

Ultraschall in Festkörpern (FP12)

In diesem Versuch werden Verfahren der Ultraschalldiagnostik verwendet, um die Ausbreitung, Reflexion, Dämpfung und Dispersion von Schallwellen in Festkörpern zu untersuchen, die mit deren elastischen Eigenschaften eng verknüpft sind. Unter anderem werden mit dem Impuls-Echo-Verfahren bei verschiedenen Ultraschallfrequenzen Materialfehler in einem Probekörper detektiert, longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeiten in Aluminium gemessen, Risstiefen an unzugänglichen Oberflächen mit Winkelecho und TOFD-Methode bestimmt und mittels Rayleighwellen Oberflächendefekte untersucht.

Erforderliche Vorkenntnisse:

1. Ultraschall, Frequenzbereich und Erzeugung, piezoelektrischer Effekt
2. Schallfeldgrößen (Auslenkung, Geschwindigkeit, Schalldruck, akustische Impedanz, Schallschnelle, Intensität, Spur)
3. Reflexionskoeffizient, Transmissionskoeffizient, Brechungsgesetz, Schalldämmung und Schalldämpfung
4. Schallausbreitung und -absorption in Festkörpern (Mechanismen der Schalldämpfung im Festkörper, Phononstreuung an Störstellen und Defekten, inelastische Phonon-Phonon-Wechselwirkung)
5. Ultraschalldiagnoseverfahren
6. Auflösungsvermögen (axial, lateral), Ultraschallfeld eines kreisförmigen Wandlers
7. elastische Konstanten E, G, K , verallgemeinertes Hooksches Gesetz, Poissonsche Zahl ν (Querkontraktionskoeffizient)

Theoretischer Hintergrund

In der Praxis werden Ultraschallwandler (auch Schallköpfe oder Transducer genannt) durch einen sehr kurzen elektrischen Spannungsimpuls zu einer kurzzeitigen mechanischen Dickschwingung (Resonanzfrequenz) und damit zum Aussenden eines Ultraschallimpulses angeregt (reziproker piezoelektrischer Effekt). Die aus dem angekoppelten Medium auf denselben Wandler auftreffende Ultraschallwellen bewirken geringe Deformationen des Wandlers, die in dem piezoelektrischen Material in elektrische Spannungen umgewandelt werden (direkter piezoelektrischer Effekt). Ein und derselbe Wandler **kann** also sowohl als Sender als auch als Empfänger genutzt werden. Technische Anwendungen des Verfahrens finden sich vor allem in der Medizin, der Materialprüfung und als Echolot in der Schifffahrt. Während sich in flüssigen und gasförmigen Medien nur longitudinale Schallwellen ausbreiten, ist in Festkörpern auch die Ausbreitung transversaler Schallwellen (verallgemeinertes Hooksches Gesetz; Scherkräfte) möglich. Im Versuch werden Schallköpfe eingesetzt, die Longitudinalwellen erzeugen. Transversalwellen lassen sich im zu untersuchenden Festkörper erzeugen, wenn nicht senkrecht, sondern unter bestimmten Winkeln eingestrahlt wird.

Ultraschallverfahren

Ultraschallechos lassen sich auf verschiedene Weise auf einem Oszillographen- bzw. Computerbildschirm darstellen. Folgende Verfahren werden unterschieden:

