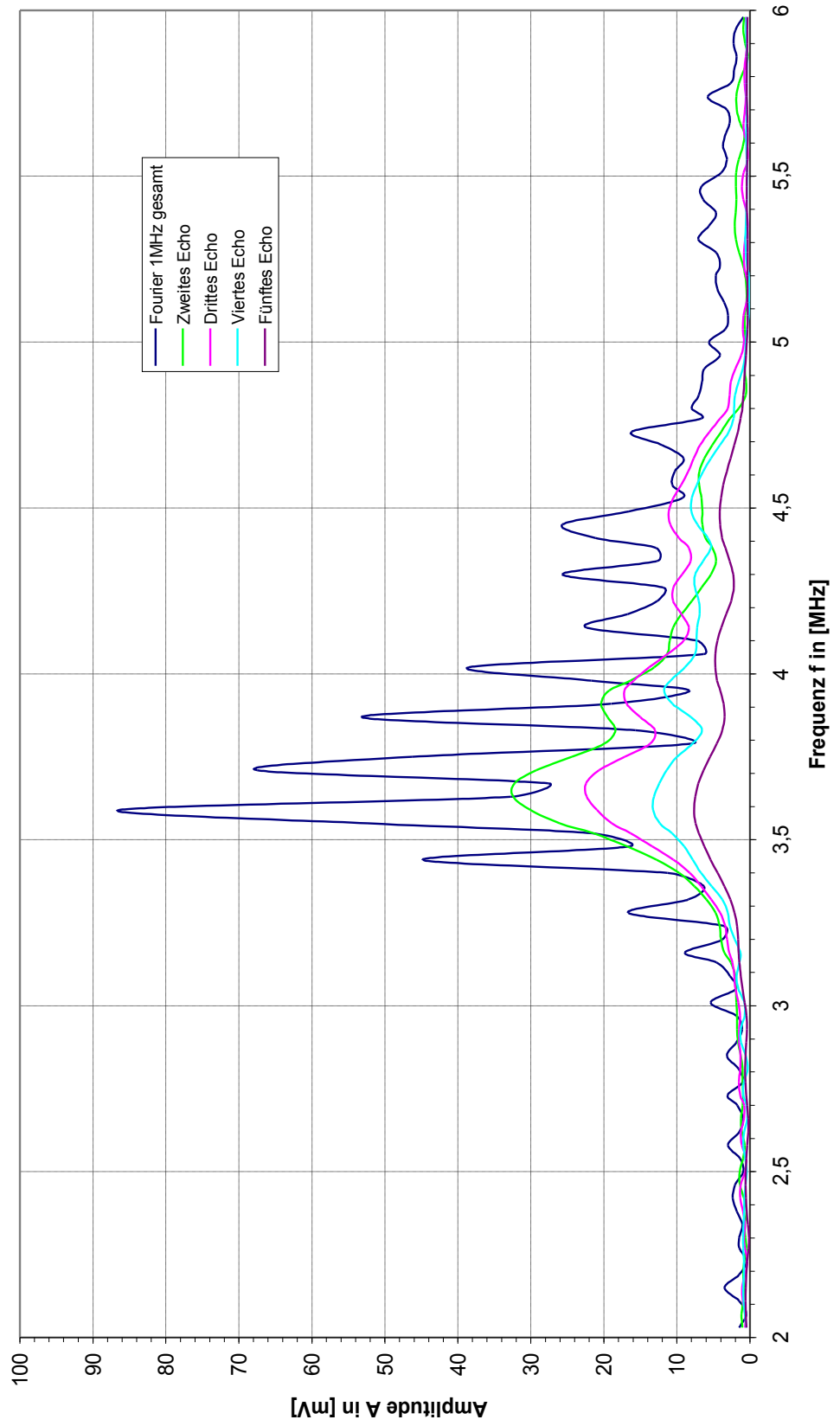
### 3.7 Dispersion der Messfrequenzen

Die Dispersion wurde an einer dünnen Polyacrylplatte untersucht, indem die entstandenen Mehrfachechos mit der im Programm integrierten Fourieranalyse hinsichtlich ihres Frequenzgehaltes analysiert wurden.

Die beiden folgenden Bilder zeigen deutlich, dass mit zunehmender Laufzeit die Mittelfrequenz der Spektren abnimmt.



