

W12**Ultraschall**

Als Ultraschall (US) bezeichnet man Schallwellen mit einer Frequenz oberhalb des von Menschen wahrnehmbaren Bereichs, d.h. mit Frequenzen über 20 kHz. Ultraschall ist aus der heutigen Medizin und Industrie nicht mehr wegzudenken. Einige exemplarische Anwendungen sind

Medizin:

- Sonographie: Verfahren mit dem Bilder innerer Organe belastungsfrei erzeugt werden können
- Messung des Blutflusses mit Doppler Verfahren
- Nierensteinzertrümmerer
- Zahnsteinentfernung

Industrie

- zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
- Ultraschallschweißen von Kunststoffen
- Ultraschallreinigung von Werkstücken
- Füllstandsmessung in Behältern
- Echolot und Sonare auf Schiffen

In diesem Versuch werden einige der physikalischen Eigenschaften von Ultraschall untersucht.

1. Theoretische Grundlagen

1.1. Schallwellen

1.1.1. Grundsätzliches

Schallwellen sind mechanische Schwingungen, die sich in einem Trägermedium fortpflanzen. In Fluiden (Flüssigkeiten und Gase), die keine Scherkräfte übertragen können, treten nur Longitudinalwellen auf, in Festkörpern können sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen auftreten.

Eine Schallwelle kann durch verschiedene, orts- und zeitabhängige Grössen beschrieben werden, welche alle miteinander verknüpft sind:

- Die Verschiebung der Moleküle $\psi(r,t)$
- Die Druckschwankung $p(r,t)$ **um den mittleren Druck p_0**
- Die Dichteschwankung $\rho(r,t)$ **um die mittlere Dichte ρ_0**
- Die Schallschnelle $v(r,t)$

Die Schnelle $v(r,t)$ gibt die momentane und lokale Geschwindigkeit eines schwingenden Massenelementes an. Sie darf nicht mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Welle, der Schallgeschwindigkeit, verwechselt werden.

1.1.2. Die Wellengleichung

Die Differentialgleichung, mit der sich die Schallausbreitung in einem Medium prinzipiell berechnen lässt, folgt aus drei fundamentalen Grundgleichungen, was im Folgenden anhand von Schallwellen in einer Flüssigkeit gezeigt werden soll.

Der Korrektheit halber soll noch erwähnt werden, dass die Herleitung wesentlich, vielleicht etwas versteckt, die Kleinheit der Schwankungen ψ , p , ρ , v gegenüber der Wellenlänge, p_0 , ρ_0 und c verwendet. Dies berechtigt zur Vernachlässigung aller Quadrate oder Produkte dieser Grössen resp. Ableitungen. Praktisch heisst dies, dass Explosionen, Überschallknall etc. nicht mit der hier präsentierten Theorie behandelt werden können. In solchen Fällen ist z.B. die Druckerhöhung vergleichbar oder sogar grösser als p_0 !!

Als erstes benötigt man die Mutter aller mechanischen Gleichungen, die

Bewegungsgleichung:

Ein dünnes Flüssigkeitselement $A \cdot dx$ (Dicke dx und Fläche A) wird infolge des Druckunterschiedes auf beiden Stirnflächen beschleunigt:

$$\rho_0 \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = (p(x) - p(x+dx)) \cdot A$$

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{Gl (1)}$$

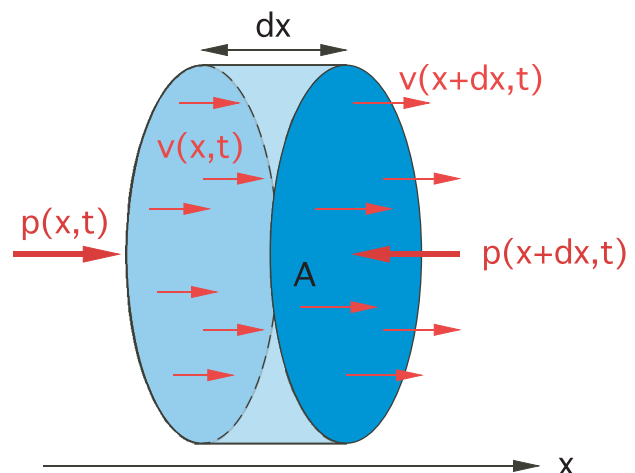


Abbildung 1

Die zweite fundamentale Gleichung ist die **Kontinuitätsgleichung**:

Die Änderung der Dichte pro Zeiteinheit in unserem Volumenelement $A \cdot dx$ ist gerade gleich der Differenz von dem, was links in das Element hinein- und rechts herausfließt, dividiert durch das Volumenelement.

$$\frac{\rho(x, t+dt) - \rho(x, t)}{dt} = \frac{\rho_0 \cdot A \cdot (v(x) - v(x+dx))}{A \cdot dx} = \frac{\rho_0 \cdot (v(x) - v(x+dx))}{dx}$$

oder

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} \quad (2)$$

Als drittes benötigt man eine **Materialgleichung**,

welche Druckänderung und relative Volumenänderung miteinander verknüpft. Die hier auftretende Materialeigenschaft heisst Kompressibilität K mit der Definitionsgleichung

$$dp = -K \cdot \frac{dV}{V}$$

Anschaulich sieht man leicht, dass relative Volumenänderung und relative Dichteänderung entgegengesetzt gleich sind: Wenn das Volumen um 1% vergrößert wird, nimmt die Dichte um 1% ab (dies gilt absolut genau bei unendlich kleinen Änderungen, d.h. in der Differentialrechnung), d.h.

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho_0} \quad \text{oder} \quad dp = K \frac{d\rho}{\rho_0}$$

Druck- und (relative) Dichteänderung gehen also "synchron" miteinander, d.h. es gilt auch

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

Nun leiten wir Gl. (1) partiell nach x ab,

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x \cdot \partial t} = -\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

ersetzen die Geschwindigkeit v mit Gl. (2) durch die Dichte

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \rho_0 \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x \cdot \partial t} \Rightarrow \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

und schlussendlich die Dichte mit Gl. (3) durch den Druck. Damit erhalten wir eine Gleichung, in der nur noch der Druck vorkommt, die Wellengleichung für den Druck:

$$\boxed{\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2}} \quad (4)$$

Wie man sich leicht überzeugt, gilt dieselbe Gleichung, wenn wir p durch v oder ρ ersetzen.