- A-Bild (Amplitudenbild), A-Scan: Das reflektierte Ultraschall-Signal wird als vertikale Auslenkung auf dem Bildschirm dargestellt. Die horizontale Position entspricht der Echo-Laufzeit, d.h. der Eindringtiefe, und die Amplitude der Echointensität. Gleichzeitig mit dem Aussenden der akustischen Impulse vom Wandler wird auf dem Bildschirm eine Zeitlinie gestartet. An ihrem Beginn erscheint der Sendepuls. In der Sendepause zwischen den Anregungsimpulsen werden die rückgestreuten Echos empfangen. Nach Verstärkung werden sie über der Zeitlinie als Signale wiedergegeben.
- B-Bild (Brightness), B-Scan: Das reflektierte Ultraschall-Signal erscheint ebenfalls als Funktion der Laufzeit auf dem Bildschirm, jedoch entspricht die Punkthelligkeit der Echointensität. Durch die Abtastung eines Bereichs wird eine zweidimensionale (Schnittbild-) Darstellung erreicht. Anwendung: Bilddarstellung ohne Anwendung ionisierender Strahlung.
- Time-Motion (TM) Scan: Die Ultraschallpulse werden in zeitlich konstanten Abständen gesendet und die Echos einer Grenzfläche (A-Scans) aufeinanderfolgend dargestellt. Damit werden Informationen zum zeitlichen Ablauf von Bewegungen im durchschallten Gewebe möglich. Anwendung: Herzdiagnostik, Echokardiographie: TM in Kombination mit dem Dopplerverfahren.
- Doppler-Verfahren: Bewegen sich Sender (Schallquelle) und Empfänger einer Welle relativ zueinander, so unterscheiden sich die Frequenzen von gesendeter und empfangener Welle (Doppler-Effekt). Für einen ruhenden Beobachter ergibt sich für einen mit der Geschwindigkeit v bewegten Sender (Frequenz f_S) die Doppler-Frequenz nach der Beziehung: $f_{Doppler} = f_S / (1 \pm v/c)$, wobei c die Schallgeschwindigkeit ist. Der Doppler-Effekt tritt auch an einer reflektierenden Grenzschicht zu einem mit der Geschwindigkeit v bewegten Medium auf. Die beobachtete Frequenzdifferenz $\Delta f = f_S - f_E$ (f_E Empfängerfrequenz) ist dann zusätzlich vom Einstrahlungswinkel φ abhängig, so dass $\Delta f = 2f_S(v/c) \cos \varphi$. Anwendungen: Messung der Strömungsgeschwindigkeit in Blutgefäßen, Erkennung von Gefäßverengungen (Stenosen).

Reflexion und Transmission an Grenzflächen bei senkrechtem Einfall, Absorption

Ultraschallechos werden an Grenzflächen, an denen Stoffe mit unterschiedlicher akustischer Impedanz aufeinander treffen, durch Reflexion erzeugt. Unter akustischer Impedanz $Z = \rho c$ (Schallkennimpedanz, akustischer Widerstand) versteht man das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit des entsprechenden Materials. Da die longitudinale Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten primär von deren adiabatischer Kompressibilität und in Festkörpern vom Elastizitätsmodul sowie der Poissonschen Querkontraktionszahl abhängt, spiegelt die akustische Impedanz die elastischen Materialeigenschaften wider. Änderungen oder Sprünge der akustischen Impedanz an Grenzflächen längs der Ausbreitungsrichtung führen zu einer teilweisen Reflexion der akustischen Energie und damit gleichzeitig zu einer Schwächung in Ausbreitungsrichtung (Schalldämmung).

Für das Reflexionsvermögen R bei senkrechtem Einfall einer Schallwelle aus dem Medium 1 (Impedanz Z_1) auf eine Grenzfläche zum Medium 2 (Impedanz Z_2) gilt:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2,$$

wobei I_0 die einfallende und I_R die reflektierte Intensität sind. Der durch die Grenzfläche hindurchgehende Anteil T ist dann $T = 1 - R$. Beim weiteren Durchgang der Schallwelle durch das Medium 2 (meist das zu untersuchende Material) erfolgt eine Dämpfung der Schallwelle, die von der Temperatur und der Frequenz abhängig ist und sich gut mit dem Beerschen Absorptionsgesetz beschreiben lässt, so dass:

$$T(x) = (1 - R) \exp(-\mu(f)x),$$

wobei x die Dicke des Materials ist und μ der Dämpfungskoeffizient. Für die Frequenzabhängigkeit des Dämpfungskoeffizienten gilt

$$\mu = \mu_0 f^n ,$$

mit μ_0 als frequenzunabhängigen Dämpfungskoeffizient und n als Grad der Frequenzabhängigkeit. Eine Ursache für die Schalldämpfung in Festkörpern ist die elastische Streuung der Schallwelle an Defekten. Da diese Punktdefekte (Leerstellen, Zwischengitteratome) atomare Abmessungen haben und wesentlich kleiner als die Wellenlänge sind, handelt es sich um Rayleigh-Streuung, bei der die Streuintensität mit ω^4 wächst. Eine weitere Ursache für die Dämpfung ist die inelastische Phonon-Phonon Streuung (Drei-Phonon-Prozesse) als Folge der Anharmonizität des Gitters. Der Streuquerschnitt ist dabei nicht durch die Auslenkung der Atome, sondern durch die Abstandsänderung zwischen den Atomen bestimmt (Stichwort: Dehnungstensor). Bei gleichsinniger Auslenkung der Atome spielt die Anharmonizität keine Rolle. Der Streuquerschnitt wächst mit der Frequenz des Ultraschallphonons und der Frequenzen der beiden anderen beteiligten Phononen, die aus Impuls- und Energieerhaltungsgründen aus unterschiedlichen Zweigen der Phonondispersionsrelationen stammen. Daraus ergibt sich auch eine starke Temperaturabhängigkeit der Dämpfung. In amorphen Festkörpern trägt zusätzlich die resonante Wechselwirkung zwischen Schallwellen und sogenannten Tunnelzentren (Zwei-Niveau-Systeme) zur Dämpfung bei.

