

Fortgeschrittenenpraktikum



Protokoll

V35 - Ultraschall

Datum: 18./25.06.2008
Betreuer: Steffen Weinhold
Frau Wagner
Protokollanten: Martin Dubau
Patrick Matthes
Steffen Weinhold

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Physikalische Grundlagen	3
2.1	Wellengleichung	3
2.2	Wellenarten	4
2.2.1	Longitudinalwellen	4
2.2.2	Transversalwellen	5
2.2.3	Rayleighwellen (bzw. Oberflächenwellen)	6
2.3	Schallschwächung	6
2.4	Verhalten an Grenzflächen	6
2.5	Auflösungsvermögen	8
2.6	Darstellungsmethoden	9
2.6.1	A-Mode (Amplitudenmodulation)	9
2.6.2	B-Mode (englisch: brightness modulation)	9
2.6.3	M-Mode (auch TM, für englisch (time) motion)	9
3	Versuchsdurchführung	10
4	Auswertung	11
4.1	Wellencharakter des Ultraschalls	11
4.2	Reichweite in Polyacryl	11
4.3	Bestimmung der longitudinalen und transversalen Schallgeschwindigkeit	12
4.4	Bestimmung der Schallschwächungskoeffizienten	14
4.5	Spektrale Untersuchungen	14
4.6	Untersuchung des Auflösungsvermögens	19
4.7	Bestimmung von Lochdurchmessern in Polyacryl	19
4.8	Fehlstellendiagnostik mittels B-Bild	20
4.9	Untersuchung von bewegten Grenzschichten	21
4.10	Bestimmung von Ristiefen mittels TOFD	21
4.11	Untersuchung der Blackbox	23
4.12	Rayleigh-Wellen	24
5	Zusammenfassung	30

1 Einleitung

Bei Ultraschall handelt es sich um Schallwellen mit Frequenzen von $\nu = 16$ kHz (obere Grenze des Hörbereichs des Menschen) und mehr [1]. Infolge der kleinen Wellenlänge können schmale Bündel von Ultraschallwellen ausgesandt und von kleinen Objekten reflektiert werden. Die zwei bekanntesten Vertreter aus der Natur, welche sich diesen Effekt zunutze machen, wären der Delphin und die Fledermaus. Letztgenannte kann dabei Frequenzen bis zu 120 kHz emittieren als auch empfangen, was sie unter anderem dazu befähigt, kleine Beutetiere (Nachtfalter u.ä.) zu lokalisieren. Ortungssysteme, welche auf dem Schallecho beruhen, werden als Sonarnavigationsgeräte bezeichnet und haben vor allem in der Schifffahrt große Bedeutung: z.B. dienen sie der Navigation, der Suche nach Fischschwärmen, dem Auffinden von Wracks usw. In der Medizin werden Ultraschallwellen für diagnostische Zwecke benutzt, wobei anhand der reflektierenden bzw. durchgehenden Welle Bilder (auch dreidimensional - sogenannte Sonogramme) von Organen und Gewebeteilen konstruiert werden können. Der große Vorteil von Ultraschalluntersuchungen ist, dass es sich dabei um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren handelt und sie daher auch in der Materialprüfung durchgeführt werden. Die gebräuchlichen Ultraschallprüfköpfe arbeiten heute nahezu ausschließlich nach dem piezoelektrischen Effekt. Ein Impulsgenerator löst im Sender in schneller Folge kurze elektrische Impulse aus, die im Prüfkopf Schallimpulse erzeugen. Die aus dem „Werkstoff“ zurückkommenden Echos werden vom gleichen Prüfkopf wieder in elektrische Signale zurückverwandelt. Die Auswertung erfolgt mittels Oszillograf oder Rechner.

2 Physikalische Grundlagen

Physikalisch gesehen ist Schall eine Welle, welchen man anhand des Frequenzbereichs in vier Arten einteilen kann (siehe folgende Abbildung). Dabei schließt sich an den Bereich

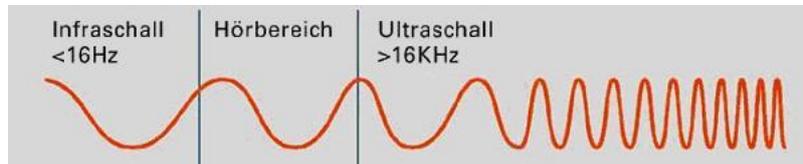


Abbildung 1: Einteilung von Schall nach der Frequenz

des Ultraschalls mit Frequenzen $\nu > 10$ MHz der Hyperschall an [1], was hier nicht mit dargestellt ist, da jene Wellen nur noch bedingt ausbreitungsfähig sind (vgl. 2.3). Schall stellt die Ausbreitung von kleinsten Druck- bzw. Dichteschwankungen in einem elastischen Medium dar, ist daher an einen übertragenden Stoff gebunden und wird von diesem auch entscheidend beeinflusst. Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen (wie bspw. Licht) ist deswegen eine Ausbreitung im Vakuum nicht möglich.

Schallwellen können durch freie oder erzwungene Schwingungen fester Körper erzeugt werden, die ihre Schwingungsenergie an die Umgebung abgeben. Für Ultraschall haben sich dazu piezoelektrische Keramiken (elektroakustische Wandler: sie wandeln die elektrische Wechselspannung in mechanische Schwingungen um) bewährt. Das Prinzip ist in Abbildung 2 dargestellt. Legt man demnach an Elektroden auf beiden Seiten der Scheibe ein elektrisches Hochfrequenzfeld an, so erzeugt dieses mechanische Dicken-schwingungen des Piezoelementes, wobei die Schwingungsamplitude im Resonanzfall maximal wird. Also genau dann, wenn sich eine stehende Ultraschallwelle im schwingenden System ausbilden kann. Das heißt, dass die Frequenz der emittierten Schallwelle hauptsächlich von der Dicke d der Piezoscheibe abhängig ist.

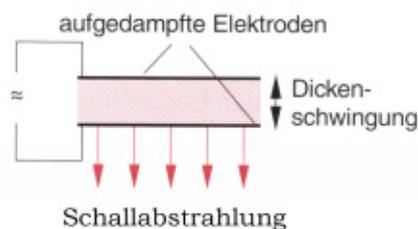


Abbildung 2: Prinzip eines piezoelektrischen Schallerzeugers [1]

2.1 Wellengleichung

Eine physikalische Größe (z.B. der Druck) möge an einem Ort z zur Zeit t eine Störung ξ (entspricht der Abweichung vom Gleichgewichtszustand) erleiden. Infolge der Kopplung

mit den Nachbargebieten breitet sich diese Störung im Laufe der Zeit im Raum aus. Diesen Ausbreitungsvorgang wollen wir nun am Beispiel der eindimensionalen Welle in z -Richtung näher betrachten. Wenn die Störung ξ zur Zeit $t = 0$ am Ort $z = z_0$ auftritt, wird sie bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit v zum späteren Zeitpunkt t_1 an der Stelle $z_1 = z_0 + v \cdot t_1$ sein. Wenn wir jetzt annehmen, dass sich die Form der Auslenkung $\xi(z)$ bei der Ausbreitung in z -Richtung nicht ändert, so bleibt die Funktion $\xi(z, t)$ für alle Werte $z = v \cdot t + z_0$ konstant. Wir können die Wellenfunktion daher als Funktion des Argumentes $z - vt$ ansehen und sie in allgemeiner Form als $\xi(z, t) = f(z - vt)$ schreiben. Hängt diese Funktion nicht von x oder y ab, so ist die Größe ξ für alle Punkte einer Ebene $z = \text{const}$ zu einem gegebenen Zeitpunkt $t = t_0$ gleich groß. Man nennt eine solche Welle eine ebene Welle, welche sich mit der Phasengeschwindigkeit $v = v_{ph}$ in positive z -Richtung ausbreitet (bei Ausbreitung in negative z -Richtung wird die Welle durch eine Funktion $f(z + vt)$ beschrieben). Differenziert man nun die Wellenfunktion $\xi(x, t)$ zweimal partiell nach z bzw. t , so ergibt sich mit $u = z - vt$ und $\xi(x, t) = f(u)$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} &= \frac{d^2 f}{du^2} \\ \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} &= \frac{d^2 f}{du^2} \cdot v^2.\end{aligned}\tag{1}$$

Der Vergleich beider Gleichungen liefert die Wellengleichung einer sich in z -Richtung mit der Phasengeschwindigkeit v ausbreitenden Welle $\xi(z, t)$:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\tag{2}$$

Alle Lösungen dieser Gleichung ergeben mögliche Wellen (auch nichtperiodische) welche durch spezielle Randbedingungen selektiert werden.

2.2 Wellenarten

Die beiden wesentlichen Formen wären die longitudinale und die transversale Welle, daneben existieren aber bspw. noch die Torsionswelle, Biegewelle und die auch in diesem Experiment untersuchte Rayleigh- oder auch Oberflächenwelle.

2.2.1 Longitudinalwellen

Bei dieser Wellenart erfolgt die Auslenkung in Ausbreitungsrichtung, es handelt sich also um sogenannte Dichtewellen. Als Beispiel betrachten wir eine Verdichtungswelle, welche durch einen langen Zylinder mit Querschnitt A läuft, an dessen einem Ende periodische Druckwellen erzeugt werden. Die Teilchen in einer Fläche $z = \text{const}$ haben die Schwingungsamplitude ξ und die in einer um dz entfernten Fläche die Schwingungsamplitude $\xi + d\xi = \xi + \frac{\partial \xi}{\partial z} dz$. Durch die Schwingung ändert sich die Dicke dz eines Volumenelementes $dV = A \cdot dz$, infolge der dabei nach dem Hookeschen Gesetz auftretenden elastischen

Spannung treten rücktreibende Kräfte $F = \sigma A$ auf und diese bei einer Längenänderung um $(\partial\xi/\partial z)dz$ erzeugte mechanische Spannung ist nach dem Hookeschen Gesetz

$$\sigma = E \frac{\partial\xi}{\partial z} \quad \text{E... Elastizitätsmodul.}$$

Die am rechten Ende des Volumenelementes:

$$\sigma + d\sigma = \sigma + E \frac{\partial^2\xi}{\partial z^2} dz.$$

Auf das betrachtete Volumenelement wirkt jetzt also die Nettokraft $dF = A \cdot d\sigma = A \cdot E \frac{\partial^2\xi}{\partial z^2} dz$. Diese führt zu einer Beschleunigung $\partial^2\xi/\partial t^2$ des Massenelementes dm , welche sich aus der Newtonschen Bewegungsgleichung

$$dF = dm \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} = \rho \cdot A \cdot dz \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}$$

ergibt. Aus den beiden letzten Formeln ergibt sich nun die Wellengleichung (ρ ... Dichte des Zylindermaterials)

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2\xi}{\partial z^2} \quad (3)$$

und durch den Vergleich mit Gleichung (2) die Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (4)$$

wobei μ die Poissonzahl darstellt, also die bei longitudinaler Verzerrung auftretende Querkontraktion berücksichtigt. Aus der eben genannten Gleichung erkennt man, dass man zum einen bei bekanntem E-Modul die Schallgeschwindigkeit des untersuchten Stoffes ermitteln bzw. andererseits das Ultraschall-Impulsecho-Verfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmodules benutzen kann, wobei der Vorteil dieser Methode darin besteht, dass sie zerstörungsfrei ist.