1.1.3. Die Schallgeschwindigkeit

Lösungen dieser Wellengleichung sind alle Funktionen der allgemeinen Form

$$p(x,t) = f(x - c \cdot t) + g(x + c \cdot t) \quad \text{mit } c = \sqrt{K/\rho_0} \quad (5)$$

Die Funktion f beschreibt eine nach rechts laufende, die Funktion g eine nach links laufende Welle mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c .

Bei idealen Gasen (Luft etc.) kann der Kompressionsmodul noch durch grundlegendere Größen ausgedrückt werden. Bei isentroper Kompression, welche bei "normalem" Schall realisiert ist, erhält man

$$c = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{R}{M_m} \cdot T} = \sqrt{\kappa \cdot \frac{R}{M_m} \cdot T} \quad (6)$$

Dabei bedeuten c_p und c_v die isobare resp. isochore Wärmekapazität, $\kappa = c_p/c_v$ den Isentropenexponenten ($\kappa = 1.40$ für Luft, N_2 , O_2 , H_2), $R = 8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ die universelle Gaskonstante, M_m die Molmasse des Gases und T die absolute Temperatur.

Für einen Festkörper tritt an Stelle der Zustandsgleichung das Hook'sche Gesetz als Beziehung zwischen mechanischer Spannung (entspricht dem Druck) und der Dehnung (als Mass für die Dichteänderung). Dabei sind allerdings mehrere Fälle zu unterscheiden:

In einem langen und dünnen Stab (Durchmesser \ll Wellenlänge) treten nur Normalspannungen in Längsrichtung auf. Das Hooksche Gesetz kann als $\sigma = E \cdot \varepsilon$ formuliert werden, woraus sofort die Beziehung für die Schallgeschwindigkeit folgt

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (7)$$

In einem **ausgedehnten** Festkörper kann sich das Material bei Kompression seitlich nicht frei ausdehnen und es treten auch Spannungen quer zur Fortpflanzungsrichtung der Welle, d.h. **Scherspannungen** auf. Das Hook'sche Gesetz muss deshalb mit dem 3-dimensionalen Spannungstensor formuliert werden. Daraus gewinnt man dann (allerdings einiges mühsamer) die Schallgeschwindigkeit einer **longitudinalen Welle**

$$c_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (8)$$

in einem ausgedehnten Festkörper, wobei μ die Poissonzahl als Mass für die Querkontraktion eines Werkstoffes bezeichnet.

Für die Geschwindigkeit der **Transversalwelle** (Scherwelle) folgt

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho \cdot (1 + \mu)}} \quad (9)$$

Man überzeugt sich leicht, dass die Phasengeschwindigkeit der Longitudinalwelle ungefähr doppelt so gross ist wie die der Transversalwelle

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \mu)}{1 - 2\mu}} \approx 2$$

da die Poissonzahl μ typische Werte um 0.33 annimmt.

Beachten Sie: In Literaturtabellen wird oft nicht klar, ob es sich bei der tabellierten Schallgeschwindigkeit um (7) oder (8) handle!

1.1.4. Schallschelle und Impedanz

Gemäss Gleichung (1) sind Schalldruck und Schallschnelle eng miteinander verknüpft. Bei rein nach rechts oder links laufenden, harmonischen Wellen, wird der Zusammenhang sehr einfach. Für eine rechts laufende Welle $p = \hat{p} \cdot \exp(i(kx - \omega t))$ erhalten wir

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \cdot i \cdot k \cdot \hat{p} \cdot \exp(i(kx - \omega t))$$

was aufintegriert

$$v(x, t) = -\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{i \cdot k}{-i \cdot \omega} \cdot \hat{p} \cdot \exp(i(kx - \omega t)) = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{k}{\omega} \cdot p(x, t)$$

ergibt. Beachten wir noch, dass $\omega/k = c_{ph}$, so erhalten wir

$$p = \rho_0 \cdot c_{ph} \cdot v = Z \cdot v$$

$$\text{mit } Z = \rho_0 \cdot c_{ph}.$$

Analog erhält man für eine nach links laufende, harmonische Welle $p = -Z \cdot v$ (die Schnelle v ist eine gerichtete Grösse, positives v heisst Bewegung in Ausbreitungsrichtung).

Die Grösse Z heisst Impedanz, gelegentlich auch Schallhärte oder Wellenwiderstand genannt. Sie liefert den Zusammenhang zwischen den Grundgrössen Schnelle und Druckschwankung analog zur Impedanz im elektrischen Kreis.

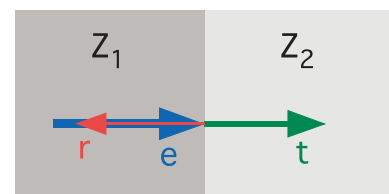
Der Index "ph" präzisiert sodann die Wellengeschwindigkeit noch etwas, es ist die sogenannte **Phasengeschwindigkeit** - die Geschwindigkeit, mit der sich die Wellenberge einer harmonischen Welle bewegen. Bei Wellen mit Dispersion (Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Wellenlänge/Frequenz) ist diese Geschwindigkeit nicht identisch mit der Geschwindigkeit, mit der sich z.B. Pulse ausbreiten (= Gruppengeschwindigkeit). Unsere Schallwellen sind aber dispersionsfrei, weshalb sich eine Unterscheidung im Prinzip erübrigt.