Schräger Einfall, Brechungsgesetz, longitudinale und transversale Schallwellen

Trifft eine Schallwelle schräg auf die Grenzfläche zweier Medien, so wird ebenfalls ein Teil reflektiert und ein Teil dringt in das andere Medium ein. Die eindringende Schallwelle wird gebrochen. Es gilt - in Analogie zur Optik - folgendes Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} ,$$

wobei α_1 der Einfallswinkel der Schallwelle aus dem Medium 1 mit der Schallgeschwindigkeit c_1 und α_2 der Einfallswinkel der Schallwelle in das Medium 2 mit der Schallgeschwindigkeit c_2 sind. Das Medium mit der größeren Schallgeschwindigkeit heißt akustisch dünneres Medium. Auf Grund der Geschwindigkeitsverhältnisse wird z.B. (im Gegensatz zu unseren Erfahrungen aus der Optik) beim Übergang einer Schallwelle von Luft in Wasser die Schallwelle vom Lot weg gebrochen, da die Schallgeschwindigkeit im Wasser größer als die der Luft ist.

In Festkörpern wird auf Grund der bei der Durchschallung auftretenden Torsionskräfte (verallgemeinertes Hooksches Gesetz, G -Modul Tensor) durch die longitudinale Schallwelle (auch Druck- oder Dilatationswelle genannt) auch eine transversale Schallwelle (auch Schub- oder Scherwelle genannt) erzeugt. Die Beziehung zwischen E (Elastizitätsmodul), G (Torsionsmodul) und K (Kompressionsmodul) ist in isotropen Werkstoffen über die Poissonsche Zahl ν des Materials gegeben:

$$E = 2(1 + \nu)G = 3(1 - 2\nu)K .$$

Die longitudinale Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus:

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

und für das Verhältnis der transversalen c_T zur longitudinalen Schallgeschwindigkeit c_L gilt:

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)}} .$$

Die transversale Schallgeschwindigkeit ist kleiner als die longitudinale. Um beide Wellen zum Beispiel in Stahl ($c_L = 5700$ m/s und $c_T = 3120$ m/s) zu erzeugen, muss die Ultraschallwelle unter einem Winkel eingekoppelt werden. Dazu setzt man auf den Ultraschallgeber, der eine longitudinale Welle erzeugt, einen Winkelkopf auf (z.B. aus Acrylglas mit $c_L = 2700$ m/s), in den zwar vom Ultraschallgeber senkrecht eingekoppelt wird, aber dann unter einem bestimmten Winkel aus- und

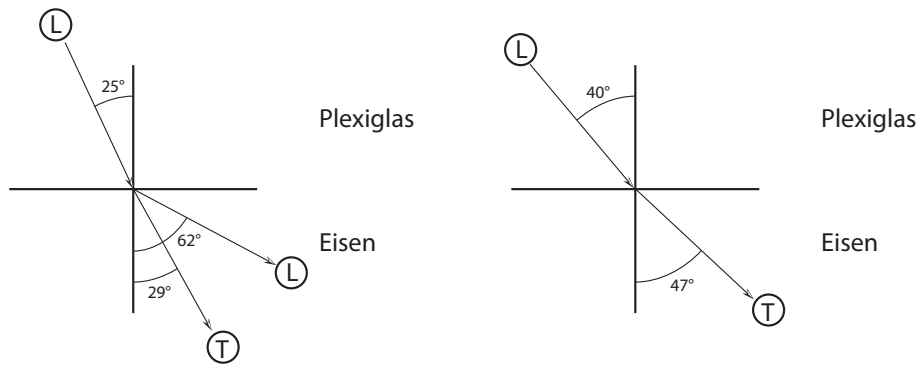


Abbildung 1: Übergang einer Longitudinalwelle bei zwei unterschiedlichen Einfallswinkeln von Acrylglas in Stahl

