

Fortgeschrittenenpraktikum Teil A - FP22

Ultraschallmikroskopie: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Institut für Physik
Universität Augsburg

September 2026



1 Allgemeines zur Ultraschallmikroskopie

Die Untersuchung von Materialien mittels elastischer Wellen im Ultraschallbereich stellt eine bildgebende, zerstörungsfreie Methode zur volumetrischen Werkstoffuntersuchung dar. Anwendungsgebiete finden sich beispielsweise in der Medizin oder auch der Werkstoffprüfung, und dort insbesondere bei der Prüfung von elektronischen Bauteilen und von Faserverbundwerkstoffen. Die akustischen Wellen dringen in das Material ein ohne es zu schädigen und wechselwirken mit inneren Grenzflächen. Der Kontrast wird größtenteils durch Änderungen der akustischen Impedanz des untersuchten Materials erzeugt. Risse, Ablösungen oder Hohlräume im Inneren des Festkörpers können auf diese Weise detektiert werden.

Entwickelt wurde die Ultraschallmikroskopie u.a. zur Untersuchung von integrierten Schaltkreisen. Das erste akustische Mikroskop, welches mit einer Frequenz von 1 MHz arbeitete, wurde 1936 von Sokolov vorgestellt. Erst später wurde 1959 durch Dunn und Fry ein 12 MHz Ultraschallabsorptionsmikroskop entwickelt. Weitere Impulse folgten in den siebziger Jahren mit der Entwicklung eines mechanischen akustischen Rastermikroskopes von Lemons und Quate. Die Ultraschallmikroskopie wurde zunächst in Transmission entwickelt. Lateral hochaufgelöste Messungen konnten jedoch nur an ausreichend dünnen Proben durchgeführt werden, da mit zunehmender Ultraschallfrequenz zwar die laterale Auflösung ansteigt, die Eindringtiefe aber sinkt. Dies führte zur Entwicklung der Ultraschallmikroskopie in Reflexion. Die Messung in Reflexion ist zur Untersuchung von Probenoberflächen und oberflächennahen inneren Strukturen geeignet. Im folgenden Praktikumsversuch sollen die theoretischen Grundlagen und Anwendungsgebiete der Ultraschallmikroskopie in Reflexion, realisiert auf Basis der Puls-Echo-Technik, aufgezeigt werden.

2 Aufbau eines Ultraschallmikroskopes in Reflexion

Ein Reflexions-Ultraschallmikroskop auf Basis der Puls-Echo-Technik besteht im wesentlichen aus einem Pulsgeber (Sender), einem Schallwandler - dem so genannten Transducer - und einem Oszilloskop (Empfänger), wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Im Pulsgeber wird ein zeitlich scharfer elektrischer Puls ($T < 3 \text{ ns}$) erzeugt der sich periodisch wiederholt. Der Transducer wandelt den Puls über ein Piezoelement in eine Schallwelle um und fokussiert diese mittels einer akustischen Linse auf die Probe. Ein Kopplungsmedium (üblicherweise Wasser) überträgt die Ultraschallwellen zum untersuchten Objekt. Das Koppelmedium ist notwendig, um das Ultraschallsignal mit einer höheren Energie in die Probe zu führen, da die Dämpfung des Signals in Wasser wesentlich geringer als an Luft ist. Beim Auftreffen auf die Pro-

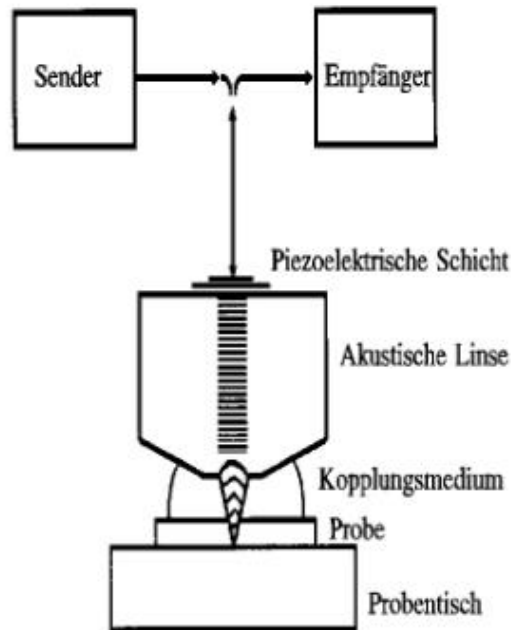


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Ultraschallmikroskops im Puls-Echo-Verfahren