2.2.2 Transversalwellen

Bei Transversalwellen erfolgt die Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle, die Kopplung benachbarter, schwingender Schichten erfolgt dabei durch die Scherkraft. Da jedoch in Flüssigkeiten und Gasen keine Scherkräfte auftreten können, sind transversale Wellen (oder auch Scherwellen) nur in Festkörpern möglich. Die Wellengeschwindigkeit c_t lässt sich völlig analog zu c_l herleiten, wobei sie direkt vom Scher- bzw. Torsionsmodul G abhängt. Für die Phasengeschwindigkeit einer Scherwelle erhält man nun für kleine Auslenkungen:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}. \quad (5)$$

An dieser Gleichung erkennt man, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Longitudinalwelle größer ist als die einer Transversalwelle.

2.2.3 Rayleighwellen (bzw. Oberflächenwellen)

Rayleighwellen gehören zur Gruppe der Grenzflächenwellen, deren Ausbreitung entlang von Grenzflächen erfolgt. Sie existiert dabei an der freien Grenzfläche eines Festkörpers und stellt eine Kombination von Longitudinal- und Transversalwellen dar, was bedeutet, dass jeder Oberflächenpunkt ellipsenförmige Bahnen beschreibt. Die Eindringtiefe von Rayleighwellen liegt dabei in der Größenordnung der Wellenlänge λ des eingeleiteten Schalles. Anwendung finden sie in der Werkstoffprüfung zum Auffinden von Oberflächenfehlern.

2.3 Schallschwächung

Durchstrahlt eine Schallwelle Materie, verliert sie Energie, sie wird also abgeschwächt. Das kann folgende Ursachen haben:

- reversible oder irreversible Umwandlung von Schallenergie in andere Energieformen (bspw. Wärme)
- Streuung an Inhomogenitäten (Einschlüsse verschiedener Stoffe u.ä.)
- Reflexion oder Brechung an Grenzflächen

Der Zusammenhang zwischen der Intensität und der Dicke des durchstrahlten Stoffes ist dabei:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}. \quad (6)$$

I_0 kennzeichnet die Intensität der eingestrahnten Ultraschallwelle und μ ist ein material-spezifischer Schwächungskoeffizient, welcher zudem von der Frequenz der Welle abhängig ist. Gründe für die Frequenzabhängigkeit wären die innere Reibung; der auftretende Wärmeaustausch zwischen durch Kompression erwärmten und durch Dilatation gekühlten Gebieten, was zur Folge hat, dass hohe Frequenzen eben stärker absorbiert werden als tiefe, da der Austausch umso schneller erfolgen muss, je öfter die Dichteschwankungen auftreten; und in mehratomigen Gasen kommt noch die Relaxation des thermischen Gleichgewichtes dazu, was durch den Energieübertrag auf die vorhandenen Freiheitsgrade bestimmt wird. Dieser wird auch umso geringer, je höher die Frequenz des Schalles ist. Zusammenfassend wächst also die Absorption von Schallwellen mit steigender Frequenz, wobei die sogenannte Debye-Frequenz die Grenzfrequenz für elastische Festkörperschwingungen angibt, nach der Wellenlängen kleiner als der doppelte Atomabstand eben nicht mehr übertragen werden können.

2.4 Verhalten an Grenzflächen

Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche zweier Medien, in denen sie eine unterschiedliche Phasengeschwindigkeit hat, so wird ein Teil der Welle an dieser Fläche reflektiert und

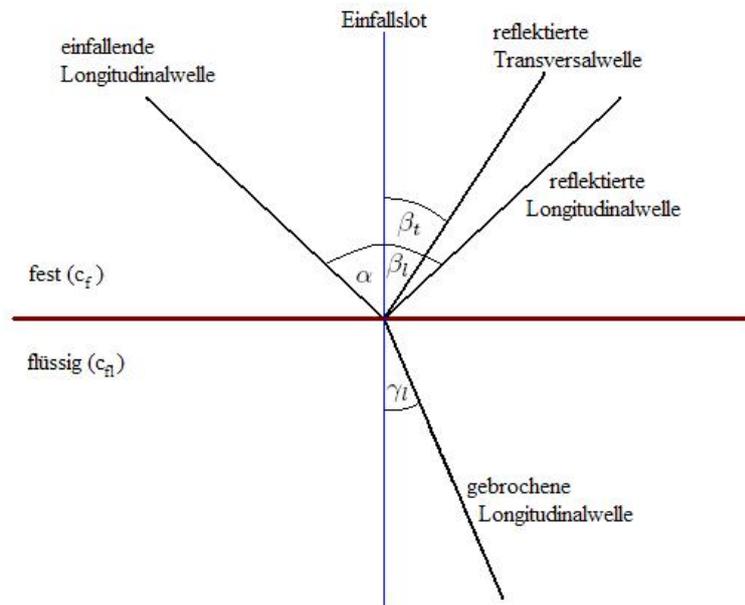


Abbildung 3: Beispiel für das Verhalten an einer Grenzfläche

ein Teil tritt unter Änderung der Ausbreitungsrichtung in das zweite Medium ein (Brechung). Dabei kommt es jedoch durch die verschiedenen Wellenarten zu einer weiteren Aufspaltung, was an folgendem Beispiel erläutert werden soll (vgl. Abb. 3). Hier trifft eine ebene longitudinale Welle unter einem Winkel α auf die Grenzfläche zum flüssigen Medium, dabei entstehen zwei reflektierte Wellen, eine longitudinale unter $\beta_l = \alpha$ und eine transversale unter dem Winkel $\beta_t < \beta_l$, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit transversaler Wellen, wie eben gezeigt, geringer ist als die longitudinaler. In der Flüssigkeit breitet sich zudem eine gebrochene Welle unter dem Winkel γ aus, diese schwingt in Ausbreitungsrichtung, da es in Flüssigkeiten keine Scherwellen geben kann. Der Zusammenhang zwischen den Reflektions- bzw. Brechungswinkeln und den Phasengeschwindigkeiten der Wellen ist gegeben durch das Snellius'sche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{l, fest}} = \frac{\sin \beta_l}{c_{l, fest}} = \frac{\sin \beta_t}{c_{t, fest}} = \frac{\sin \gamma}{c_{l, flüssig}}. \quad (7)$$

Würde die Schallwelle jedoch nicht in eine Flüssigkeit, sondern wieder in einen Festkörper eintreten, so gäbe es auch 2 gebrochene Strahlen, da es in Feststoffen ja auch transversale Wellen gibt.

2.5 Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen bei einer Ultraschallmessung unterscheidet man in Richtung der Strahlachse (axial) und senkrecht dazu (lateral). Während das laterale Auflösungsvermögen im Wesentlichen vom Durchmesser D bzw. der Größe des Schallkopfes abhängt, wird das axiale durch die verwendete Wellenlänge bestimmt. Sie genügen folgenden Gleichungen:

$$b \cong \frac{D}{3} \quad \text{lateral}$$

$$d \cong \frac{\lambda}{2} \quad \text{axial.}$$

Dabei ist b die Breite, bei der die Intensität beidseitig vom Maximum eines untersuchten punktförmigen Objektes um 6 dB gesunken ist und d bezeichnet denjenigen Abstand in Strahlrichtung bei dem die Bedingung für die Unterscheidung zweier gleichstarker Signalpulse erfüllt wird, nämlich genau dann, wenn sie wenigstens um ihre Halbwertsbreite getrennt sind (vgl. Abb. 4). Typische Werte für die axiale Ortsauflösung sind je nach Frequenz: $d = 0,8 \text{ mm}$ (2 MHz) bis $d = 0,15 \text{ mm}$ (15 MHz) [3]. Demnach nimmt das axiale Auflösungsvermögen mit steigender Frequenz zu, was jedoch durch die verminderte Eindringtiefe der Schallwellen (vgl. Kapitel 2.3) nicht beliebig weit gesteigert werden kann.

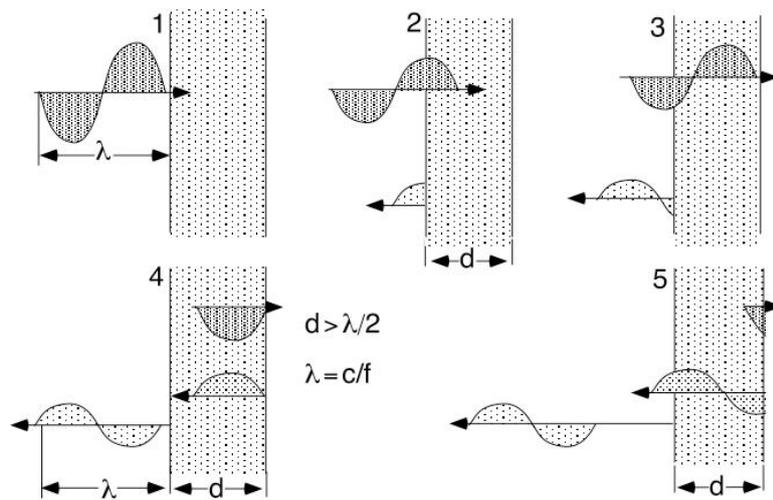


Abbildung 4: Axiales Auflösungsvermögen (stark vereinfacht) [2]

2.6 Darstellungsmethoden

2.6.1 A-Mode (Amplitudenmodulation)

Bei dieser Art der Darstellung wird, wie der Name bereits vermuten lässt, die Amplitude des von der Sonde empfangenen Echos über der Laufzeit dieses Pulses aufgetragen. Bei Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle im untersuchten Medium kann die Amplitude auch direkt in Abhängigkeit der Tiefe der Störstelle (oder allgemein des Auslösers der Reflexion) dargestellt werden. Die Höhe der Pulse ist dabei vom Reflexionsvermögen der jeweiligen Grenzfläche abhängig und bei hinreichend kleinen Frequenzen, bzw. kleinen Prüfkörpern erhält man auch Reflexionen von der Rückseite der Probe. Das Verfahren gibt also eine eindimensionale Darstellung der untersuchten Struktur.

2.6.2 B-Mode (englisch: brightness modulation)

Dieses Verfahren ergibt Schnittbilder in Strahlrichtung. Die reflektierten Pulse werden zur Helligkeitssteuerung benutzt, wobei die Intensität dieser in Grauwerte oder auch Farben umgesetzt wird. Durch Bewegung des Schallkopfes über die Probe werden einzelne Schnittbilder aufgenommen, gespeichert und bei Beenden der Aufnahme als zweidimensionales Bild zusammengesetzt.

Der Vorteil des A-Bild-Verfahrens ist seine größere Geschwindigkeit, die es erlaubt, auch Bewegungsvorgänge in Echtzeit zu verfolgen, der des B-Bild-Verfahrens seine zwei- bis dreidimensionale Darstellung, die eine bessere Vorstellung der räumlichen Struktur der untersuchten Stelle ermöglicht.

2.6.3 M-Mode (auch TM, für englisch (time) motion)

Bei diesem Modus handelt es sich quasi um eine Mischung aus A- und B-Mode. Ein Strahl wird bei einer hohen Impulswiederholungsfrequenz ($1000-5000 \text{ s}^{-1}$) eingesetzt und die Amplitude des Echos auf der vertikalen Achse dargestellt. Die von den hintereinander emittierten Impulsen erzeugten Echozüge sind auf der horizontalen Achse gegeneinander verschoben. Diese bildet also die Zeitachse. Die Intensität wird wieder in Graustufen bzw. Farben umgesetzt. Die zeitliche Auflösung dieses Verfahrens ist durch die maximale Wiederholrate der Schallimpulse begrenzt. Die Hauptanwendung dieser Methode liegt in der Kardiologie, wo Bewegungen einzelner Herzmuskeln oder -klappen untersucht werden.