1.2. Reflexion und Brechung

1.2.1. Senkrechter Einfall auf Grenzfläche

Trifft eine Schallwelle auf eine Grenze zwischen zwei verschiedenen Medien, treten die analogen Phänomene auf, wie sie auch aus der Optik bekannt und vertraut sind: Reflexion und Brechung. Im Gegensatz zur Optik aber, wo der Brechungsindex beide Phänomene regiert, ist beim Schall die Phasengeschwindigkeit "verantwortlich" für die Brechung und die Impedanz für die Reflexion. Als erstes soll der senkrechte Einfall einer Schallwelle auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien diskutiert werden:

Von links kommend treffe eine Schallwelle mit Druckamplitude p_e und Schnelle v_e auf die Mediengrenze. Im Medium zwei mit Impedanz Z_2 ist das Verhältnis zwischen Druck p_t und Schnelle v_t folglich ein anderes. Gleichzeitig müssen aber an der Grenzfläche zwischen den beiden Medien Druck (Actio = Reactio) und Schnelle (kein Vakuum!!) übereinstimmen. Deshalb entsteht an der Grenzfläche eine dritte Welle, die reflektierte Teilwelle.



e: einfallend
t: transmittiert
r: reflektiert

Abbildung 2

An der Grenzfläche ($x=0$) gelten also die Stetigkeitsbedingungen

$$p_e(x=0,t) + p_r(x=0,t) = p_t(x=0,t)$$

$$v_e(x=0,t) + v_r(x=0,t) = v_t(x=0,t)$$

Ersetzt man in diesen Bedingungen die Schnelle mittels der Impedanz durch den Druck und berücksichtigt, dass in der nach links laufenden, reflektierten Welle die Schnelle das andere Vorzeichen hat, erhält man durch Auflösen eine Gleichung für den Amplituden-Reflexionskoeffizienten r

$$r = \frac{\hat{p}_r}{\hat{p}_e} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

und analog für den Amplituden-Transmissionskoeffizienten t

$$t = \frac{\hat{p}_t}{\hat{p}_e} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Ist $Z_2 < Z_1$, so wird der Reflexionskoeffizient negativ. Dies bedeutet, dass die reflektierte Welle gegenüber der einfallenden um 180° Phasen verschoben ist.

An einer Grenzfläche zwischen Luft ($c=340$ m/s, $Z=410$ kg/m²/s) und Wasser ($c=1500$ m/s, $Z = 1.5 \cdot 10^6$ kg/m²/s) wird $r = 0.9995$ und $t = 0.0005$. Dies bedeutet, dass eine Schallwelle an einer Luft-Wasser Grenzfläche fast vollständig reflektiert wird und nur 0.5% des einfallenden Schalldruckes oder $2.5 \cdot 10^{-7}$ der einfallenden Schallenergie ins Wasser eintreten kann.

Diese Reflexionseigenschaften sind die Basis der Anwendungen der Ultraschalltechnik. An allen Grenzflächen zweier Medien mit unterschiedlichen Impedanzen wird eine Ultraschallwelle teilweise reflektiert. Das führt zu einem Echo und diese Echos sind die Information, die ausgewertet werden kann, sowohl in der medizinischen Bilderzeugung als auch bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

1.2.2. **Schräger Einfall auf Grenzfläche**

Trifft eine Schallwelle schräg auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien, dann werden Reflexions- und Transmissionskoeffizient abhängig vom Einfallswinkel. Zusätzlich wird die ins Medium eintretende Welle ganz analog wie aus der Optik bekannt, gebrochen. Ist das Medium Z_2 zusätzlich ein Festkörper, so treten zwei gebrochene Wellen auf, eine longitudinale und eine transversale Welle. man nennt dieses Phänomen Modenkonversion.

Es gelten die üblichen, bereits aus der Optik bekannten Gesetze:

Reflexionsgesetz: $\alpha = \alpha'$

Brechungsgesetz: $\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{c_1}{c_2}$

Für c_2 ist je nachdem die longitudinale oder die transversale Schallgeschwindigkeit einzusetzen.

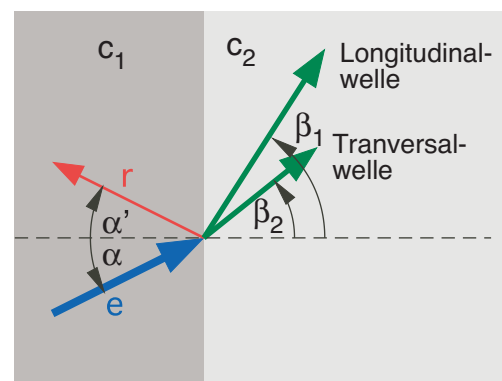


Abbildung 3

Selbstverständlich können hier auch die Reflexionskoeffizienten berechnet werden, worauf wir aber verzichten wollen.

1.3. Totalreflexion

Wie in der Optik, kann auch bei Schallwellen Totalreflektion vorkommen, wenn $c_2 > c_1$:

Bei einem Einfallswinkel mit $\sin(\alpha_{\text{krit}}) = c_1/c_2$ erreicht der Ausfallswinkel $\beta=90^\circ$, die Welle kann für $\alpha \geq \alpha_{\text{krit}}$ nicht mehr ins Medium 2 übertreten sondern wird vollständig reflektiert. Bei Festkörpern gibt es zwei solche kritische Winkel: Beim Eintritt in den Festkörper wird dieser Grenzwert zuerst für die longitudinale Welle erreicht (sofern $c_{2,L} > c_1$) und bei einem noch grösseren Einfallswinkel allenfalls auch noch für die Transversalwelle (sofern auch $c_{2,T} > c_1$).

1.4. Absorption

Schallwellen erfahren bei Ausbreitung in einem Medium auch eine Schwächung. Diese sind auf Absorption und auf Streuung zurückzuführen. Bei Absorption wird ein Teil der einfallenden Ultraschallwelle in andere Energieformen - typischerweise in Wärme - umgewandelt. Bei der Streuung strahlt ein Teilchen, das durch eine einfallende Welle zu Schwingung angeregt wird, selber wieder eine Welle in allen Richtungen aus.