in ein weiteres Material eingekoppelt werden kann. In der Abbildung 1 sind die Verhältnisse für den Übergang einer longitudinalen Schallwelle von Acrylglas in Stahl für zwei verschiedene Einfallswinkel gezeigt. Beim Einfallswinkel von 25° werden im Stahl gemäß dem Brechungsgesetz longitudinale und transversale Schallwellen angeregt, die sich in unterschiedlichen Richtungen (man spricht hier dann von Einschallwinkeln) im Stahl ausbreiten (und nach Reflexionen im Material oder an dessen Endflächen unterschiedliche Echos hervorrufen). Für den Einfallswinkel von 40° tritt für die longitudinale Welle bereits Totalreflexion auf, so dass sich im Stahl nur noch die transversale Schallwelle ausbreiten kann.

Oberflächenwellen

Oberhalb bestimmter Einschallwinkel sind nur noch Oberflächenwellen anregbar. Diese Oberflächenwellen, auch Rayleighwellen genannt, sind mit einem besonderen Trick jedoch sehr effektiv anregbar, wenn ein spezieller kammförmiger Kopf (Rayleighwellenkopf) verwendet wird, der die Schallspur auf der Oberfläche resonant anregt. Die Abmaße der Kammstruktur (eine Art Gitterkonstante) müssen dabei jedoch für genau einen Materialübergang (z.B. Acryl-Aluminium) und für eine bestimmte Schallfrequenz berechnet sein. Die Kammstruktur liegt dabei senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Die Rayleighwellen sind verwandt mit den Oberflächenwellen flüssiger Medien, sie breiten sich an freien Oberflächen ungedämpft aus und ihre Intensität nimmt mit der Eindringtiefe in beide Medien exponentiell ab. Die schwingenden Teilchen beschreiben elliptische Bahnen, deren Hauptachsen parallel und senkrecht zur Oberfläche liegen. Der Wellenvektor ist zur Oberfläche leicht geneigt. Die Schallgeschwindigkeit der Rayleighwellen ist praktisch identisch mit der transversalen Schallgeschwindigkeit. Die Rayleighwellen sind sehr gut geeignet, um Defekte (Risse, Ungängen) an der Oberfläche festzustellen. Bei einer solchen Untersuchung werden Sender und Empfänger, jeweils mit Rayleighwellenkopf ausgestattet, im festen Abstand über die Oberfläche gezogen und die Amplituden der transmittierten Rayleighwelle vermessen.

Auflösungsvermögen

Die Länge des Sendeimpulses in Ausbreitungsrichtung und seine Abmessungen quer zur Ausbreitungsrichtung haben entscheidenden Einfluss auf die Bildqualität. Den Kehrwert des Abstands zweier Strukturen, die im Reflexionssignal gerade noch getrennt werden können, bezeichnet man als Auflösungsvermögen. Man unterscheidet das axiale (in Ausbreitungsrichtung) und das laterale (quer zur Ausbreitungsrichtung) Auflösungsvermögen. Das Auflösungsvermögen hängt stark von der Schallfeldgeometrie ab. So sind die Querabmessungen des Schallfeldes in einer bestimmten Entfernung vom Wandler minimal. Dies entspricht einer Fokussierung. Der Querschnitt sowie der Abstand des Fokusbereiches von der Wandleroberfläche werden mit wachsender Ultraschallfrequenz

geringer. Daher werden mit höherer Ultraschallfrequenz sowohl die axiale als auch die laterale Auflösung besser. Gleichzeitig nimmt jedoch die Eindringtiefe ab, da die Ultraschalldämpfung mit steigender Frequenz wächst.