3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde an einem Arbeitsplatz durchgeführt, welcher vergleichbar mit dem in folgender Abbildung ist. Dazu gehörten das „GAMPT-Scan“ - das eigentliche Grund-

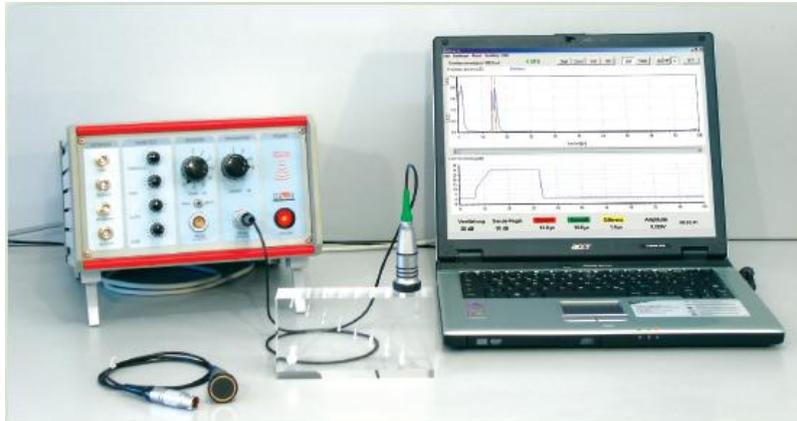


Abbildung 5: Versuchsaufbau [4]

gerät - an welches der Computer zur Auswertung und die verschiedenen Ultraschallsonden (1, 2 und 4 MHz) angeschlossen werden konnten; sowie weiterhin verschiedene Probekörper. Für den Betrieb im Transmissionsmodus war es möglich zwei Sonden gleichzeitig an dieses Grundgerät anzuschließen (bspw. für die Ermittlung der transversalen und longitudinalen Schallgeschwindigkeiten), meist wurde aber mit nur einer Sonde im Reflexionsmodus gearbeitet - je nach Aufgabenstellung. Bei allen Aufnahmen war stets darauf zu achten, dass zwischen Ultraschallsonde und Probekörper ein ausreichender Gleitfilm (Ultraschallgel der Firma SONOGEL) vorhanden und die Sonde fest und eben angedrückt war, um einen idealen Schallübertrag zu gewährleisten. Die Auswertung erfolgte anhand der Diagramme auf dem Bildschirm, wobei die verwendete Software durch die vielseitigen Möglichkeiten und einfache Bedienung sehr hilfreich war. Das GAMPT-Scan beinhaltete weiterhin eine laufzeitabhängige Verstärkung (LAV), welche über die vier schwarzen übereinander angeordneten Rädchen eingestellt werden konnte und diente im Wesentlichen dazu, Verluste der Schallschwächung auszugleichen. Visualisiert wurde diese Verstärkung im unteren Diagramm auf dem Bildschirm.

In den meisten Versuchsteilen fungierte die Sonde zum einen als Schallgeber, zugleich aber auch als Detektor. Die Schallerzeugung und -detektion erfolgte über den Piezoeffekt (vgl. Abschn. 2). Die zu detektierende Schallwelle erzeugte entsprechend ihrer Intensität ein Spannungssignal in der Sonde, das unmittelbar gemessen werden konnte.

4 Auswertung

4.1 Wellencharakter des Ultraschalls

Dieser Versuchsteil diente im Wesentlichen zum Kennenlernen der in dem gesamten Versuch genutzten Software. Es wurde ein zylinderförmiger Probekörper mit einer Schallwelle beschallt und die Reflexe im Amplituden- und Hochfrequenz-Mode aufgenommen. Das Ergebnis zeigt Abb. 6. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit v_s in dem durchschall-

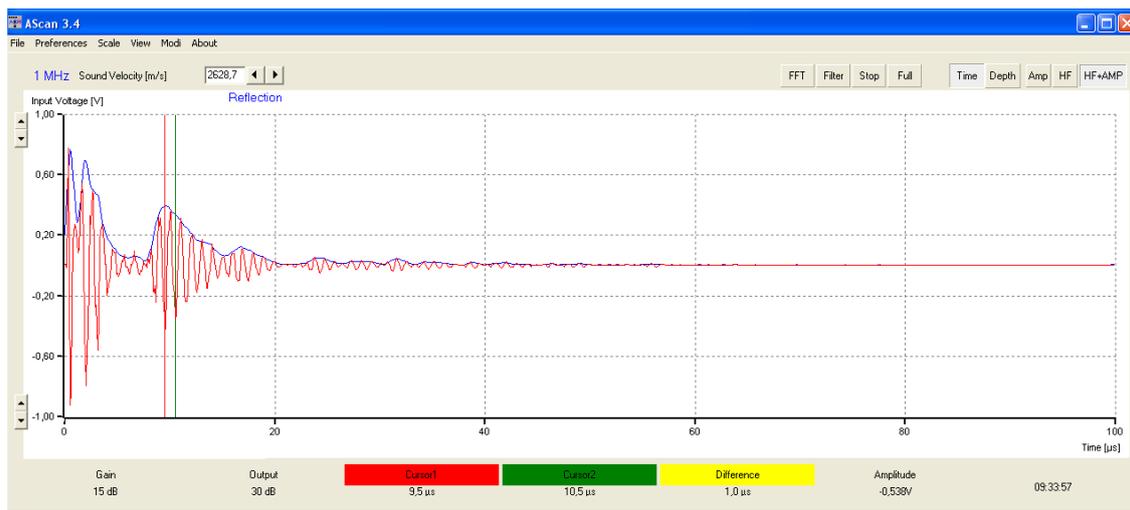


Abbildung 6: Zum Wellencharakter des Ultraschalls: blau - Amplituden-Mode; rot - Hochfrequenz-Mode

ten Medium kann aus der Laufzeit t des Ultraschalls, d.h. der Zeit, nach der der erste Reflexionspeak auftritt, die Eindringtiefe s aus folgender Formel bestimmt werden:

$$s = \frac{v_s \cdot t}{2} \quad (8)$$

Dabei ist zu beachten, dass der Weg s zweimal in der gemessenen Zeit t durchlaufen wird (hinlaufende und reflektierte Welle). Mit dem Computerprogramm war es deshalb möglich, sofort die Eindringtiefe ausgeben zu lassen.

4.2 Reichweite in Polyacryl

Für diesen Versuchsteil standen drei Zylinder aus Polyacryl mit verschiedenen Längen (4 cm, 8 cm, 21 cm) zur Verfügung. Darüber hinaus wurden verschiedene Kombinationen aus den vier Körpern untersucht. Es wurde festgestellt, dass ab einer bestimmten Gesamtlänge keine Reflexionen mehr zu beobachten sind. Diese „Reichweite“ ist abhängig von der Frequenz der Ultraschallwelle. Tabelle 1 fasst die gewonnenen experimentellen Ergebnisse zusammen. Man sieht, dass mit zunehmender Frequenz die Reichweite des

Tabelle 1: Zur Bestimmung der Reichweite des Ultraschalls in Polyacryl für drei verschiedene Frequenzen

Frequenz des Ultraschalls in MHz	1	2	4
Reichweite in cm	≤ 21 cm	≤ 13 cm	≤ 5 cm

Ultraschalls sehr stark abnimmt. Man muss daher annehmen, dass die Wechselwirkung des Schalls mit dem Material bei steigender Frequenz zunimmt.

4.3 Bestimmung der longitudinalen und transversalen Schallgeschwindigkeit

Hierfür standen quaderförmige Proben aus Polacryl, PVC und Aluminium zur Verfügung. Diese Proben waren auf einem Reiter befestigt und konnten zur Variation des Einfallswinkels der Schallwelle um eine Achse gedreht werden. Die Proben wurden in Wasser getaucht und mittels zweier gleichartiger Sonden (Emission und Detektion des Ultraschalls) konnten die Untersuchungen durchgeführt werden. Die Berechnung der longitudinalen Schallgeschwindigkeit c_l und der transversalen c_t erfolgte nach den folgenden Beziehungen:

$$c_l \text{ bzw. } c_t = \frac{1}{\sin \Phi_1} c_F$$

$$c_t = \frac{\sqrt{1/2}}{\sin \Phi_2} c_F$$

Dabei bezeichnet c_F die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit, d.h. in diesem Fall von Wasser ($c_F = 1480 \text{ ms}^{-1}$). Die Größe Φ_1 bezeichnet denjenigen Winkel, bei dem die longitudinale bzw. die transversale Welle erstmals totalreflektiert wird und Φ_2 den Winkel, bei dem die transversale Welle am besten durch das Material hindurchgeht (Maximum der Amplitude). Am Beispiel des Polyacryl soll die Rechnung exemplarisch durchgeführt werden, wobei die beiden Winkel unmittelbar aus den erhaltenen Messwerten gewonnen wurden:

$$c_l = \frac{1}{\sin 37.5^\circ} \cdot 1480 \text{ ms}^{-1}$$

$$= \underline{\underline{2431 \text{ ms}^{-1}}}$$

$$c_t^{\text{Totalrefl.}} = \frac{1}{\sin 85^\circ} \cdot 1480 \text{ ms}^{-1}$$

$$= \underline{\underline{1486 \text{ ms}^{-1}}}$$

$$c_t^{\text{Max}} = \frac{\sqrt{1/2}}{\sin 42.5^\circ} \cdot 1480 \text{ ms}^{-1}$$

$$= \underline{\underline{1549 \text{ ms}^{-1}}}$$

Für Aluminium und PVC wurden die Rechnungen analog durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengefasst. Bei der Bestimmung der Werte für die transversale

Tabelle 2: Zur Bestimmung der longitudinalen und transversalen Schallgeschwindigkeiten

Material	Polyacryl	Aluminium	Polyvenylchlorid (PVC)
Φ_1 in $^\circ$	37.5	15	47.5
c_l in ms^{-1}	2431	5718	2007
Φ_1 in $^\circ$	85	37.5	85
$c_t^{\text{Totalrefl.}}$ in ms^{-1}	1486	2431	1486
Φ_2 in $^\circ$	42.5	17.5	55
$c_t^{\text{Max.}}$ in ms^{-1}	1549	3480	1276

Schallgeschwindigkeit aus dem Winkel der Totalreflexion sowie dem Winkel maximaler Transmission fallen doch beträchtliche Unterschiede auf. Eine Ursache hierfür könnte beispielsweise die Dämpfung der transmittierten Welle sein. Ferner kann die Geometrie des Körpers eine Rolle gespielt haben, da diese Einfluss auf den Schallverlauf der transmittierten Welle hat. Daher sollte der Wert $c_t^{\text{Totalrefl.}}$ als vertrauenswürdiger eingestuft werden.

Die Kenntnis der longitudinalen und transversalen Schallgeschwindigkeit kann zur Berechnung der elastischen Konstanten genutzt werden. Dabei gelten folgende Beziehungen:

$$\mu = \frac{\left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 - 1\right)}$$

$$G = c_t^2 \varrho$$

$$E = \frac{c_l^2 \varrho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}$$

Hierbei bezeichnet μ die Poissonzahl; E ist das Elastizitätsmodul und G das Schermodul; ϱ ist die Dichte des Materials. Die somit bestimmten Werte für die elastischen Konstanten sind in Tab. 3 zusammengestellt¹. Beim Vergleich der experimentell bestimmten Werte mit Literaturwerten stellt man eine recht große Abweichung fest. Bei Aluminium liegt die Hauptursache darin, dass es sich entsprechend der Angaben des Herstellers nicht um reines Aluminium, sondern um eine Legierung handelt. Darüber hinaus könnten Fehler bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten aufgetreten sein, da die Probe in Wasser getaucht wurde und dieses Wasser sich in einer Kunststoffwanne befand, die zu einer Schwächung des Schalls geführt haben könnte. Die Schallschwächung im Wasser selbst sollte aufgrund des kleinen Laufweges und des kleinen Schallschwächungskoeffizienten für Wasser als vernachlässigbar angesehen werden.