be wird die Schallwelle je nach Impedanzunterschied zwischen dem Koppelmedium und dem Probenmaterial an der Probenoberfläche teilweise reflektiert. An jeder folgenden inneren Grenzfläche, d.h. bei jedem Impedanzunterschied des untersuchten Materials, erfolgen weitere Teilreflexionen der Welle. Die Änderung der akustischen Impedanz zwischen benachbarten Medien stellt den wichtigsten Kontrastmechanismus bei der Ultraschallmikroskopie dar. Die reflektierten Schallwellen (Echos) werden im selben Transducer wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt, welches im Anschluss von einem Vorverstärker verstärkt wird. Der Vorverstärker sollte gute Erholungseigenschaften besitzen, um Spannungsspitzen durch den Schaltprozess bzw. durch schlechte Isolationen zu kompensieren. Außerdem sollte er nahe an der Probe sitzen, um ein möglichst gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten. Das entstandene elektrische Signal wird mit einem Oszilloskop ausgelesen und komprimiert gespeichert. Pro Rasterpunkt wird ein Impuls ausgesandt und eine bestimmte Zeitspanne lang das Echo aufgenommen. Danach fährt das Mikroskop zum nächsten Punkt. Auf diese Weise wird die Probe Stück für Stück mit Hilfe einer xy-Mechanik abgerastert. Die Laufzeit der Schallwellen liegt im μs -Bereich, d.h. die einzelnen Impulse werden mit einer Frequenz von ca. 3,5 kHz periodisch wiederholt. Diese hohe

Frequenz macht es möglich, dass der Transducer nicht an jedem einzelnen Punkt stehen bleibt, sondern mit einer Geschwindigkeit von max. 1 m/s kontinuierlich über die Probe fährt.

3 Fokussierte akustische Wellen

Die akustischen Wellen werden von piezoelektrisch angeregten Transducern erzeugt. Eine akustische Linse fokussiert die Wellen auf die zu untersuchende Probe. Der schematische Aufbau von Transducer und akustischer Linse ist in Abb. 2 dargestellt.

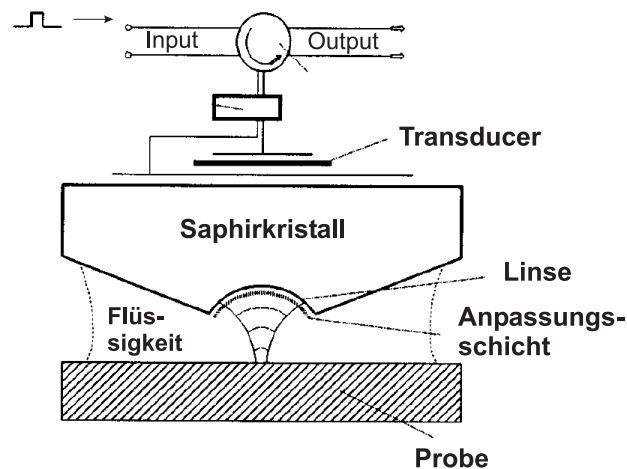


Abbildung 2: Schematischer Aufbau von Transducer und akustischer Linse.

Der Transducer besteht aus einer piezoelektrischen Schicht, die durch die elektrischen Pulse des Pulsgebers zu mechanischen Schwingungen angeregt wird. Für Frequenzen unter 100 MHz werden piezoelektrische Kristalle aus Lithiumniobat, Quartz oder Keramik verwendet. Für höhere Frequenzen wird z.B. Zinkoxid (ZnO) eingesetzt. Die Verformungen der piezoelektrischen Schicht regen den darunter liegenden Saphirzylinder zur Schwingung in seiner Resonanzfrequenz an. Der Saphirzylinder leitet das akustische Signal zur akustischen Linse, welche in ihm integriert ist. Sie befindet sich in Form einer konkaven sphärischen Einwölbung an der Unterseite des Zylinders. Je nach verwendeter Frequenz kann der Krümmungsradius von unter 100 μm bis zu wenigen Millimetern betragen. Die Linse ist mit einer Anpassungsschicht beschichtet, die die Transmission der Schallwelle in das Koppelmedium optimiert. Die Schallwellen werden größtenteils an der Oberfläche der Linse bzw. des Koppelmediums gebrochen und auf die Längsachse der Linse fokussiert.

4 Laterale Auflösung und Eindringtiefe

Die Frequenz der verwendeten Ultraschallwelle hat Einfluss auf die laterale Auflösung der Untersuchung sowie auf die Eindringtiefe der Welle ins Material.