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Die für den Versuch notwendige Elektronik befindet sich in einem Ultraschall-A-Bild-Gerät, das über zwei parallele Anschlusskabel mit einem PC verbunden wird. Die Darstellung der Echosignale erfolgt mit dem Programm ASH 2.4 auf dem Computerbildschirm. Mit den Schaltern ("A" A-Bild, "HF" Hochfrequenzsignal und "All" beides) können die Amplitude als Einhüllende des eigentlichen Hochfrequenzsignals, das HF-Signal allein bzw. beides zusammen dargestellt werden. Das vorhandene Gerät gestattet zusätzlich auch die Aufnahme eines B-Bildes. Genaue Daten über Bedienung und Funktionsweise (insbesondere Beschreibung der Bedienelemente an der Frontplatte) sind der am Platz ausliegenden Bedienungsanleitung zu entnehmen. Die Schallköpfe (gleichzeitig Sender und Empfänger) sind über die Steckverbinder anzuschließen. Das Gerät bemerkt selbständig, welcher Schallkopf angeschlossen ist. Die Ankopplung der Schallköpfe an die zu vermessenden Körper erfolgt mit Wasser (es ist nur ein relativ dünner Wasserfilm erforderlich!) oder besser mit Ultraschallgel (ein erbsengroßer Tropfen, der zum Film verschmiert wird, ist ausreichend). Der durch einen kurzen elektrischen Sendeimpuls angeregte Schallwandler schwingt mit seiner mechanischen Resonanzfrequenz aus. Durch diesen mechanischen Ausschwingvorgang, der durch die Kopplung zwischen der Nuttschwingung (Dickenschwingung) und einer unvermeidbar mit angeregten parasitären Schwingung (Radialschwingung) entsteht, wird der Sendeimpuls verlängert. Die während dieser Zeit eintreffenden Echos können nicht erfasst werden. Es entsteht eine tote Zeitzone, d.h. Strukturen in unmittelbarer Nähe des Wandlers können nicht aufgelöst werden. Durch spezielle Arten von Bedämpfungen des Schallkopfes (rückwärtige und seitliche Bedämpfung) kann das Initialecho verkürzt und damit das Nahauflösungsvermögen vergrößert werden. Auch Vorlaufstrecken (z.B. Acrylglaszylinder definierter Länge) können genutzt werden, um aus dem Zeitbereich des Initialechos heraus zu kommen.

Hinweis für Aufgabe 9 (TOFD: time of flight diffraction technique): Zur Bestimmung der Tiefe von Rissen an z.B. einer nicht zugänglichen Oberfläche (Unterseite) eines Materials wird der Winkelspiegeleffekt, ein Echo, das im Winkel zwischen Riss und nicht zugänglicher Oberfläche entsteht, ausgenutzt. Dazu wird ein Winkelprüfkopf (hier: 1 MHz-Transducer mit 38°-Acrylwinkelkopf) gleichzeitig als Sender und Empfänger genutzt (Vorlaufzeit in der Winkelstrecke beträgt 17 µs). Die Einkopplung erfolgt auf der den Rissen gegenüberliegenden, glatten Seite des kurzen Aluminium-Testblocks. Gemäß Abb. 2 wird die im Alu-Testblock erzeugte Transversalwelle (Schallweg: a_2) im Winkel zwischen Riss und Oberfläche reflektiert. Je größer der Riss, um so größer wird auch das Echo. Dies gilt jedoch nur solange, wie die Rissgröße nicht den halben Sondendurchmesser übersteigt. Da an der Risspitze Beugung auftritt, entsteht dort ein weiteres Echo (Schallweg: a_1). Dieses ist bei Rissen geringer Tiefe vom Winkelecho überdeckt. Mit zunehmender Risstiefe wird das Beugungsecho immer deutlicher. Aus der Lage beider Echos, kann über Amplitudenmessungen die Risstiefe nun eindeutig bestimmt werden. Aus den für beide Schallwege $a_1 = t_1 c_T / 2$ und $a_2 = t_2 c_T / 2$ gemessenen Zeiten t_1 und t_2 und geometrischen Überlegungen ergibt sich die Risstiefe T zu

$$T = D - \sqrt{a_1^2 - x_1^2} = D - \sqrt{a_1^2 - (x_2 - x)^2},$$

mit $x_2 = \sqrt{a_2^2 - D^2}$ und $x = x_2 - x_1 = s_2 - s_1$. Dabei sind s_1 und s_2 z.B. die Abstände zwischen Sondenvorderkante und einer beliebigen Marke, z.B. der Werkstückvorderkante, bei den jeweils maximalen Signalen und D die Dicke des Werkstücks.