¹Bei der Berechnung wurde die aus der Totalreflexion ermittelte transversale Schallgeschwindigkeit genutzt

Tabelle 3: Experimentell bestimmte elastische Konstanten und deren Literaturwerte (aus [4]; für PVC konnten keine Literaturwerte gefunden werden)

Material	Polyacryl	Aluminium	PVC
μ	0.2	0.39	0.1
$\mu_{\text{Literatur}}$	0.3	0.33	-
G in MPa	2649	15956	2870
$G_{\text{Literatur}}$ in MPa	1700	26000	-
E in MPa	6383	44255	5120
$E_{\text{Literatur}}$ in MPa	3300	70000	-

4.4 Bestimmung der Schallschwächungskoeffizienten

In diesem Versuchsteil wurden die Schallschwächungskoeffizienten in Wasser, Polyacryl und PVC bestimmt. Dazu wurde eine Schallwelle in den zu untersuchenden Körper eingekoppelt. Diese durchlief den Körper und wurde dann an der Grenzschicht zu einem anderen Medium reflektiert und von der Sonde detektiert, was einen Spannungsimpuls zur Folge hatte. Der zu erwartende Zusammenhang zwischen Schallintensität I und der durchlaufenen Wegstrecke x ist folgender²:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Dabei bezeichnet I_0 die Anfangsintensität bei $x = 0$; μ ist der gesuchte Schwächungskoeffizient. Durch einen Exponential-Fit kann die Größe μ bestimmt werden. In Abb. 7 sind die erhaltenen Messwerte grafisch dargestellt. Die aus der Regression bestimmten Werte für die Schwächungskoeffizienten sind in Tab. 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Zusammenstellung der experimentell bestimmten Schallschwächungskoeffizienten

	Wasser	Polyacryl	PVC
μ in mm^{-1}	0.0023	0.017	0.023

4.5 Spektrale Untersuchungen

Für diesen Versuchsteil stand eine ca. 1 cm dicke Polyacrylplatte zur Verfügung. Auf diese wurde der Polyacrylzylinder mit einer Länge von 4 cm gestellt und von oben eine Schallwelle eingekoppelt. Zunächst wurde im Amplituden-Mode gearbeitet. Es konnten mehrere Reflexe beobachtet werden, die aufgrund von Mehrfachreflexionen entstehen (siehe Abb. 8). Die Abstände dieser Maxima wurden zu $7 \mu\text{s}$ bestimmt. Da die Reflexe

²vgl. Abschn. 2.3

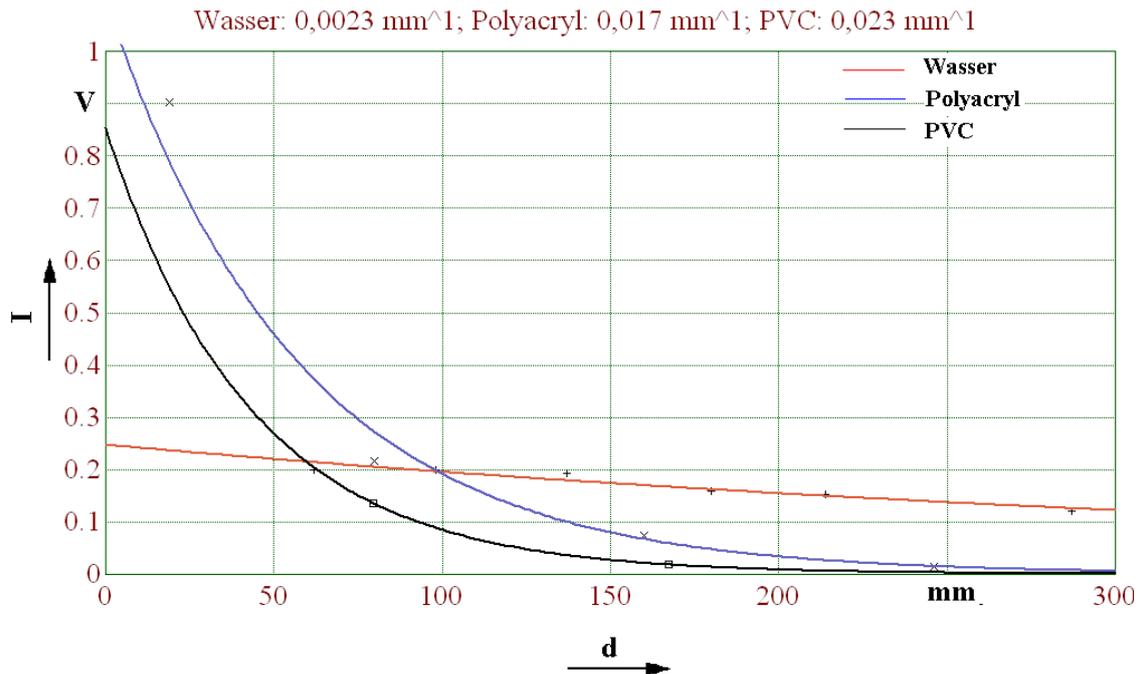


Abbildung 7: Statt des Absolutwertes für die Intensität wurde die von der Sonde gemessene Spannung über der von der Ultraschallwelle durchlaufenen Schichtdicke d aufgetragen. Die systematischen Fehler wurden dabei als vernachlässigbar klein eingestuft.

an der Ober- bzw. Unterseite der Platte entstehen, kann hieraus die Dicke d der Platte bestimmt werden, wenn von einer bekannten Schallgeschwindigkeit von $v = 2670 \text{ ms}^{-1}$ ausgegangen wird:

$$\begin{aligned}
 d &= \frac{v \cdot t}{2} \\
 &= \frac{2670 \text{ ms}^{-1} \cdot 7 \mu\text{s}}{2} \\
 &= \underline{\underline{9.3 \text{ mm}}}
 \end{aligned}$$

Als nächstes wurde durch eine Fouriertransformation das Spektrum des ersten Peaks bestimmt, so dass die Frequenzverteilung des Signals der Ultraschallsonde erhalten wurde. Das Ergebnis zeigt Abb. 9. Man erkennt, dass das Maximum nahezu bei 2MHz liegt. Nun wurde eine FFT sowie das Cepstrum³ der ersten drei Peaks durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist hieraus ersichtlich, dass sich dem Signal der Sonde nun die Mehrfachreflexe überlagern. Der Abstand der einzelnen Maxima ist gleich und beträgt ca. 140 kHz. Aus dem Kehrwert kann die doppelte Laufzeit eines Reflexes zu $7.1 \mu\text{s}$ bestimmt werden. Die Dicke der Platte ergibt sich damit zu $d = 9.5 \text{ mm}$. Aus dem Cepstrum erkennt man, dass der größte Peak bei $6.83 \mu\text{s}$ liegt, was der doppelten Laufzeit eines Reflexes entspricht. Für die Plattendicke ergibt sich nunmehr ein Werte von

³Fouriertransformierte des logarithmierten Spektrums

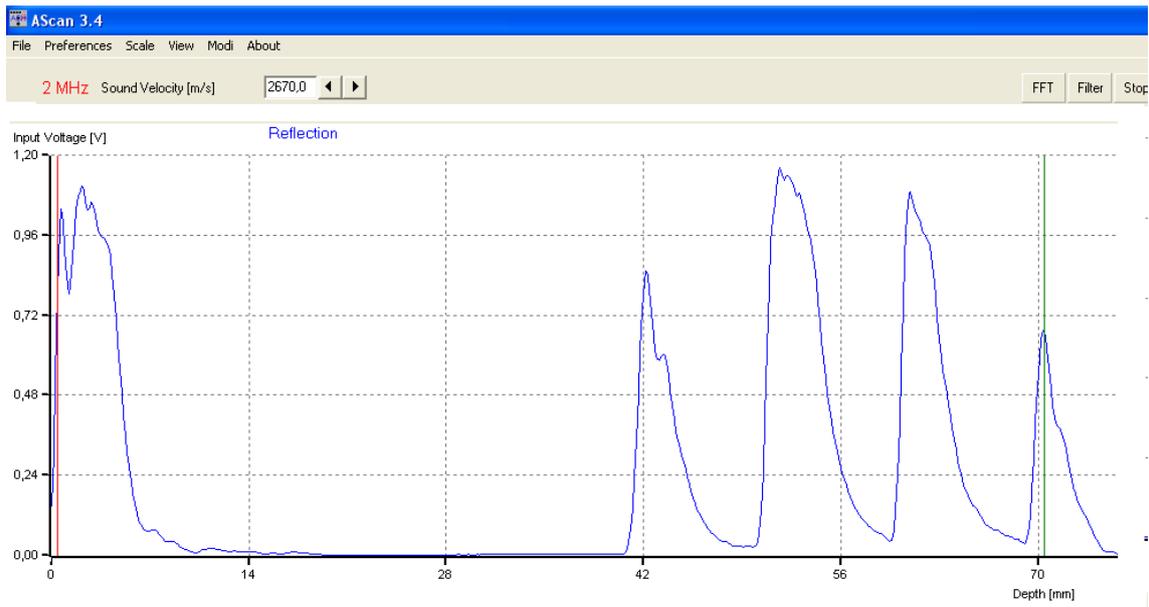


Abbildung 8: Mehrfachreflexe im Amplituden-Mode

9.1 mm. Zusammenfassend kann man also festhalten, dass sich bei allen drei Verfahren eine annähernd gleiche Plattendicke ergibt. Insbesondere das letztgenannte Verfahren gibt eine gute Möglichkeit an die Hand, Längen zu messen.