Die laterale Auflösung kann analog zur Auflösung eines optischen Mikroskops betrachtet werden. Mit einem Öffnungswinkel der Linse θ_0 und Licht der Wellenlänge λ_0 ergibt sich beim optischen Mikroskop an Luft der minimale Abstand noch auflösbarer Punkte $d_{0,opt}$ zu

$$d_{0,opt} = 0.61 \cdot \frac{\lambda_0}{\sin\theta_0}. \quad (1)$$

Gleichung 1 lässt sich vom Rayleigh-Kriterium herleiten. Nach Rayleigh sind zwei Lichtpunkte aufgelöst, wenn das Maximum des einen im ersten Minimum des anderen liegt. Im Gegensatz dazu sind nach dem Sparrow-Kriterium zwei Lichtpunkte aufgelöst, wenn es ein erkennbares Minimum im Intensitätspeak gibt. Das im Versuch gemessene Signal ist elektrischer Natur, d.h. jedes kleine Minimum kann verstärkt werden, weshalb bei der akustischen Mikroskopie das Sparrow-Kriterium Anwendung findet. Ein weiterer Unterschied zur optischen Mikroskopie besteht in der doppelten Fokussierung (einfallende und reflektierte Welle). Der minimale Abstand noch auflösbarer Punkte $d_{0,akust}$ ist beim akustischen Mikroskops gegeben durch

$$d_{0,akust} = 0.51 \cdot \frac{\lambda_0}{\sin\theta_0}. \quad (2)$$

Ein möglichst kleiner noch auflösbarer Abstand, d.h. eine hohe laterale Auflösung, ist also durch die Verwendung von akustischen Wellen mit hohen Frequenzen zu erreichen. Auf Grund experimenteller Randbedingungen wie z.B. nicht idealer akustischer Linsen und elektronischem Rauschen kann die theoretische maximale Auflösung experimentell nicht erreicht werden. Die theoretisch erreichbare laterale Auflösung ist proportional zur Wellenlänge und hängt zusätzlich von der numerischen Apertur bzw. dem Öffnungswinkel des fokussierten Schallfeldes ab. Für einen gegebenen Öffnungswinkel verbessert sich die laterale Auflösung daher näherungsweise proportional mit abnehmender Wellenlänge bzw. zunehmender Frequenz.

Auch die Eindringtiefe ins untersuchte Material wird wesentlich durch die Frequenz der verwendeten akustischen Wellen beeinflusst. Mit abnehmender Frequenz nimmt die erreichbare Eindringtiefe im Allgemeinen zu, da die frequenzabhängige Dämpfung im Material geringer wird. Die Eindringtiefe ist außerdem abhängig von den elastischen Parametern der Probe und dem Signal-zu-Rausch-Verhältnis und ist daher stark materialabhängig.

Ungefähre Werte für die praktische Grenze der lateralen Auflösung und die Eindringtiefe der Schallwellen in Abhängigkeit von der Frequenz der verwendeten akustischen Wellen sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Richtwerte der lateralen Auflösung und Eindringtiefe eines Ultraschallmikroskops

Frequenz	laterale Auflösung	Eindringtiefe
5 MHz	300 μm	15 mm
25 MHz	60 μm	4,1 mm
200 MHz	8 μm	300 μm
1000 MHz	1.5 μm	25 μm
2000 MHz	0.7 μm	10 μm

Für den Versuch stehen zwei verschiedene Transducer zur Verfügung, die Schallwellen der Frequenzen 10 MHz und 100 MHz erzeugen. In Tab. 2 sind die Daten der beiden Schallwandler zusammen gestellt. Als Fokusabstand ist der Abstand zwischen Fokuspunkt und Linse definiert. Öffnungsradius und Öffnungswinkel sind in Abb. 3 verdeutlicht.

Der Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 100 MHz ist vielversprechend für die Volumenuntersuchung einer großen Bandbreite von Materialien. Für die im Versuch verwendeten Frequenzen zwischen 10 MHz und 100 MHz sind Eindringtiefen bis in den Millimeterbereich möglich, während die theoretische laterale Auflösung im Bereich von wenigen hundert bis wenigen zehn Mikrometern liegt. Für hochauflösende Messungen sind die vorliegenden Transducer nicht geeignet, hier werden Frequenzen im GHz-Bereich benötigt. Zum Vergleich sind viele Prüffrequenzen bei der Qualitätskontrolle in der Industrie oder der diagnostischen Medizin eher im Bereich um 1-10 MHz anzusiedeln.