Durch Absorption und Streuung nimmt der Schalldruck bei Durchgang durch ein Medium ab. Da wir uns, wie oben schon erwähnt, auf die lineare Theorie beschränken (keine Explosionen!!) gilt das Superpositionsprinzip. Die Schwächung ist damit unabhängig von der Schallamplitude \hat{p} und für **monochromatische Strahlung** gilt ein Exponentialgesetz (der Dämpfungsfaktor von zwei hintereinander gestellten, identischen Absorbern ist gleich dem Quadrat der Dämpfung eines einzelnen Absorbers)

$$\hat{p}(x) = \hat{p}_0 e^{-\mu \cdot x}.$$

Der Schwächungskoeffizient μ ist eine Materialkonstante, die zusätzlich von der Frequenz hängt. Je grösser die Frequenz, desto stärker sind Absorption und Streuung. Die entspricht auch der Alltagserfahrung: Niederfrequente Basstöne sind über viel grössere Distanzen hörbar als die hohen Töne. Diese Frequenzabhängigkeit spielt auch bei den technischen Anwendungen eine wesentliche Rolle: Durch geeignete Wahl der Ultraschallfrequenz kann die Eindringtiefe und damit der Untersuchungsbereich eingestellt werden.

1.5. Erzeugung von Ultraschall

Mit einem Ultraschallwandler können sowohl US-Wellen erzeugt als auch empfangen werden. Dazu wird meistens der piezoelektrische Effekt ausgenutzt: Gewisse Kristalle (Quarz, Bariumtitanat, Lithiumniobat, Turmalin...) und spezielle Polymere (z.B. PVDF) dehnen sich bei Anlegen einer el. Spannung proportional zur Spannung aus und geben umgekehrt auch eine Spannung ab, wenn sie durch äusseren Druck verformt werden. Ein Piezowandler kann folglich wahlweise als Sender oder Empfänger verwendet werden.

Den typischen Aufbau eines Ultraschallwandlers zeigt die Abbildung 4. Das aktive Element ist eine dünne Piezoscheibe, die beim Senden durch eine zugeführte elektrische Spannung zu einer Dickenschwingung angeregt wird. Die mechanischen Abmessungen bestimmen dabei die Resonanzfrequenz dieser Schwingung. Gegen vorne wird das Schwingelement durch eine Anpassungs- und Schutzschicht mit geeigneter Impedanz an die geplanten Anwendungen optimiert, seitlich und gegen hinten unterbinden Dämpfungselemente unerwünschte Schallausbreitung. Wenn umgekehrt eine Schallwelle die Piezoscheibe deformiert, kann an den Anschlüssen eine entsprechende Spannung abgegriffen werden.

Mit einem geeigneten Verstärker erhält man damit ein direktes Abbild der Druckschwankungen.

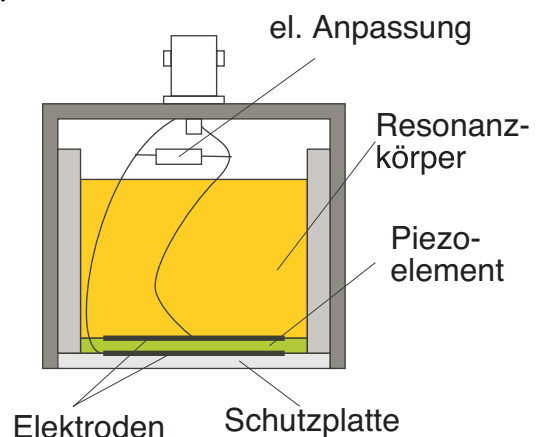


Abbildung 4 : Ultraschallwandler

1.6. Ultraschall Messprinzipien

1.6.1. A-Scan

Bei diesem eindimensionalen Verfahren werden kurze Ultraschallimpulse ausgesendet. Diese werden an Mediengrenzen teilweise reflektiert und zum Sender zurückgeworfen. Aus der Zeitdauer zwischen Sendepuls und Echo kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Distanz zwischen Sender und Mediengrenze bestimmt werden. Eine typische Schwierigkeit ist das Auftreten von Mehrfach-Echos. Es ist nicht ohne weiteres zu unterscheiden, ob diese von Mehrfachreflexion an einer einzelnen Struktur oder von Unterschiedlichen Strukturen in verschiedener Tiefe herrühren.

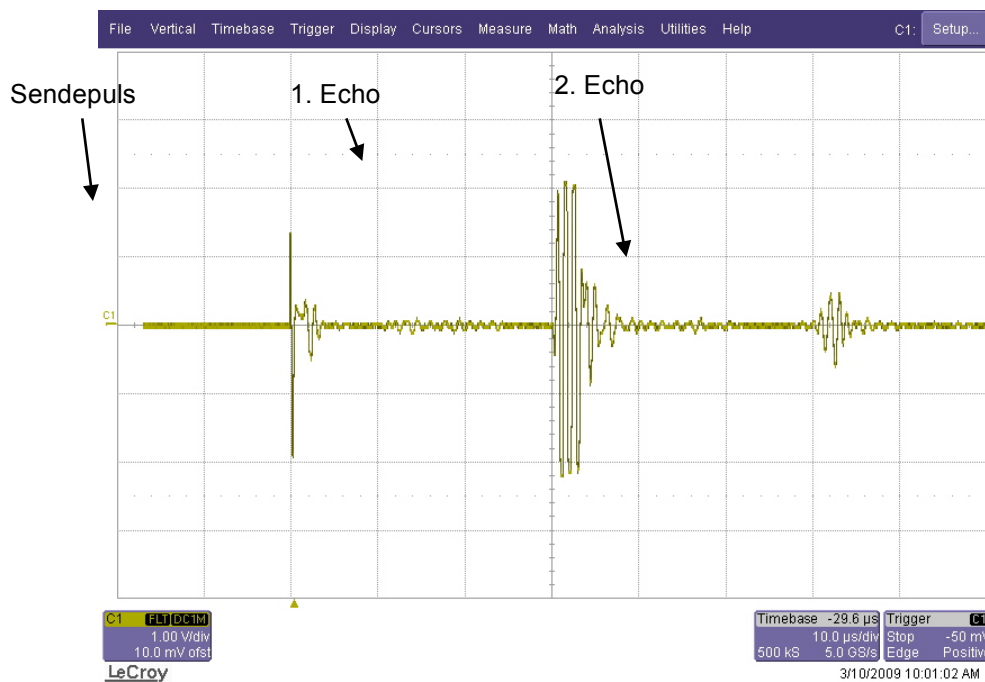


Abbildung 5 : Ultraschall Echo Signal

Diese Technik wird in der Werkstoffprüfung verbreitet eingesetzt. Echos entstehen an Fehlstellen in einem Werkstück wie Rissen, Lunkern oder Einschlüssen eines Fremdstoffes. Auch die Wanddicken von Bauteilen können mit dieser Technik vermessen werden.