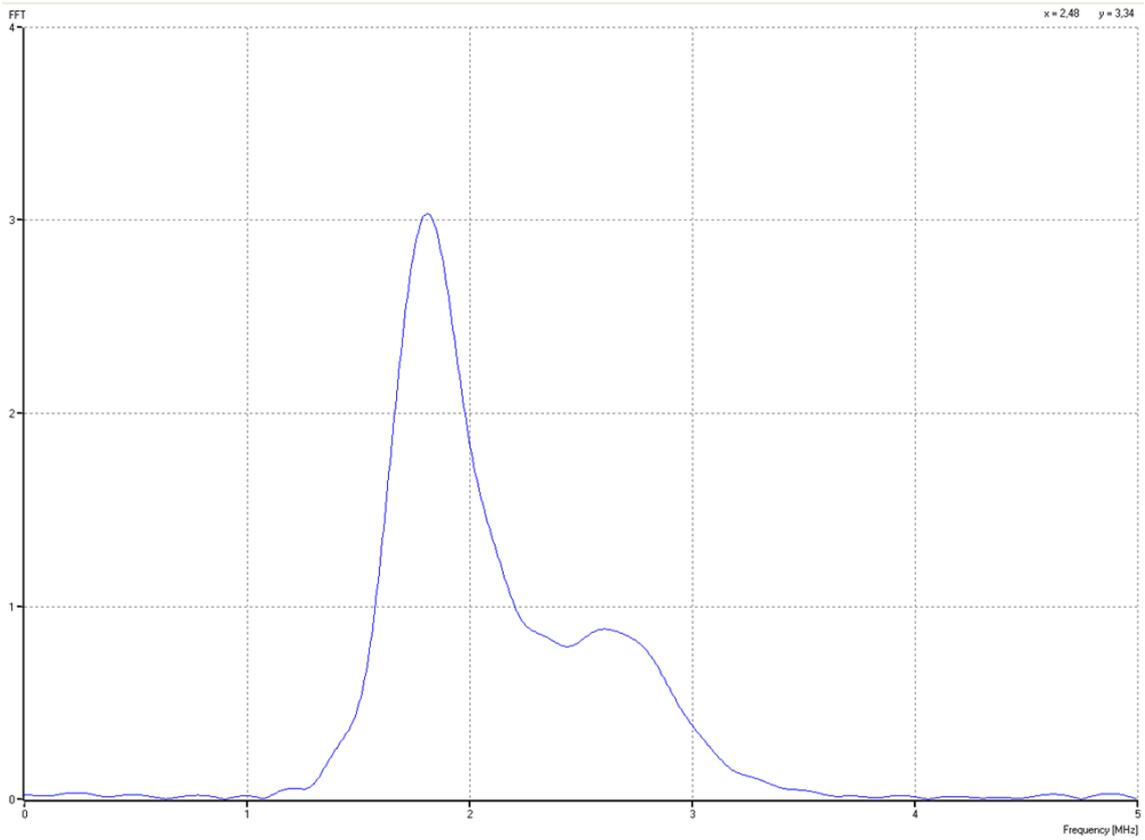


Abbildung 9: Fouriertransformierte des Sondensignals

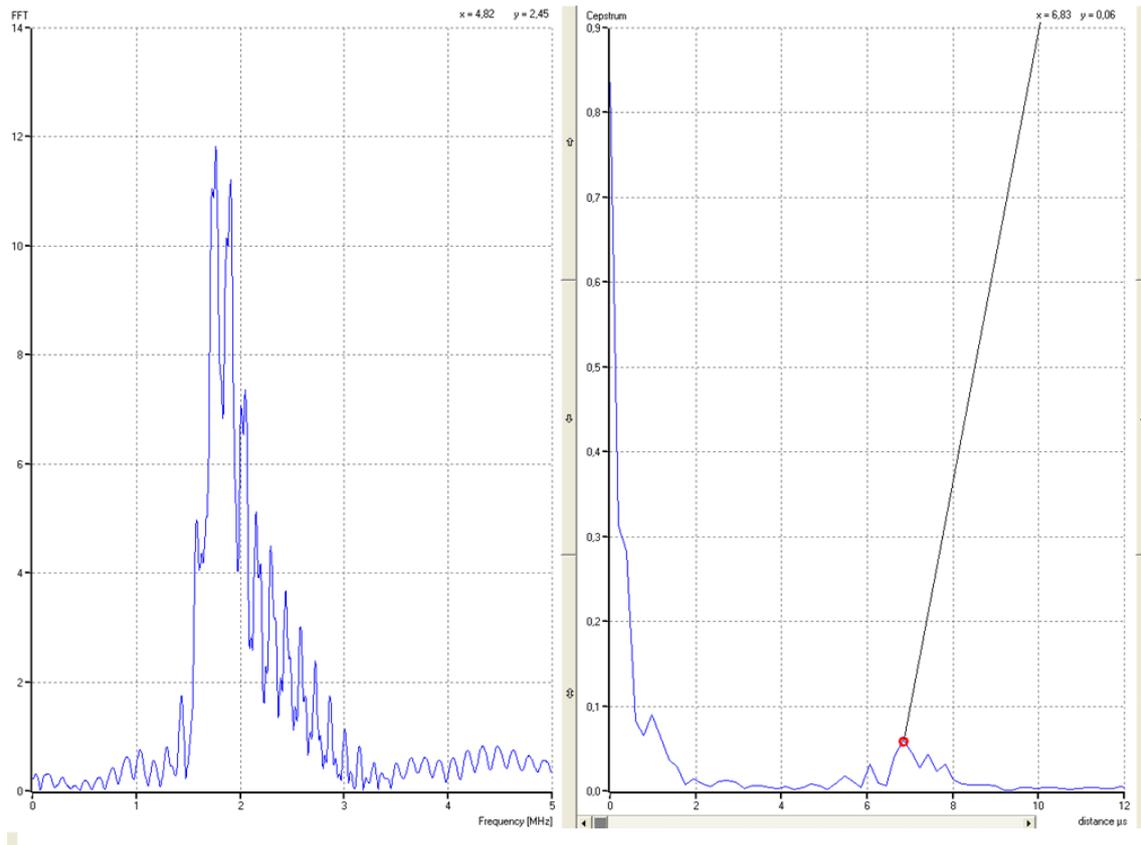


Abbildung 10: Fouriertransformation (links) und Cepstrum (rechts) der zeitabhängigen Amplitudenverteilung

4.6 Untersuchung des Auflösungsvermögens

In diesem Versuchsteil sollte das Auflösungsvermögen der drei Sonden untersucht werden. Dazu stand ein Testblock mit zwei benachbarten Fehlstellen zur Verfügung. Es wurde das Echo der eingekoppelten Ultraschallwelle gemessen. Dabei wurde festgestellt, dass die Signalauflösung eine Abhängigkeit von der Frequenz der Ultraschallwelle zeigt: Während mit der 2- und 4 MHz - Sonde der Abstand der Fehlstellen bestimmt werden konnte, war dies mit der 1 MHz - Sonde nicht möglich. Das experimentelle Ergebnis ist in Tab. 5 nochmals zusammengefasst. Aus diesem Versuch konnte die Erkenntnis gewonnen

Tabelle 5: Bestimmung des Abstandes zweier benachbarter Fehlstellen

Frequenz	1 MHz	2 MHz	4 MHz
Abstand s der Fehlstellen in mm	-	1,2	1,6

werden, dass bei der Anwendung des Ultraschalls, beispielsweise in der Fehlstellendiagnostik, dieser Effekt berücksichtigt werden muss, wenn sehr nahe beieinander liegende Fehlstellen detektiert werden sollen. Allerdings muss hierbei auch beachtet werden, dass die Eindringtiefe in das Material mit steigender Frequenz stark abnimmt. Man muss daher bei der Anwendung immer einen geeigneten Mittelweg finden.

4.7 Bestimmung von Lochdurchmessern in Polyacryl

Für diesen Versuchsteil stand ein Polyacrylblock mit Löchern verschiedenen Durchmessers zur Verfügung. Eine Skizze des Blockes ist in Abbildung 11 dargestellt. Es ist dabei

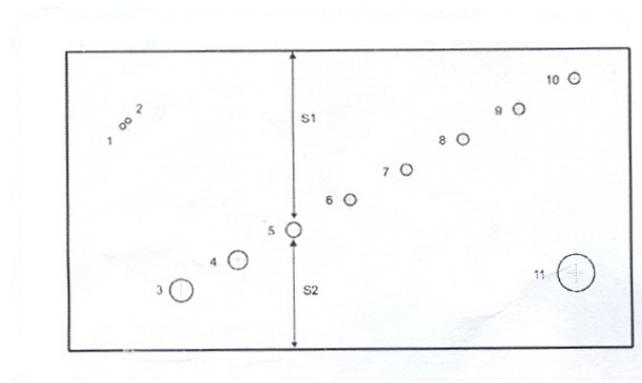


Abbildung 11: Skizze des Polyacrylblocks zur Messung der Lochdurchmesser (nicht maßstäblich); aus [4]

anzumerken, dass lediglich die Löcher 3 bis 6 vermessen wurden. Zur Bestimmung des Lochdurchmessers wurde eine Ultraschallwelle in den Quader eingekoppelt und das Echo vermessen. Mit der Schallgeschwindigkeit $v = 3676 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in Polyacryl konnte der Abstand

der Löcher zur Sonde gemessen werden. Dieser Abstand s_1 bzw. s_2 wurde von oben bzw. unten bestimmt (siehe Abb. 11). Der Lochdurchmesser $d_{\text{Ultraschall}}$ ergab sich aus der Differenz zwischen gemessener Höhe des Blocks (80,6 mm) und der Summe $s_1 + s_2$. Zum Vergleich wurde der Lochdurchmesser $d_{\text{Schiebelehre}}$ mit einer digitalen Schiebelehre gemessen. Das Ergebnis ist in Tab. 6 zusammengestellt. Beim Vergleich der Werte

Tabelle 6: Zur Bestimmung der Lochdurchmesser

Loch - Nr.	3	4	5	6
$d_{\text{Ultraschall}}$ in mm	5.3	4.4	3.2	2.1
$d_{\text{Schiebelehre}}$ in mm	5.91	4.91	3.79	2.91

$d_{\text{Ultraschall}}$ und $d_{\text{Schiebelehre}}$ stellt man fest, dass die mittels Ultraschall bestimmten Werte ca. 0,6 mm abweichen. Es liegt deshalb die Vermutung nahe, dass hier ein systematischer Fehler seitens der Ultraschallmessung vorliegt. Da die Lochdurchmesser zu klein sind, muss der Fehler in zu groß bestimmten Laufwegen s_1 und s_2 zu suchen sein. Für jeden der beiden Laufwege ergibt sich dann ein Fehler von 0,3 mm. Möglicherweise liegt die Ursache für diese Abweichung in einer Schutzschicht, mit der entsprechend den Angaben des Herstellers jede Ultraschallsonde beschichtet ist. Diese Schicht wird zusätzlich zum tatsächlich interessierenden Laufweg durchlaufen und verfälscht das Messergebnis.

4.8 Fehlstellendiagnostik mittels B-Bild

In diesem Versuchsteil wurde ein PVC-Quader mit Löchern sowie der bereits vorhin verwendete Polyacryl-Quader untersucht. Es wurde jeweils ein Bild mit LAV und eines ohne LAV aufgenommen. Das Ergebnis ist in Abb. 12 und 13 dargestellt. Man erkennt gut

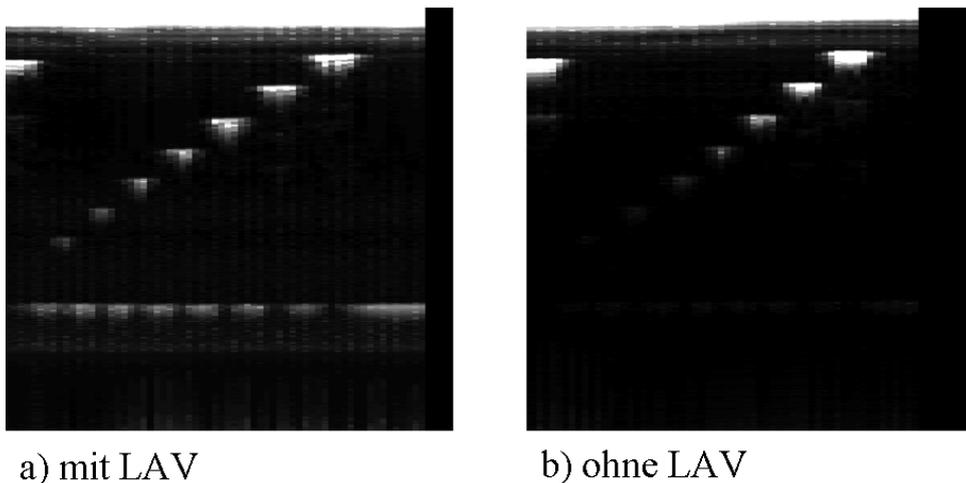


Abbildung 12: B - Bild des PVC - Quaders

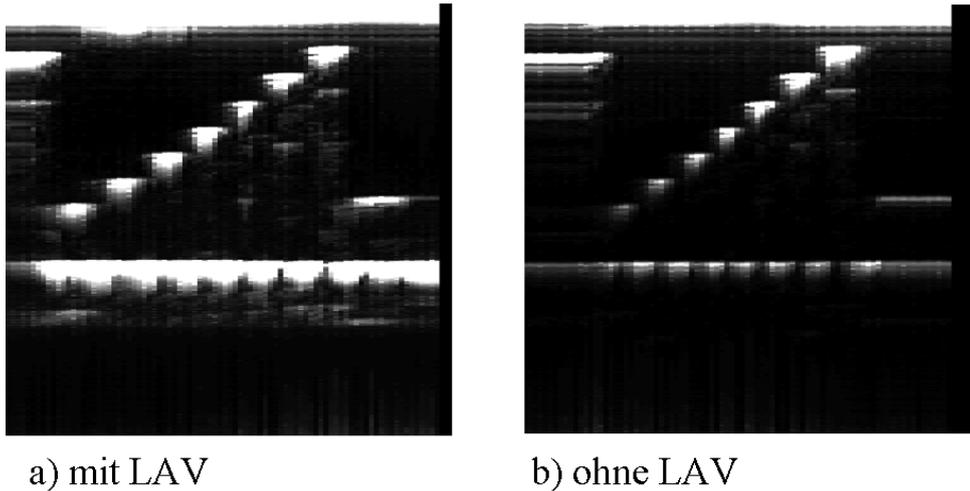


Abbildung 13: B - Bild des Polyacrylquaders

die hell erscheinenden Bohrungen. Allerdings ist auch erkennbar, dass eine Verzerrung der eigentlichen Form vorliegt: Die runden Störstellen werden als Ellipse dargestellt. Das B-Bild eignet sich daher nur für qualitative Aussagen. Ferner ist deutlich zu erkennen, dass die Reflexe ohne LAV schwächer sind.