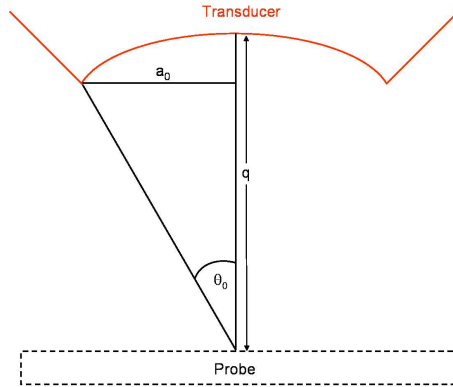


Abbildung 3: Definition von Öffnungsradius a_0 und Öffnungswinkel θ_0 .

Tabelle 2: Daten der für den Versuch verfügbaren Schallwandler

Frequenz [MHz]	Fokusabstand [mm]	Öffnungsradius a_0 [mm]	Öffnungswinkel θ_0 [°]
10	20	7.015	20.5
100	8.0	1.395	10.0

5 Akustische Impedanzen

Die akustische Impedanz beschreibt im freien Schallfeld den Widerstand, der der Schallausbreitung entgegengesetzt wird. Sie ist ein Maß dafür, wie stark sich ein Material gegen die Auslenkung seiner Volumenelemente durch die Schallwelle widersetzt. Die akustische Impedanz wird durch die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums bestimmt und ist definiert als das Produkt aus dessen Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c :

$$Z = \rho \cdot c \quad (3)$$

Die Einheit der akustischen Impedanz ist *Rayl* ($= \frac{kg}{m^2s}$).

Trifft eine sich ausbreitende akustische Wellenfront senkrecht auf die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Materialeigenschaften kommt es zu Reflexion, Transmission und Brechung. Der Anteil der einzelnen Beiträge ist abhängig von der Impedanz der beteiligten Medien. Je größer der Impedanzunterschied der Materialien, desto größer ist der Reflexionsgrad. Bei geringem Impedanzunterschied kommt es hauptsächlich zur Transmission der Schallwellen. Geht die Welle von Medium 1 mit Impedanz Z_1 über zu Medium 2 mit Impedanz Z_2 so ist der Anteil der an der Grenzfläche reflektierten bzw. transmittierten Welle bestimmt durch den Reflexionskoeffizienten R und den Transmissionskoeffizienten T :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

Bei der Ultraschallmikroskopie ist der Reflexionskoeffizient - und damit der Impedanzunterschied an der jeweiligen Grenzfläche - proportional zum Grauwert des entstandenen Bildes. Zur Kalibrierung der Grauskala kann der Reflexionskoeffizient von Materialien mit bekannter akustischer Impedanz verwendet werden. Trägt man die maximale reflektierte Ultraschallamplitude in Abhängigkeit vom Reflexionskoeffizienten auf und extrapoliert die Punkte, so ergibt sich eine Kalibriergerade, wie in Abb. 4 dargestellt. Mit Hilfe dieser Kalibriergerade kann anhand des Grauwertes der Ultraschallaufnahme der Reflexionskoeffizient und - bei bekannter akustischer Impedanz Z_1 des Kopplungsmediums - die akustische Impedanz Z_2 des untersuchten

Materials quantitativ bestimmt werden. Eine wichtige Bedingung für die quantitative Bestimmung von akustischen Impedanzen ist, dass immer mit den gleichen Einstellungen (wie z.B. dem Abstand zur Probe und der Verstärkerleistung) gemessen wird.

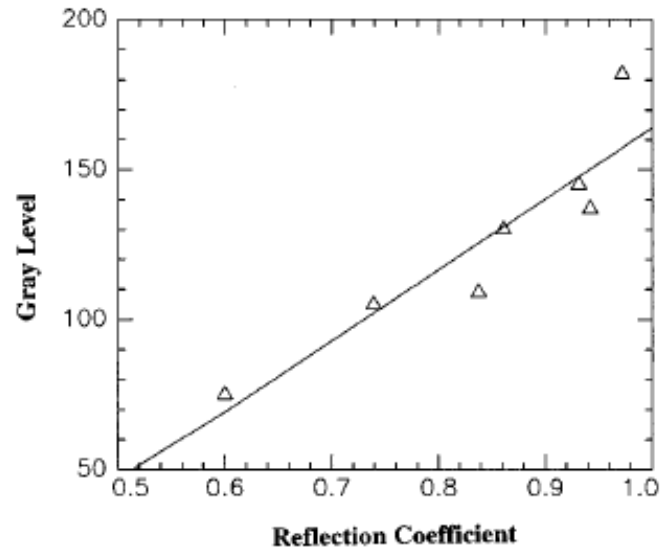


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Reflexionskoeffizient und Grauwert der Ultraschallaufnahme für die Materialien Epoxidharz, Mg, Al, Si, Cu, Ni und W.