Das Auflösungsvermögen wird durch die Länge des Pulses begrenzt. Um sauber getrennt werden zu können, müssen Echos mindestens 2 Perioden des Ultraschallsignals auseinander liegen. In Wasser mit einer Schallgeschwindigkeit von etwa 1500 m/s (was auch die Grössenordnung von menschlichem Gewebe ist) erhält man bei einer Schallfrequenz von 1 MHz eine Auflösung von etwa 3 mm. Für ein möglichst gute Auflösung werden also hohe Frequenzen benötigt. Begrenzt werden diese aber durch die mit zunehmender Frequenz grösser werdende Absorption, welche die Eindringtiefe und damit den erreichbaren Untersuchungsbereich beschränkt.

1.6.2. B-Scan

Bei diesem Verfahren werden zweidimensionale Bilder erzeugt. Das Prinzip zeigt die nachfolgende Abbildung 6. Der Ultraschallwandler wird über einen Prüfling hinwegbewegt. Während dieser Bewegung empfängt er die Echos von Mediengrenzen und zeichnet die Laufzeit dieser Echos in einem Graphen auf der y-Achse gegen den Ort auf der x-Achse auf. In dieser Art entsteht ein Schnittbild durch den Prüfling. Die Stärke der Echos wird dabei als Grauwert angezeigt.

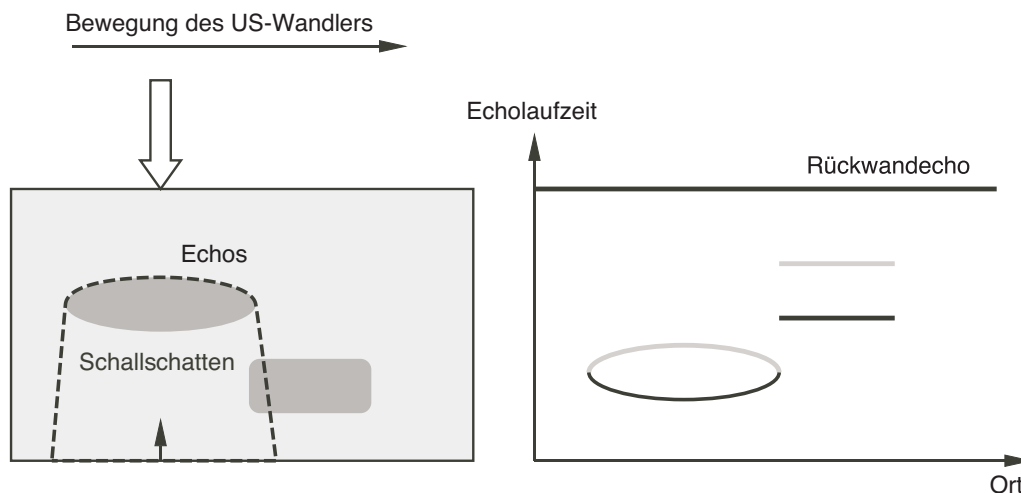


Abbildung 6 : Prinzip des B-Scans

Um die mit der Tiefe zunehmende Absorption auszugleichen, wird eine mit grösserer Laufzeit zunehmende Verstärkung verwendet. Dadurch erhält man ausgeglichene Bilder.

Problematisch bei diesem Verfahren ist die Möglichkeit von Schallschatten. Sind an einer Grenzfläche die Impedanzen stark verschieden (z.B. ein Hohlraum in einem Metall), so wird an der ersten Grenzfläche der Schall praktisch vollständig reflektiert und darunter liegende Strukturen werden unsichtbar. Bei ähnlichen Impedanzen (wie z.B. in der Medizin verschiedene Gewebearten) wird ein Teil des Schall durchgelassen, sodass auch untereinander liegende Strukturen erkannt werden können.

Das Auflösungsvermögen in axiale und laterale Richtung bezüglich der Schallausbreitung ist unterschiedlich: In axialer Richtung wird es, wie beim A-Scan bereits beschrieben, durch die Frequenz des Schallsignales bestimmt. In lateraler Richtung wird es durch die Breite der Schallkeule begrenzt. Diese wird in erster Linie bestimmt durch die Wellenlänge (Beugung) sowie Form und Grösse des Piezokristalles und kann zusätzlich durch eine gekrümmte Anpassungsschicht (=Ultraschalllinse) konstruktiv beeinflusst werden.

Zur technischen Realisierung der Bewegung des Schallkopfes wurde in früheren Geräten der Piezokristall mechanisch über einen gewissen Winkelbereich hin und her geschwenkt. Das erzeugt die bekannten Sectorscan Bilder (Abbildung 7). Moderne Ultraschallköpfe verwenden einen Phased Array. Dabei werden viele Piezokristalle auf einer Linie angeordnet. Die einzelnen Kristalle werden durch eine elektronische Steuerung zeitversetzt zum Aussenden eines Schallpulses angeregt und erzeugen so ebenfalls einen Scan über den Prüfling.