4.9 Untersuchung von bewegten Grenzschichten

In diesem Versuchsteil wurde eine spezielle Vorrichtung bestehend aus einem Kondom und einer Blasvorrichtung genutzt. Dadurch konnte gepulst Luft in das Kondom geleitet und damit ein Herz simuliert werden. Die in Bewegung gesetzte Kondomoberfläche wurde mit einer Ultraschallwelle untersucht. Das erhaltene Bild ist in Abb. 14 dargestellt. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut für Einsätze in der Medizin. Es ist somit die Beobachtung der Arbeitsweise bestimmter Organe, z.B. des Herzens, möglich.

4.10 Bestimmung von Risstiefen mittels TOFD

Für diesen Versuchsteil stand ein spezieller Winkelprüfkopf mit einem Einschallwinkel von 43° zur Verfügung. Dabei wurde das jeweilige Beugungs- und Winkelecho gesucht und die Position der Sonde jeweils so gewählt, dass das betrachtete Echo maximal wird. Gemessen wurde nun der jeweilige Abstand der Sondenvorderkante zur Werkstückkante (s_1 - Winkelecho; s_2 - Beugungsecho) sowie die jeweilige Laufzeit (t_1 - Winkelecho; t_2 - Beugungsecho). Die Risstiefe T kann dann aus der folgenden Beziehung bestimmt werden

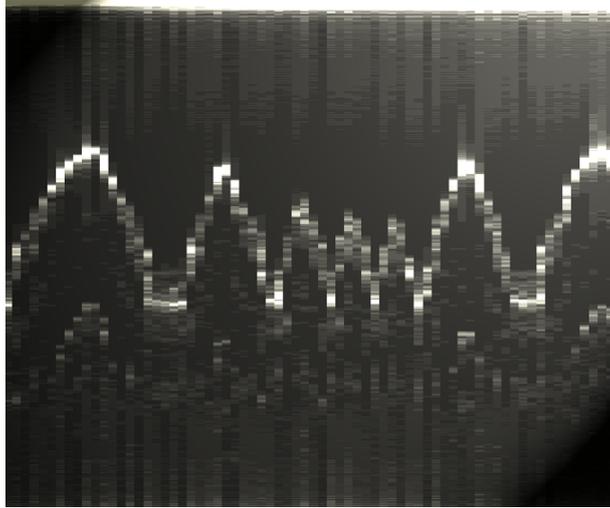


Abbildung 14: Untersuchung bewegter Grenzschichten

(vgl. [4]):

$$T = D - \sqrt{\left(\frac{t_1 \cdot c}{2}\right)^2 - \left(\sqrt{\left(\frac{t_2 \cdot c}{2}\right)^2 - D^2} - x\right)^2}$$

Dabei bezeichnet D die Dicke des Werkstücks und x ist die Differenz $s_1 - s_2$ (vgl. Abb. 15). Ferner wurde zur Kontrolle die Risstiefe mit einem Lineal gemessen. Die Werte sind in Tab. 7 zusammengestellt. Es fällt hierbei auf, dass bei den beiden größten Rissen eine

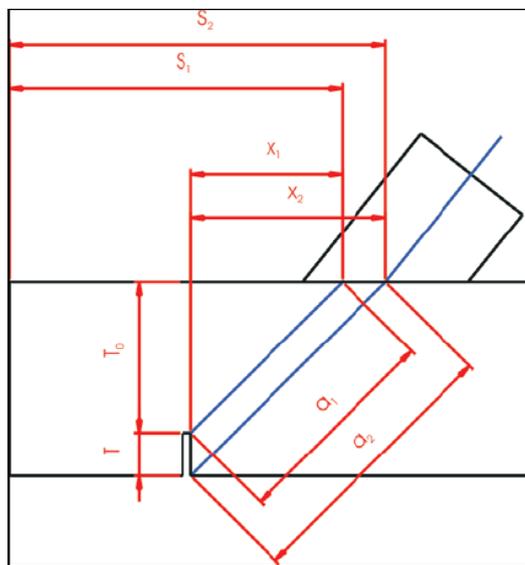


Abbildung 15: Skizze zur Risstiefenbestimmung mittels TOFD (aus: [4])

Tabelle 7: Bestimmung von Risstiefen in einem Aluminiumblock

Riss Nr.	1	2	3	4	5	6
$T_{\text{Ultraschall}}$ in cm	1.45	1.095	1.26	0.72	0.06	0.013
T_{Lineal} in cm	1.37	0.98	0.8	0.57	0.37	0.22

gute Übereinstimmung beider Werte besteht. Bei kleineren Rissen ist die Abweichung aber beträchtlich. Aufgrund dieses experimentellen Befundes liegt die Vermutung nahe, dass dieses Verfahren nur bei vergleichsweise großen Rissen mit einer hohen Genauigkeit eingesetzt werden kann.

4.11 Untersuchung der Blackbox

Als erstes wurde ein B-Bild der Blackbox aufgenommen. Das Ergebnis zeigt Abb. 16. Man erkennt, dass auf der Diagonalen sechs Störstellen, vermutlich Bohrungen, liegen.

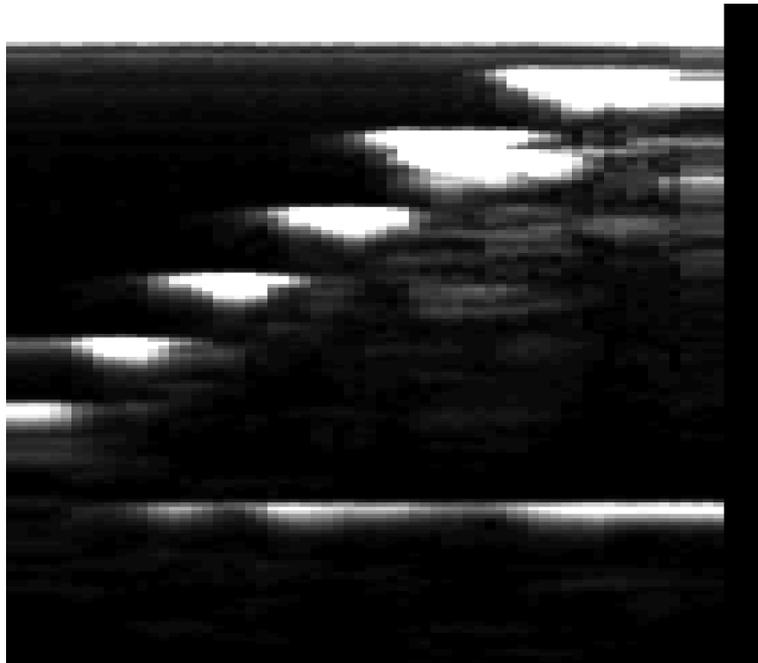


Abbildung 16: B-Bild der Blackbox

Außerdem erkennt man, dass die beiden Störstellen in der rechten oberen Ecke größer und langgezogen erscheinen. Es ist somit naheliegend zu vermuten, dass es sich um Doppelbohrungen handelt. Um die genaue Lage der Bohrungen zu ermitteln wurden im Amplituden-Mode die Echos gemessen, wobei die Schallwelle auf drei verschiedenen Seiten des Probekörpers eingekoppelt wurde. Aus den erhaltenen Messwerten konnte

eine Skizze der Blackbox mit den jeweiligen Positionsangaben erstellt werden (Abb. 17).

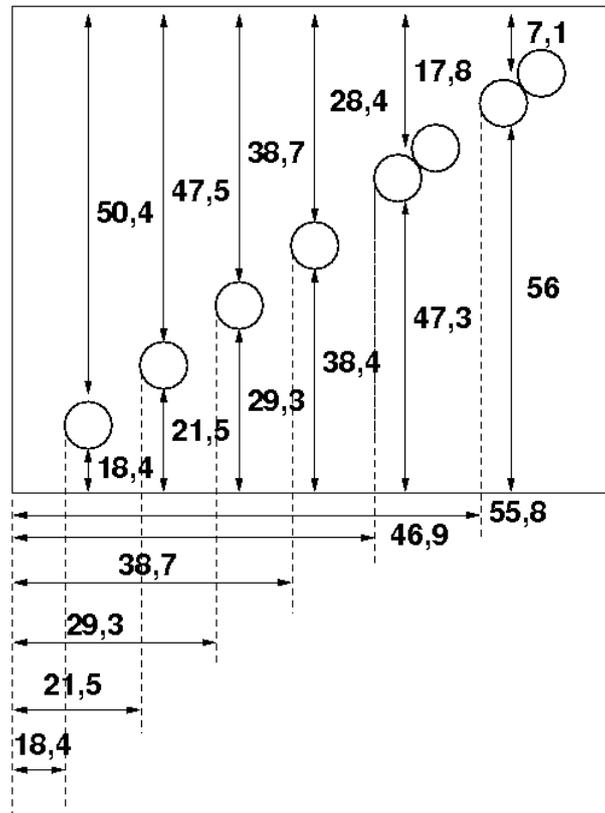


Abbildung 17: Skizze der Blackbox; alle Angaben in mm

4.12 Rayleigh-Wellen

Für diesen Versuchsteil stand eine spezielle Sonde zur Erzeugung von Rayleigh-Wellen zur Verfügung. Untersucht wurde ein Aluminiumblock, in den verschiedene Risse eingeschnitten waren. Zunächst wurde die Schallgeschwindigkeit der Rayleigh-Wellen bestimmt. Dazu wurde eine zweite Sonde zur Detektion genutzt. Der Abstand zwischen beiden Sonden wurde variiert und jeweils die Laufzeit gemessen. Die gemessenen Werte wurden in einem Diagramm (Abb. 18) aufgetragen. Mittels linearer Regression findet man den folgenden Wert für die Schallgeschwindigkeit:

$$c_{\text{Rayleigh}} = 2900 \text{ ms}^{-1}$$

Allerdings fällt auf, dass die Gerade nicht durch den Ursprung geht, was sie jedoch eigentlich müsste. Da die Messpunkte ansonsten sehr gut auf der Geraden liegen, legt dies die Vermutung nahe, dass die Messwerte mit einem systematischen Fehler behaftet