Aufgaben

1. Bestimmung der longitudinalen Schallgeschwindigkeiten verschiedener Materialien (Acrylglas, Stahl, Aluminium, Messing) über Dickenmessung der Probe und Laufzeitmessung der Echos. Zur Messung sind Mehrfachechos auszuwerten, da das Initialecho ungenau ablesbar

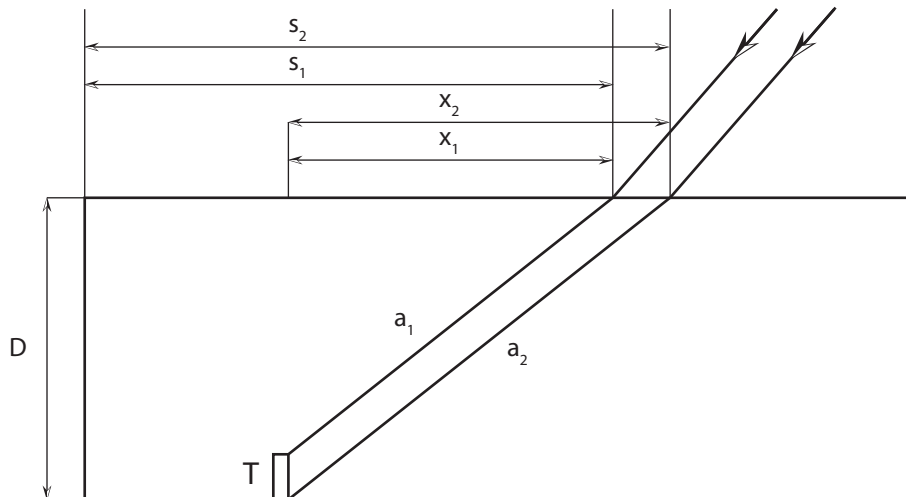


Abbildung 2: Geometrische Verhältnisse beim Winkelecho und Beugungsecho zur Risstiefenbestimmung

- ist. Die Messungen sind sowohl mit dem 1 MHz- als auch mit dem 4 MHz-Kopf durchzuführen. Bei der Messung sind die Einstellungen so zu wählen, dass das Initialecho möglichst unterdrückt und die Schwächung der Mehrfachechos (durch die zeitabhängige Verstärkung) ausgeglichen wird. Achten Sie darauf, dass die Signale nicht übersteuert werden.
2. Die Elastizitätsmoduli E sind unter Verwendung der jeweiligen Werte für ρ und ν (Poissonsche Zahl) zu berechnen. (Acrylglas: $\nu = 0,415$; $\rho = 1,385 \text{ g/cm}^3$)
 3. Bestimmung der Lage der "Fehlstellen" (Bohrungen) des Acrylglas-Körpers. Dazu sind die seitlichen Flächen (x- und y-Koordinate) sowohl mit dem 1 MHz-Kopf als auch mit dem 4 MHz-Kopf abzufahren und die Laufzeiten bis zu den "Fehlstellen" zu messen. Ein Schnitt des Körpers im Maßstab 1:1 ist (z.B. auf Millimeterpapier) anzufertigen. Mit Hilfe des höherfrequenten Schallkopfes (besseres Auflösungsvermögen!) ist nachzuprüfen, ob die gefundenen Fehlstellen möglicherweise zusätzlich strukturiert sind.
 4. Ein Brightness (B)-Bild des Acryl-Probekörpers mit Fehlstellen ist aufzunehmen. Dazu wird der "B-Bild Betrieb" (Bedienungsanleitung!) eingestellt und der Messkopf sofort nach Drücken der Starttaste gleichmäßig über die Probenoberfläche geführt.
 5. Die Eigenfrequenz eines Messkopfs (dominanter Frequenzanteil mit maximaler Amplitude) ist aus dem HF-Bild aus dem zeitlichen Abstand zweier Maxima (Moden) genau zu bestimmen (Zoomfunktion nutzen!).
 6. Messen Sie die Schalldämpfungskoeffizienten $\mu(f)$ unter Verwendung beider Schallköpfe für verschiedene Stoffe (Acrylglas, Aluminium, Wasser). Bestimmen Sie daraus den frequenzunabhängigen Dämpfungskoeffizienten μ_0 und den Grad der Frequenzabhängigkeit n . Die Dämpfung sollte zusätzlich in dB/cm und in dB/ μs angegeben werden. Nutzen Sie den Messcursor zur genauen Amplitudenbestimmung der Echos.
 - Aluminium: Bestimmung durch Amplitudenvergleich verschiedener Rückwandechos desselben Körpers.
 - Acrylglas: Amplitudenvergleich des jeweils ersten Rückwandechos verschiedener Acrylglaszylinder.
 - Wasser: Messung im Wasserbad mit verschiebbarem Reflektor (Aluminium) im Wasser (Schallkopf außen an der Wanne ankoppeln).