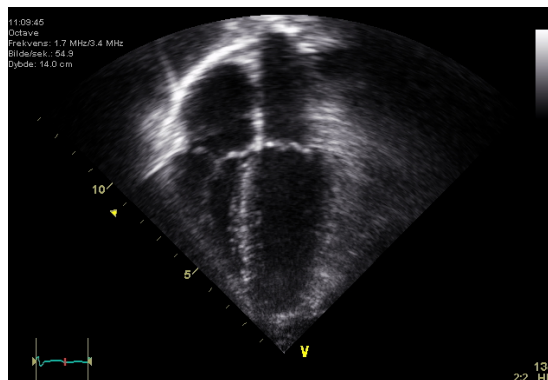


Abbildung 7 : Ultraschallbild eines menschlichen Herzens (Quelle: http://de.wikibooks.org/wiki/Sonographie:_Herz)

2. Durchführung der Experimente

2.1. Die Messapparatur

Die Messapparatur besteht aus

- je zwei Schallköpfen mit Frequenz 1 MHz(blau) und 4 MHz(grün),
- dem Echoskop zur Erregung der Schallsonden und Messung der Echos,
- einer Auswertesoftware AScan und
- verschiedenen Prüfkörpern.



Abbildung 8 : Ultraschall Echoskop Gampt Scan

Bedienelemente am Echoskop

- 1 Anschlüsse für die Ultraschallsonden. Wird mit Reflexion gemessen, wird nur eine Sonde benötigt und diese wird im linken Stecker angeschlossen, wird mit Transmission gemessen, so ist der linke Anschluss für den Sender und der rechte für den Empfänger
- 2 Umschaltung zwischen Reflexion und Transmission
- 3 Einstellung der Intensität des ausgesandten Pulses
- 4 Einstellung der Verstärkung am Empfänger
- 5 An den 4 Knöpfen in diesem Bereich kann die laufzeitabhängige Verstärkung parametrisiert werden
- 6 BNC Buchsen für den Anschluss eines externen KO's

Die Auswertesoftware AScan erzeugt zwei Graphiken: Die obere Graphik gibt das Signal des empfangenden Schallsensors wieder, die untere Graphik zeigt den laufzeitabhängigen Triggerpegel, wie er mit dem Bedienfeld 5 am Echoskop eingestellt werden kann. Das Messsignal kann dargestellt werden entweder als Hochfrequenzsignal mit der vollen Auflösung des US-Pulses (rote Kurve in Abbildung 9) oder nur als Amplitudensignal (blaue Kurve). Zusätzlich werden die Parameter der Messung in Textform dargestellt.

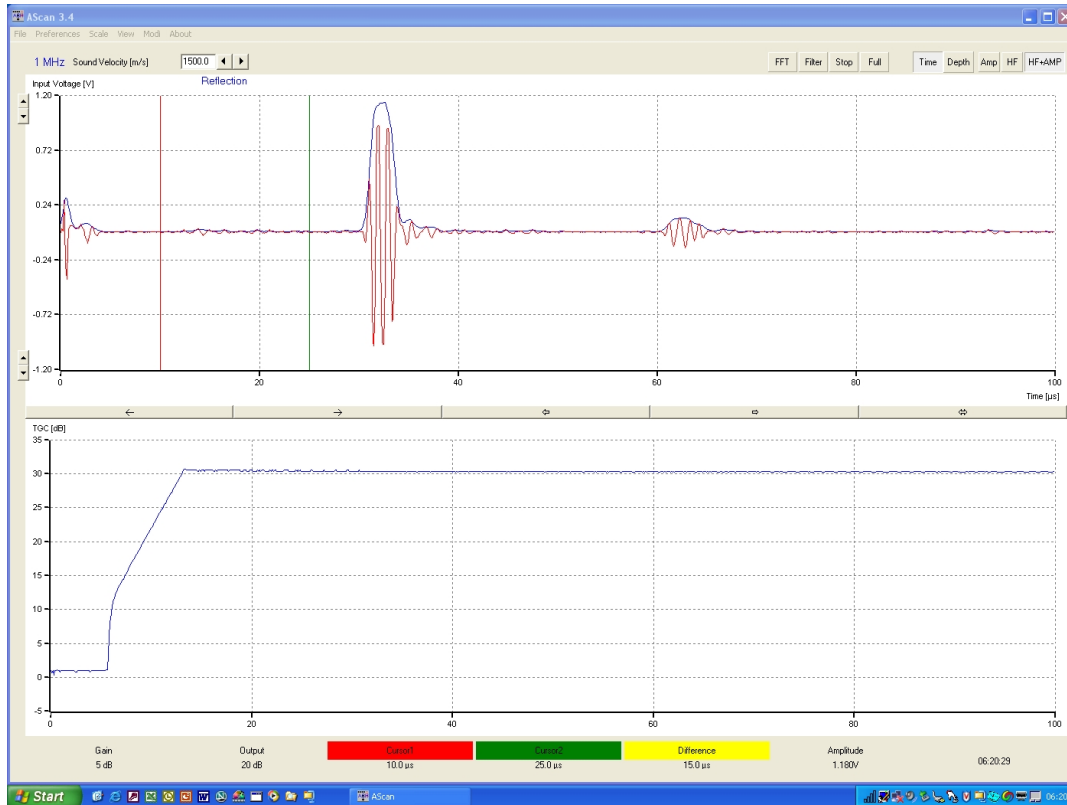


Abbildung 9 : Auswertesoftware AScan

Die wichtigsten Bedienelemente sind

- Unter "Modi" kann die Datenerfassung für einen B-Scan angewählt werden.
- Die Umschaltung zwischen HF-Signal/Amplitudensignal oder beide erfolgt mit den Knöpfen oben rechts. Wählen Sie die Darstellung von beidem!
- Mit der Auswahl Time/Depth ebenfalls oben rechts kann die Anzeige auf der x-Achse wahlweise als Zeit oder - unter Eingabe einer Schallgeschwindigkeit - als Distanz angezeigt werden.
- Die beiden Cursor können mit der Maus verschoben und zur präzisen Ablesung von Zeitabständen verwendet werden.
- Mit der Maus können auch Amplitudenwerte präzise vermessen werden.
- Mit **Full**/Half kann die x-Achse um den Faktor 2 skaliert werden. Mit den Pfeiltasten zwischen den beiden Graphiken kann die Anzeige verschoben und gezoomt werden.
- Mit der Stop Taste kann die kontinuierliche Aktualisierung der Anzeige angehalten und eine Messung zur genauen Analyse eingefroren werden. Der gleiche Knopf startet die Messung auch wieder.