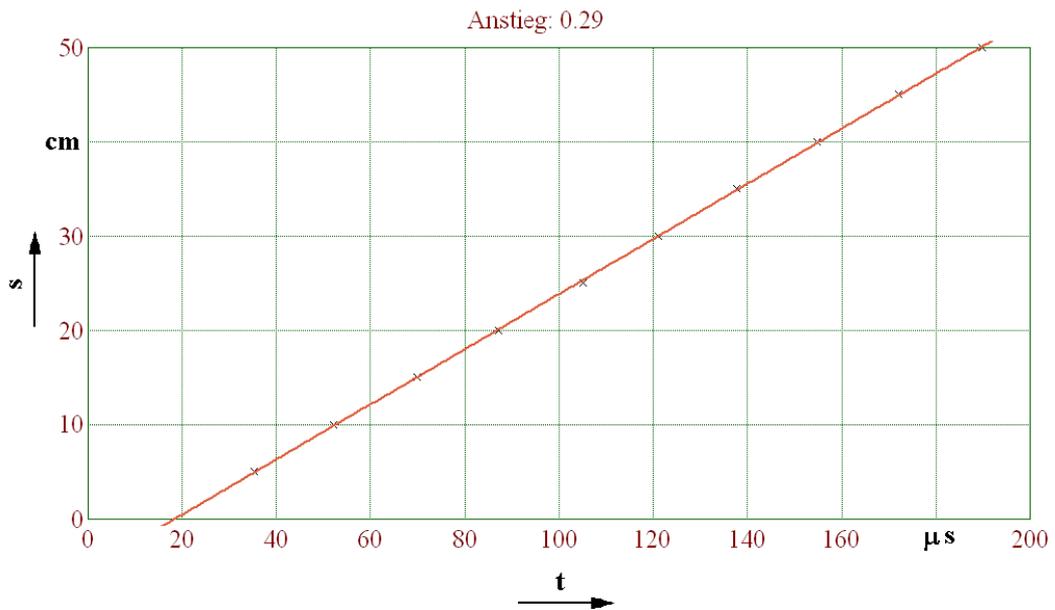


Abbildung 18: Laufstrecke s in Abh. von der Laufzeit t

sind. Möglich wäre, dass der tatsächliche Laufweg des Ultraschalls länger war als der gemessene Weg von Sonde zu Sonde. Dafür käme bspw. der spezielle Sondenaufsatz in Frage, der eine recht große Dicke aufwies.

Nun wurde der Einfluss der Risttiefe auf die Amplitude der Welle untersucht. Zunächst

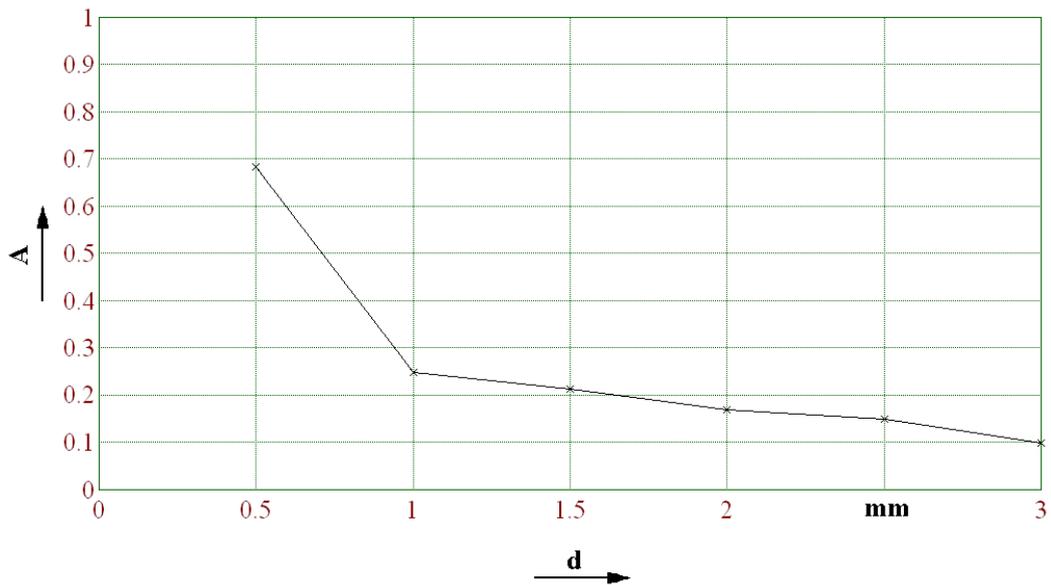


Abbildung 19: relative Amplitude A in Abh. von der Risttiefe d

wurde für einen Laufweg von 5 cm die Amplitude ohne Störung gemessen, wobei sich ein Wert von 0,202 V ergab. Nun wurden beide Sonden symmetrisch zum Riss angeordnet, wobei der Abstand der Sonden zueinander erneut zu 5 cm gewählt wurde. Es wurde erneut die Amplitude gemessen und mit der vorhin bestimmten ins Verhältnis gesetzt. Die relative Amplitude wurde über der Risstiefe aufgetragen (Abb. 19). Man erkennt, dass mit zunehmender Risstiefe auch die Amplitude abnimmt.

Um eine Risstiefenbestimmung zu ermöglichen, wurde ein neuer Probekörper angefertigt. Dieser ist so aufgebaut, dass auf einer Seite Risse bekannter Tiefe als Referenz vorhanden sind, womit dann eine Kalibrierkurve aufgenommen wird, um die Risstiefen auf der gegenüberliegenden Seite zu bestimmen. Der Probekörper ist in Abb. 20 komplett dargestellt, und Abb. 21 zeigt zwei der Risse auf den beiden Seiten. Der Körper ist insgesamt 60 cm lang, und die Risse wurden in einem Abstand von 9 cm zueinander angebracht. Dabei ist es unwichtig, ob die Risse genau gegenüber liegen, da die Eindringtiefe der Rayleighwellen viel geringer ist als die Dicke des Probekörpers. Zuerst wurde wieder die Rayleighwellengeschwindigkeit (Tab. 8) des aus Aluminium bestehenden Körpers bestimmt, die sich im Durchschnitt zu 2638 m/s ergab.

Danach wurde dann die Schwächung der Rayleighwellenamplituden an den einzelnen Rissen aufgenommen. Da es sich nur um einen Probekörper handelt, das Material in

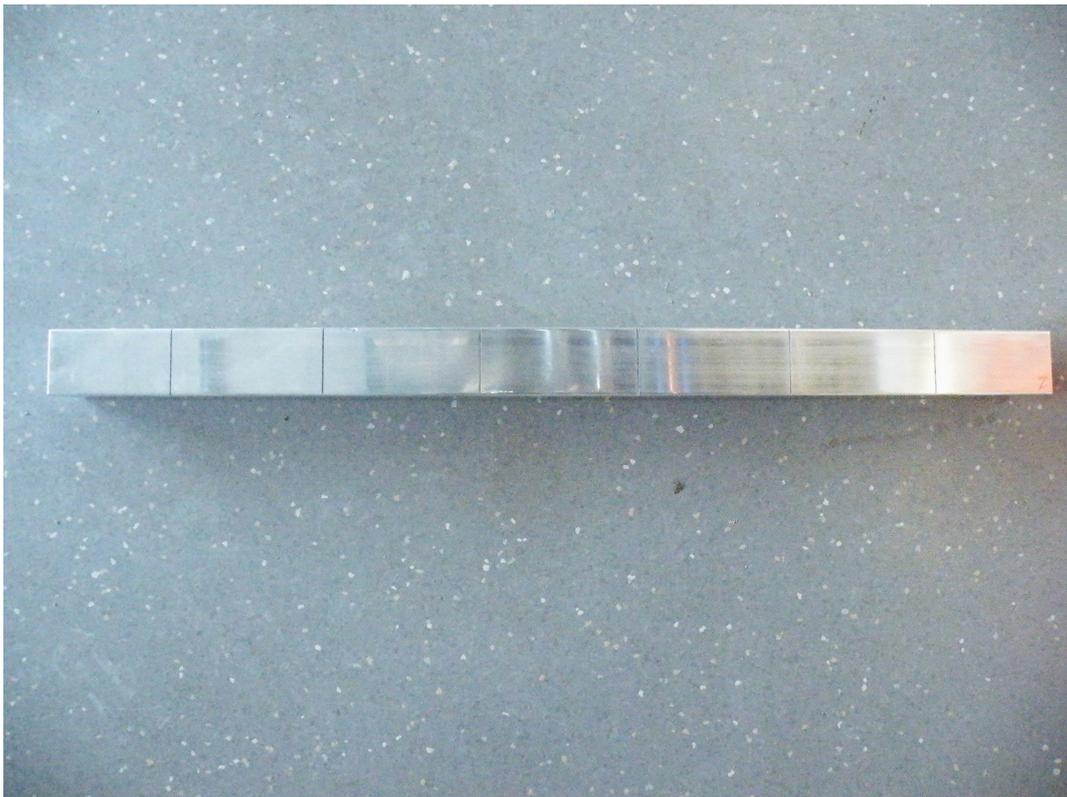


Abbildung 20: Draufsicht auf einen Probekörper für die Risstiefenbestimmung

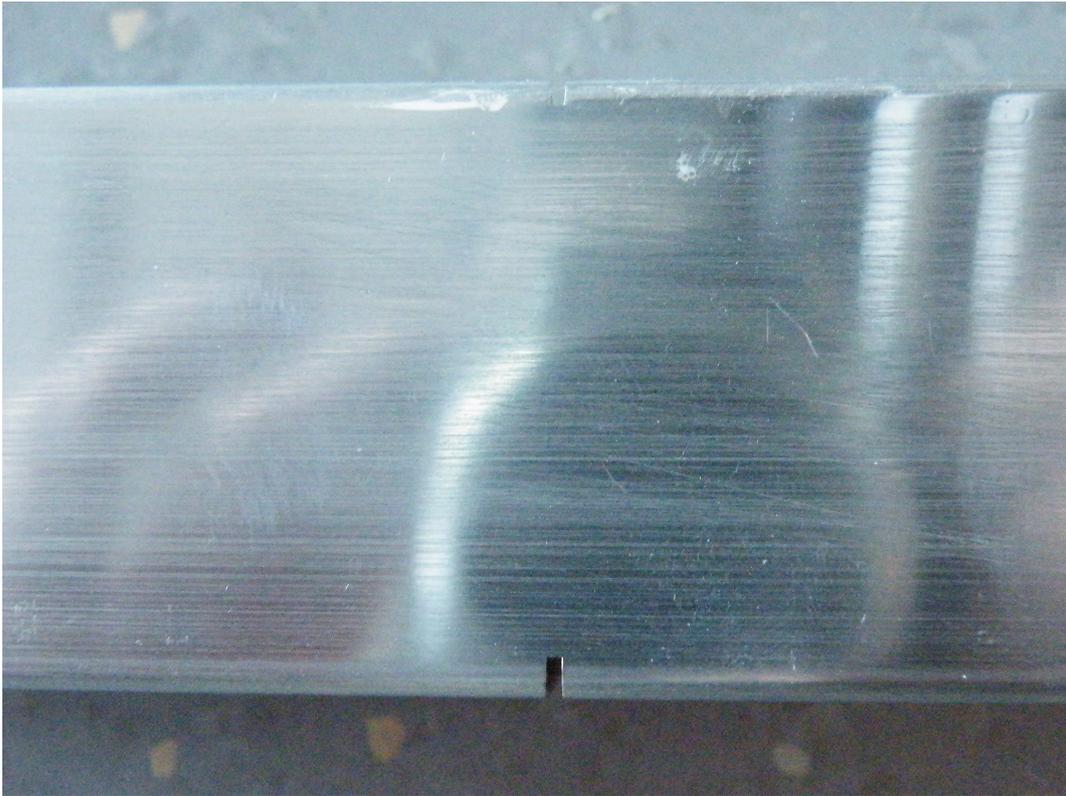


Abbildung 21: Seitenansicht des Probekörpers mit den sich gegenüberliegenden Rissen

dem sich die Risse befinden also identisch ist, kann ein Vergleich der Werte erfolgen. Die einzelnen Werte und die sich daraus ergebende normierte Amplitude sind in Tabelle 9 aufgelistet. Dabei handelt es sich bei den Rissen, welche mit 1.x bezeichnet sind, um