7. Untersuchen Sie die Dispersion mit dem 4 MHz-Messkopf. Verwenden Sie eine geeignete dünnere Probe mit einer Vielzahl von Echos. Vergleichen Sie die Frequenzspektren verschiedener Echos mit Hilfe der im angehaltenen Zustand verfügbaren Fouriertransformation.
8. Bestimmung der transversalen Schallgeschwindigkeit von Aluminium:
 - Messen Sie dazu das Transmissionsverhalten von Ultraschallwellen mit getrennter Sende- und Empfangssonde durch das Wasserbad, in dem sich eine drehbar aufgehängte Aluminiumplatte befindet. Messen Sie in Abhängigkeit vom Einfallswinkel die Amplituden der durch die Aluminiumplatte transmittierten longitudinalen und transversalen Schallwellen.
 - Bestimmen Sie die longitudinale und die transversale Schallgeschwindigkeit im Aluminium.
 - Berechnen Sie aus der transversalen Schallgeschwindigkeit den Schermodul G und aus der longitudinalen Schallgeschwindigkeit bei Vernachlässigung der Querkontraktion den E -Modul.
 - Berechnen Sie die Poissonzahl.
9. Risstiefenbestimmung mit Winkelspiegelecho und TOFD-Technik.
 - Messen Sie für jeden Riss am kleinen Aluminium-Testblock die Laufzeit und Amplitude des Winkelechos und des Beugungsechos.
 - Berechnen Sie die Risstiefen und tragen Sie die Winkelechoamplitude über der Risstiefe auf. Bei den Messungen wird der Winkelprüfkopf so verschoben und gedreht bis die Echos jeweils maximal werden (siehe auch Hinweise weiter oben).
10. Risstiefenmessung an Oberflächen mit Rayleighwellen
 - Messen Sie die Rayleighwellengeschwindigkeit an einer ungestörten Oberfläche des langen Aluminium-Testblocks. Dazu wird ein 1 MHz-Transducer mit Rayleighwellenaufsatz als Sender und ein weiterer 1 MHz-Transducer mit Aufsatz als Empfänger in verschiedenen Abständen von 5 bis 50 cm angebracht. Das Verhältnis der Sondenabstände und Laufzeiten liefert die gesuchte Geschwindigkeit und gestattet den Ausschluss eines Offsets durch den Einfluss des Längenmesspunkts (Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist senkrecht zur Kammstruktur des Kopfes gerichtet ! Nicht die Spalten des Kopfes mit Gel füllen.)
 - Kalibrieren Sie das Verfahren zur Risstiefenbestimmung an Oberflächen. Korrelieren Sie dazu die Ihnen bekannten Risstiefen mit den an den Rissen gemessenen Amplituden. Für die Amplitudenmessungen positionieren Sie jeweils Sender- und Empfängerkopf beidseitig in gleichem Abstand vom jeweiligen Riss. Messen Sie die jeweiligen Amplituden und setzen Sie diese ins Verhältnis zur Amplitude ohne Riss und geben Sie die Dämpfung in dB in Abhängigkeit zur Risstiefe an.
11. Bestimmen Sie die Dicke zweier Acrylglasplatten, deren longitudinale Schallgeschwindigkeit bekannt ist ($c_L = 2670$ m/s)
 - durch Auswertung von Mehrfachechos
 - indem Sie das Spektrum des Signals mittels FFT bestimmen.

Reinigen Sie bitte alle Teile nach Versuchsende mit etwas Spülmittel, Wasser und weicher Bürste!

Literatur

S. Hunklinger, Festkörperphysik, Oldenbourg Wissenschafts GmbH Verlag, 2007 (Seiten 161 bis 172 und 228 bis 244)

R. Millner, Wissensspeicher Ultraschalltechnik, Fachbuchverlag Leipzig 1987

H. Kuttruf, S. Heinrich, Physik und Technik des Ultraschalls, S. Hirzel-Verlag, Stuttgart 1988

V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt, Ultraschallprüfung - Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag 1997