2.2. Durchführung der Experimente

2.2.1. Allgemeines

Starten Sie zuerst das Programm AScan bei ausgeschaltetem Echoskop. Nach dem Aufstarten schalten Sie das Echoskop Gampt ein und wählen im Menüfeld Preferences Data Transfer. Damit wird die USB Kommunikation zwischen dem Messgerät und dem PC hergestellt.

Da eine Mediengrenze zwischen einer Flüssigkeit/Festkörper und Luft zu fast vollständiger Reflexion führt, muss zwischen einem Prüfkörper und dem Schallwandler immer ein Kontaktgel aufgebracht werden. Diese Kontaktgels bestehen zum grössten Teil auch aus Wasser, das aber mit Zusatzstoffen dickflüssig und haltbar gemacht wird. Wasser würde diesen Zweck grundsätzlich auch erfüllen, ist aber in der Handhabung wegen der geringen Viskosität unpraktisch. Bringen Sie bei allen Messungen einen Tropfen dieses Gels auf den Schallwandler auf. Achten Sie darauf, dass die Berührungsfläche zwischen Schallkopf und Probenkörper vollständig mit Kontaktgel bedeckt wird, um eine optimale Ankopplung zu erreichen. Reinigen Sie anschliessend alle Teile wieder mit dem beiliegenden Lappen bevor das Gel eintrocknet.

Der Sendepuls wird zur Zeit $t = 0$ ausgelöst und dauert einige wenige Perioden. Deshalb soll die Auswertung von Echolaufzeiten immer am Anfang des Echos erfolgen. Der Sendepuls selbst wird nur schwach dargestellt, weil er durch den Triggerpegel sehr stark unterdrückt wird. (siehe Abbildung 9).

Da die Echolaufzeit auch die Laufzeit im Schallwandler enthält, enthalten alle Laufzeiten einen konstanten, kleinen Offset. Eine genaue Bestimmung der Schallgeschwindigkeit erfordert deshalb mehrere (mindestens zwei) Messungen über verschiedene Distanzen, um den Offset mittels linearer Regression herauswerfen zu können.

Wählen Sie zu Beginn jeder Messserie einen optimalen Pegel für Sendepuls und Verstärkerempfindlichkeit: Der Sendepuls ist bei kleinerem Ausschlag auch kürzer und damit die Auflösung besser. Andererseits muss er stark genug sein, um trotz der Dämpfung ein gut auswertbares Echo zu erhalten. Die Verstärkerempfindlichkeit sollte idealerweise so gewählt werden, dass das Echosignal nicht übersteuert ist, d.h. $\leq 1V$.

2.2.2. Zur Messung der Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle

Bei diesem Experiment durchläuft eine Ultraschallwelle eine dünne, im Wasser schräg gestellte Platte aus PMMA. Wegen dem Einfallswinkel entsteht in der Platte sowohl eine longitudinale als auch eine transversale Schallwelle. Da sich deren Schallgeschwindigkeiten um rund einen Faktor 2 unterscheiden (siehe 1.1.3), werden Sie unterschiedlich stark gebrochen.

Wegen unterschiedlichen Weg und Schallgeschwindigkeit erhält man zwei verschiedene Echos mit Zeitunterschied Δt . Aus diesem Zeitunterschied lässt sich - bei Kenntnis der longitudinalen Schallgeschwindigkeit in PMMA und der Schallgeschwindigkeit in Wasser, die Geschwindigkeit der transversalen Welle bestimmen.

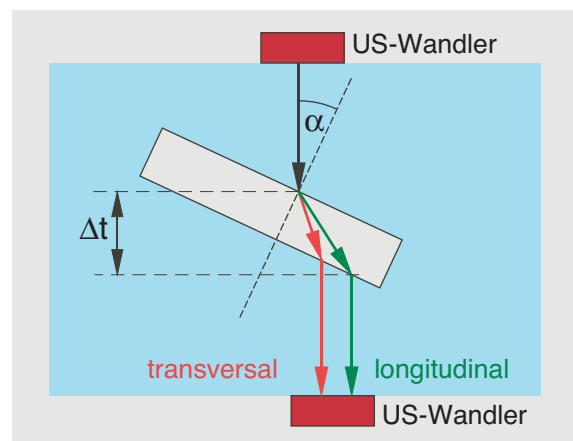


Abbildung 10 : Messung der Transversalwellen

3. Messaufgaben und Auswertung

Den genauen Umfang der durchzuführenden Messungen sprechen Sie mit Ihrem Dozenten ab.

Vorbereitung :

1. Berechnen Sie vorab aus Literaturdaten die Wellenlänge der Ultraschallwelle in Luft, Wasser und Aluminium für 1 MHz und 4 MHz Schallfrequenz und zum Vergleich für eine hörbare Frequenz von 1 kHz.
2. Zum Transversalwellenversuch: Leiten Sie aus geometrischen Überlegungen eine Formel ab, die den Zeitunterschied Δt als Funktion des Einfallswinkels α , der Plattendicke s und der drei einflussenden Schallgeschwindigkeiten angibt (Abbildung 10)
3. Machen Sie sich mit der Messapparatur und der Auswertesoftware vertraut, indem Sie einige erste qualitative Versuche durchführen. Die Bedienungsanleitung der Geräte liegt bei.

Messaufgaben :

(Als Backup sollen von jeder Messung die Daten und ein Screenshot abgespeichert werden. Auch wenn Sie diese ev. später nicht benötigen, ist dies in vielen Fällen hilfreich.)

1. Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in PMMA

Bestimmen Sie die Laufzeit für die drei unterschiedlich langen PMMA Zylinder in Transmission mit der 1 MHz Sonde und mit der 4 MHz Sonde. Zur Auswertung benötigen Sie die Länge der drei Zylinder.

2. Ultraschalldämpfung in PMMA

Bestimmen Sie die Amplitudenhöhe bei Durchschallung durch die drei PMMA Zylinder mit der 1 MHz Sonde und mit der 4 MHz Sonde.