Tabelle 8: Rayleighwellengeschwindigkeit

s in cm	t in μs	v in $\frac{m}{s}$	\bar{v} in $\frac{m}{s}$
5	24,0	2083,33	2638,02
10	40,2	2487,56	
15	57,8	2595,16	
20	76,4	2617,80	
25	93,7	2668,09	
30	111,0	2712,48	
35	128,0	2740,80	
40	144,0	2772,00	
45	160,0	2810,74	
50	180,0	2774,69	
55	200,0	2755,51	

Tabelle 9: Messwerte und Parameter am Alu-Profil

Riss-Nr.	Verstärkung in dB	Risstiefe in mm	Amplitude in mV	korrigierte Amplitude in mV	normierte Amplitude	normierte Amplitude in dB
1.1	20	0,2	697,00	69,7	0,844	-1,47
1.2	20	0,4	209,00	20,9	0,253	-11,94
1.3	25	1,0	229,00	12,9	0,156	-16,14
1.4	25	1,8	146,00	8,2	0,099	-20,09
1.5	35	2,2	446,00	7,9	0,096	-20,35
1.6	35	2,7	400,00	7,1	0,086	-21,31
2.1	20	0,3	590,00	59	0,714	-2,92
2.2	20	0,5	363,00	36,3	0,439	-7,15
2.3	20	0,8	187,00	18,7	0,226	-12,92
2.4	30	1	319,00	10,1	0,122	-18,27
2.5	30	1,5	300,00	9,5	0,115	-18,79
2.6	35	2,06	460,00	8,18	0,099	-20,09
0	20	0	826,00	82,6	1,0	0

die Risse der Referenzseite, wobei ich eine der Seiten willkürlich zur Referenz erklärt habe. Die Verstärkung wurde im weiteren Verlauf herausgerechnet, wodurch sich die korrigierte Amplitude ergab. Das ist notwendig, um die Vergleichbarkeit der erhaltenen Werte zu gewährleisten. Die Risstiefen der Referenzseite wurden mittels eines Messschiebers gemessen, und somit als Grundlage der Kalibrierkurve genutzt. Die Risstiefen der gegenüberliegenden Vergleichsseite wurden dann aus dieser erstellten Kalibrierkurve ermittelt. In Abb. 22 handelt es sich um die Abnahme der normierten Amplitude bei zunehmender Risstiefe, wobei der Amplitudenwert ohne Riss eins beträgt und darauf alles Weitere bezogen wurde. Die Abb. 23 zeigt den gleichen Sachverhalt, nur das an der Ordinate diesmal die Dämpfung in dB aufgetragen ist.

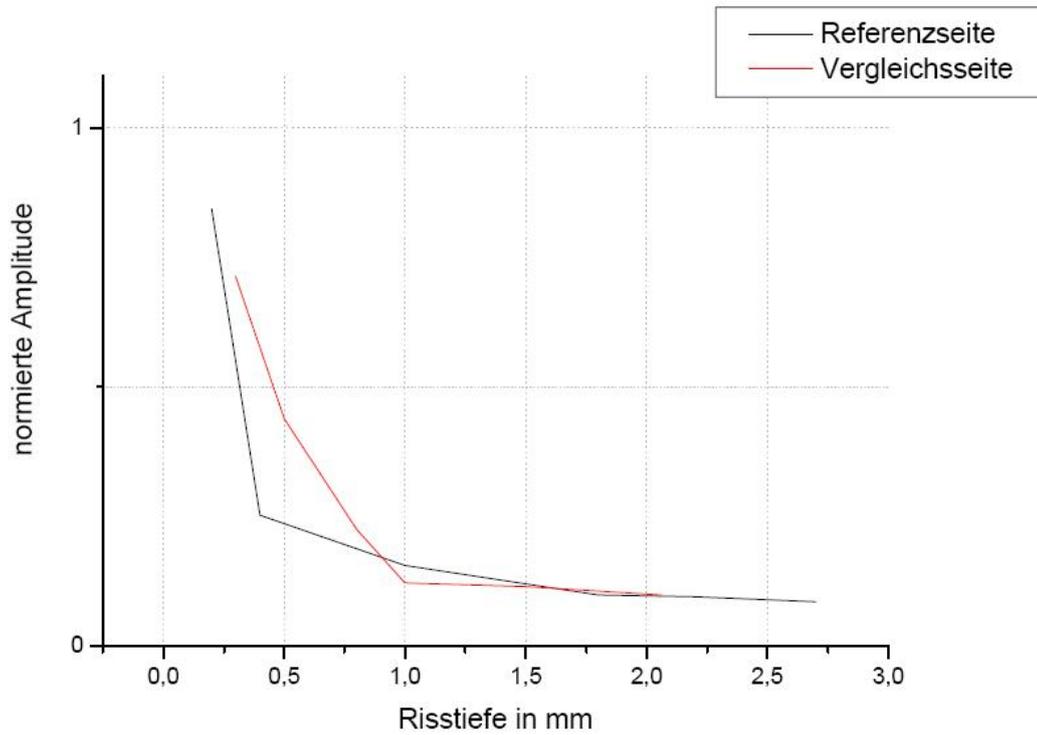


Abbildung 22: Amplitudenabnahme der Rayleighwellen mit zunehmender Risstiefe

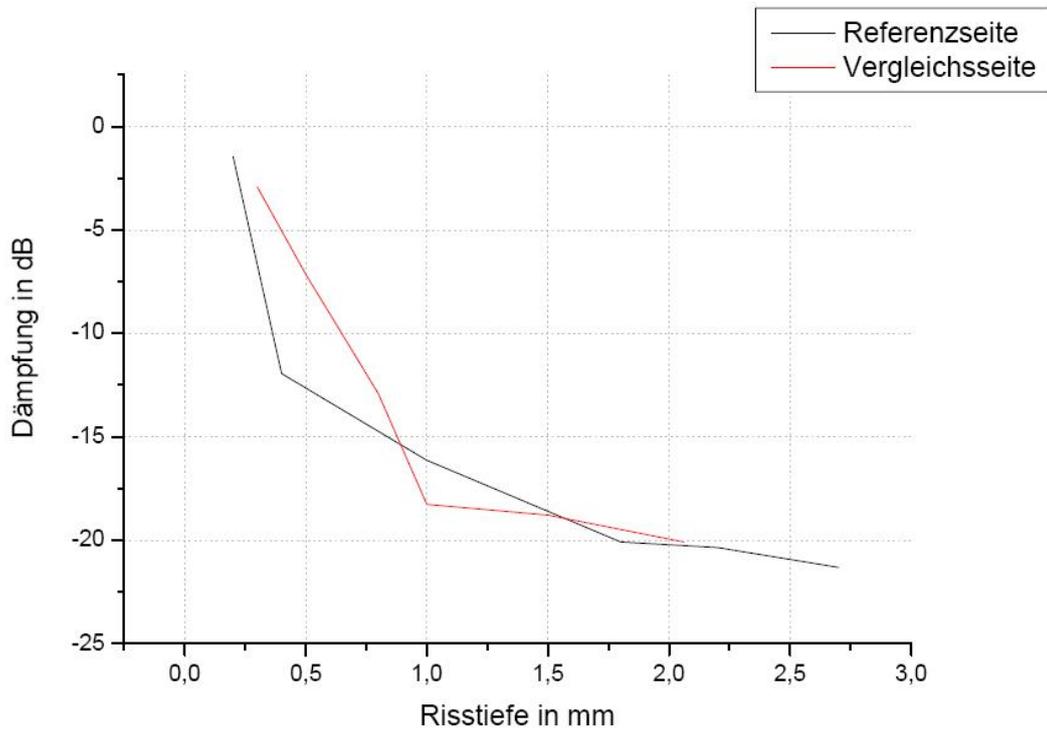


Abbildung 23: Dämpfung der Amplitude in Abhängigkeit von der Risstiefe

5 Zusammenfassung

In diesem Versuch wurden die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten des Ultraschalls untersucht. Im ersten Versuchsteil wurde der Wellencharakter nachgewiesen und die Arbeitsweise des Computerprogramms kennengelernt. Anschließend wurde gezeigt, dass Ultraschall in Festkörpern nur eine begrenzte Reichweite hat, die zudem eine Frequenzabhängigkeit zeigt. Insbesondere bei der praktischen Anwendung muss dies berücksichtigt und je nach Problemstellung eine Sonde mit geeigneter Frequenz ausgewählt werden. Der dritte Versuchsteil beschäftigte sich mit der Schallgeschwindigkeit. Es wurde beobachtet, dass in Festkörpern neben den longitudinalen Schallwellen auch Transversalwellen auftreten können. Diese Schallgeschwindigkeiten wurden bestimmt und mit deren Hilfe konnten die elastischen Konstanten der drei untersuchten Stoffe berechnet werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass eine relativ große Abweichung zu Literaturwerten besteht. Anschließend wurden die Schallschwächungskoeffizienten bestimmt. Dabei fiel auf, dass Wasser gegenüber den beiden Festkörpern einen bedeutend kleineren Schallschwächungskoeffizienten aufweist. Der Grund hierfür liegt vermutlich in der Inkompressibilität der Flüssigkeiten. In der Natur wird diese für die Schallausbreitung günstige Eigenschaft des Wassers ausgenutzt: bspw. erfolgt im Inneren des menschlichen Ohres die Weiterleitung des Schalls verlustarm durch Wasser. Der nächste Versuchsteil beschäftigte sich mit spektralen Untersuchungen. Es wurde ein weiteres Verfahren zur Bestimmung von Längen, das Cepstrum-Verfahren, kennengelernt. Ferner wurde gezeigt, dass eine Frequenzabhängigkeit des Auflösungsvermögens besteht. Dies muss insbesondere in der Fehlstellendiagnostik beachtet werden. Die folgenden Versuchsteile hatten vor allem das Kennenlernen der wichtigsten Anwendungen des Ultraschalls zum Ziel. Zunächst wurde ein Testblock mit Löchern verschiedener Durchmesser untersucht. Es ergab sich eine relativ gute Übereinstimmung der experimentell erhaltenen Werte mit mittels Messschieber ermittelten Werten. Als nächstes wurde das B-Bild-Verfahren durchgeführt. Man konnte erkennen, dass dieses Verfahren zwar einen guten visuellen Eindruck vom Inneren eines Körpers liefert, aber mit diesem Verfahren keine qualitativen Aussagen möglich sind. Eine wichtige Anwendung des Ultraschalls liegt in der Materialprüfung. Mittels TOFD ist eine Bestimmung von Risstiefen in Werkstücken möglich, was im Versuch untersucht wurde. Allerdings konnte festgestellt werden, dass dieses spezielle Verfahren bei kleinen Risstiefen ungenau wird. Eine vollständige Materialprüfung muss daher dieses Verfahren mit anderen Verfahren kombinieren, die auch kleinere Risstiefen mit einer hohen Genauigkeit auflösen können. Die Untersuchung an bewegten Grenzschichten mittels M-Bild demonstrierte, wie prinzipiell Ultraschall in der Medizin angewendet wird. Der letzte Versuchsteil beschäftigte sich mit Rayleighwellen. Es wurde die Schallgeschwindigkeit bestimmt sowie der Einfluss von Rissen im Material untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Risstiefe ebenfalls eine Abnahme der Amplitude verknüpft ist.

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder
„Experimentalphysik 1“
4. Auflage Springer Verlag (2006)
- [2] www-ibt.etec.uni-karlsruhe.de/postscript/Ultraschall_I.pdf
- [3] www.wikipedia.de
Suchbegriff: Sonografie, Unterpunkt: Auflösungsvermögen
- [4] Versuchsanleitung zu diesem Versuch von www.gampt.de