Dispersion 4MHz

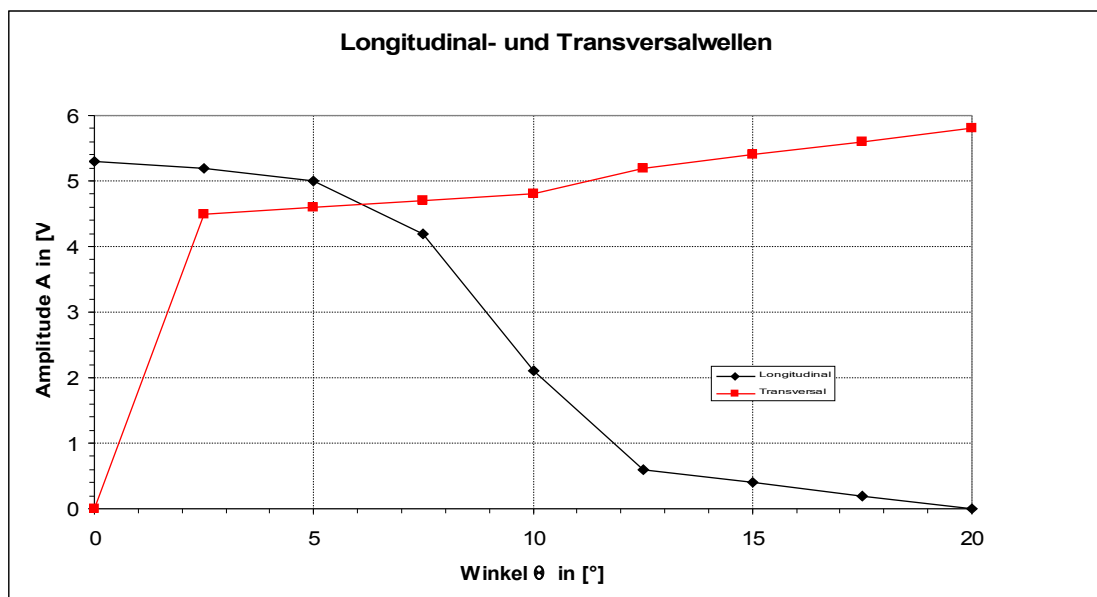




### 3.8 Transmissionsverhalten im Wasserbad

Das Transmissionsverhalten von Ultraschallwellen kann mit einem speziellen Messaufbau untersucht werden:

Zwei Ultraschallwandler werden im Durchschallungsmodus (Sender und Empfänger getrennt) an ein Wasserbecken angekoppelt. Im Becken ist eine definiert drehbare dünne Aluminiumplatte angebracht. Bei geradem Einfall der Ultraschallwelle auf die Aluminiumplatte entsteht im Aluminium eine Longitudinale Schallwelle. Wird die Aluminiumplatte jedoch schräg zum Einfall der Ultraschallwelle verdreht, so entsteht im Festkörper durch Scherung auch eine transversale Ultraschallwelle. In Abhängigkeit vom Einfallswinkel können die Amplituden der durch das Acrylglas transmittierten longitudinalen und transversalen Ultraschallwellen bestimmt werden.



Den Fehler für den gemessenen Winkel und der Amplitude schätzen wir wie folgt ab:

$$\Delta \Theta = \pm 1^\circ \quad \Delta A = \pm 0,1 V$$

Die Schallgeschwindigkeit im Wasser beträgt  $c_w = 1480 \text{ ms}^{-1}$ . Bei  $0^\circ$  (Aluminiumplatte quer zur Schallwelle) sowie bei  $90^\circ$  sind nur longitudinale Anteile vorhanden. Bei unserer Messung erreichten wir bei  $20^\circ$  das Maximum der transversalen Welle. Somit kann mit dem Einfallswinkel und der Amplitude die Geschwindigkeit berechnet werden.

Mittels des Brechungsgesetz lässt sich der einfallende Winkel der Totalreflexion bestimmen.

$$\frac{\sin(\alpha_{\text{ein}})}{\sin(\alpha_{\text{aus}})} = \frac{c_w}{c_L} \quad (9)$$

Da wir die Schallgeschwindigkeit für Aluminium in den vorherigen Aufgaben schon berechnet haben, lässt sich nun die transversale Schallgeschwindigkeit ausrechnen.

$$c_l = 6240 \frac{m}{s} \quad c_t = 3066 \frac{m}{s}$$

Für das Schermodul  $G$  und das Elastizitätsmodul ergibt sich somit:

$$G = c_t^2 \cdot \rho = 2,4 \cdot 10^{10} \frac{N}{m^2} \quad E = c_l^2 \cdot \rho = 10,8 \cdot 10^{10} \frac{N}{m^2}$$

Die Poissonzahl lässt sich aus folgender Formel errechnen:

$$\frac{c_l}{c_t} = \sqrt{\frac{2(1-\nu_p)}{1-2\nu_p}} \quad \nu_p = 0,358$$

Vergleicht man unsere errechneten Werte mit den Literaturwerten, so stimmen wir außer mit dem E-Modul, welches einen größeren Fehler aufweist, mit allen überein.

## 4 Fazit

Die Schallgeschwindigkeiten in den verschiedenen Medien konnten wir gut messen. Auch die Fehlstellen in einem Acrylkörper konnten wir mit dem B-Bild-Verfahren, sowie mit dem A-Bild Verfahren bestimmen. Vor allem bei diesem Versuchsteil zeigten sich die Vor- und Nachteile der beiden Sonden auf. Die 4 MHz Sonde liefert Bilder mit hoher Auflösung, hat jedoch nur eine geringe Eindring-Tiefe. Die 1 MHz Sonde dringt tief in die Probe ein, dafür leidet das Auflösungsvermögen. Nicht zu unserer Zufriedenheit sind die Werte der Schalldämpfungskoeffizienten geworden.

## 5 Literaturangaben

DEMTRÖDER, Wolfgang: Experimentalphysik 1, Mechanik und Wärme. 4. neu bearb. u. aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York:Springer, 2005 (= Springer Lehrbuch)

KUTTRUFF, HEINRICH: Physik und Technik des Ultraschalls. Stuttgart: Hirzel, 1988

MENSCHÉDE, DIETER: Gerthsen Physik. 22.Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2003 (= Springer Lehrbuch)

STÖCKER, HORST: Taschenbuch der Physik, Formeln, Tabellen, Übersichten. Nachdr. der 5. korr. Aufl. Frankfurt a. M.: Harri Deutsch, 2005