3. Schallgeschwindigkeit in Metallen

Die Dämpfung der Ultraschallwelle in Metallen ist im Vergleich zu PMMA sehr gering. Aus diesem Grunde können bei den Metallzylindern im Reflexionsmodus mehrere Echos beobachtet und vermessen werden. Der Zeitoffset aufgrund der Laufzeit im Sensor ist bei allen Echos identisch und kann somit bei Beobachtung von zwei oder mehr Echos rechnerisch eliminiert werden.

Wenn Sie mit der 1 MHz-Sonde einen Metallzylinder untersuchen werden Sie bemerken, dass das entsprechende Bild sehr schlecht interpretierbar ist, dass es viele "Geistersignale" enthält. Wesentlich besser geht es mit der 4MHz-Sonde. Dies ist wahrscheinlich auf den grösseren Abstrahlwinkel und Reflexion an den Wänden bei der 1MHz-Sonde zurückzuführen. Dokumentieren Sie dies für einen der Zylinder und untersuchen Sie die anderen nur mit der 4MHz-Sonde.

4. Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

Zur Messung steht ein Plexiglasgefäß mit cm-Marken und ein "Ultraschallspiegel" (Aluplatte) zur Verfügung. Bestimmen Sie im Reflexionsmodus die Echolaufzeit für etwa 5 Spiegelpositionen.

Welche Flüssigkeiten bei welcher Temperatur untersucht werden sollen, wird Ihnen vom entsprechenden Dozenten mitgeteilt. Bei Salz-, Zucker- und anderen Lösungen soll auch noch die Dichte der Lösungen bestimmt werden, damit das Kompressionsmodul aus Schallgeschwindigkeit und Dichte in Funktion der Konzentration berechnet werden kann.

5. Transversalwellen

- a. Als erstes bestimmen Sie den Grenzwinkel der Totalreflexion für die longitudinale Welle. Das Bestimmen des Winkels, bei dem das longitudinale Signal verschwindet, ist relativ ungenau. Gleichzeitig mit dem Verschwinden des Signals gibt es aber auch ein schmales Maximum im reflektierte Signal, das sich sehr viel genauer lokalisieren lässt. Da es einen kleinen Offset zwischen Plattenstellung und Winkelskala gibt, müssen Sie diesen Winkel beidseitig bestimmen.
- b. Messen Sie die Zeitverzögerung zwischen der longitudinalen und der transversalen Welle als Funktion des Einfallswinkels in 5° Schritten und ebenfalls beidseitig.

6. Fehlstellenortung

Um ein Schnittbild des Probekörpers zu erhalten, wählen Sie den Modus B(rightness). Starten Sie die Datenerfassung und fahren Sie mit dem Schallkopf in einer langsamen und konstanten Bewegung über die Stirnfläche des Probenkörpers. Machen Sie mehrere Aufzeichnungen und experimentieren Sie mit den Triggereinstellungen, um ein homogenes Bild zu erhalten. Dokumentieren Sie je eine Aufnahme mit dem 1 MHz und dem 4 MHz Wandler. Damit die angegebene Tiefe korrekt ist, muss selbstverständlich die richtige Schallgeschwindigkeit ins Programm eingegeben werden.

Auswertung:

1., 3., 4. : Berechnung der Schallgeschwindigkeit aus Laufzeitmessungen

Im Experiment wird die Laufzeit t in Funktion der Wegstrecke x bestimmt. Die Steigung einer linearen Regression ist somit die inverse Schallgeschwindigkeit. Fitten Sie die Funktion $t = 1/c \cdot x + b$ an die Messdaten, so erhalten direkt die Schallgeschwindigkeit c .

Bei Flüssigkeiten soll mit Hilfe der Dichte zusätzlich das Kompressionsmodul berechnet werden. Für reines Wasser finden Sie die (temperaturkorrigierte) Dichte unter http://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers

2. Bestimmen Sie den Schwächungskoeffizienten μ , indem Sie eine Exponentialfunktion an die Amplitude in Funktion der Weglänge fitten. Präsentieren Sie das Ergebnis in einem halblogarithmischen Graphen und geben Sie das Ergebnis in der Form Dezibel/Meter an.
5. Die Auswertung geschieht in 3 Schritten:
 - a. Aus dem Grenzwinkel der Totalreflektion bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit für die Longitudinale Welle.
 - b. Mit der Gleichung für die Zeitverzögerung, die Sie im Punkt 2 der Vorbereitung hergeleitet haben, fitten Sie die Schallgeschwindigkeit der transversalen Welle. Bei diesem Fit müssen Sie ebenfalls einen Offsetfehler der Winkelanzeige einführen und fitten.
 - c. Aus den beiden Schallgeschwindigkeiten bestimmen Sie den E-Modul und die Poissonzahl des verwendeten PMMA. Vergleichen Sie mit Literaturwerten.
6. Vergleichen Sie die über Ultraschall ermittelten Positionen mit einer direkten mechanischen Messung.
Vergleichen Sie das Ultraschallbild mit den geometrischen Angaben des Prüfstückes. Analysieren und kommentieren Sie, welche Fehlstellen sichtbar sind und welche nicht.

Weitere mögliche Experimente (Zukunft)

Quantitative Bestimmung des axialen und lateralen Auflösungsvermögens mit einem entsprechenden Prüfkörper

Auffinden und untersuchen von Fehlstellen im Material, die von aussen nicht direkt beobachtet werden können.

	Longitudinal	L2	Transversal	Rayleigh
Stahl	6100			
Aluminium	6420	6420	3040	
Kupfer	3901/4760	4760	2325	
Messing	3475/4700	4700	2110	
PMMA				
Glas	3962	5968	3764	
Flint	3980			
Kron	5100			
Pyrex	5640			
Eisen	5130/5950			
Alkohol	1103 1207			
Methyl				
Ethyl				
Glycerol	1904			
Polyethylene		1950 2460	540	
Polysterene		2350	1120	
Nylon		2600		
PVC		2395		