Fällt die Welle unter einem Winkel $\Phi_1 \neq 0$ auf die Oberfläche (siehe Abb. 5), so ist das Brechungsgesetz gültig.

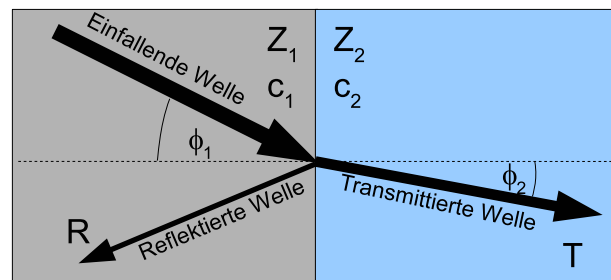


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Brechungsgesetzes für akustische Wellen

In Abhängigkeit vom Einfallswinkel Φ_1 kann eine die Mode einer akustischen Welle konvertiert werden, also eine Longitudinalwelle ganz oder teilweise in eine Transversalwelle umgewandelt werden. Allgemein kann das Brechungsgesetz für isotrope Medien für eine beliebige Kombination von longitudinalen und transversalen

Schallgeschwindigkeiten geschrieben werden als:

$$\frac{\sin\Phi_1}{\sin\Phi_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (6)$$

Für bestimmte Einfallswinkel sind die transmittierten Teile der akustischen Wellen von spezieller Natur. Der wichtigste Typ sind hierbei die Oberflächenwellen, die beim Übergang akustischer Wellen aus gasförmigen oder flüssigen Medien in den Festkörper unter bestimmten Winkeln auftreten. Die Bedingung für Totalreflexion der longitudinalen Welle ist beim ersten kritischen Winkel $\Phi_{krit,L}$ gegeben und bedingt die Anregung einer Kriechwelle an der Probenoberfläche. Oberhalb des zweiten kritischen Winkels $\Phi_{krit,T} > \Phi_{krit,L}$, wird schließlich auch die Transversalwelle reflektiert. Unter bestimmten Voraussetzungen ($c_0 < c_R < c_T < c_L$) kann eine sogenannte Rayleigh-Welle unter dem Rayleigh-Winkel $\Phi_R > \Phi_{krit,T}$ angeregt werden. Für die Ultraschallmikroskopie ist die Rayleigh-Welle besonders relevant, da Oberflächenrisse ihre Ausbreitung beeinflussen und sie streuen. Bei geeigneten Messbedingungen entsteht dadurch ein ausgeprägter Bildkontrast. So können auch Risse detektiert werden, deren Öffnungsbreite deutlich kleiner als die Schallwellenlänge ist, sofern ihre Länge und Tiefe ausreichend groß sind und kein ausgeprägter Risschluss vorliegt. Die Öffnungsbreite selbst wird dabei nicht direkt aufgelöst. Der Rayleigh-Winkel ist gegeben durch die longitudinale Schallgeschwindigkeit des Koppelmediums c_0 und der Geschwindigkeit der Rayleigh-Welle c_R als:

$$\Phi_R = \sin^{-1} \left(\frac{c_0}{c_R} \right) \quad (7)$$

Die Bewegungskomponenten der Rayleigh-Welle klingen mit zunehmender Tiefe exponentiell ab. Ihre Energie ist überwiegend auf einen oberflächennahen Bereich von ungefähr einer Rayleigh-Wellenlänge beschränkt. Deshalb reagiert sie besonders empfindlich auf Veränderungen der Oberfläche und des oberflächennahen Materials.

6 Betriebsarten der Ultraschallmikroskopie

Für die akustische Prüfung von Werkstoffen stehen verschiedene Betriebsarten des Ultraschallmikroskops zur Verfügung. Das physikalische Messprinzip der einzelnen Betriebsarten soll im folgenden erläutert werden.

6.1 A-Scan

Der A-Scan stellt zeitabhängig die Amplitude der reflektierten Ultraschallwelle dar. Der Prüfkopf wird in diesem Modus nicht bewegt, das Messsignal liefert Informatio-

nen über die Position direkt unterhalb des Prüfkopfes. Die Messgeometrie ist in Abb. 6 dargestellt. Ein typischer Signalverlauf eines A-Scans ist in Abb. 7 dargestellt.

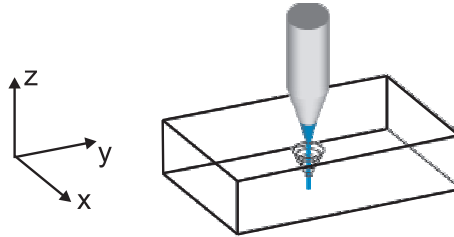


Abbildung 6: Messgeometrie des A-Scans.

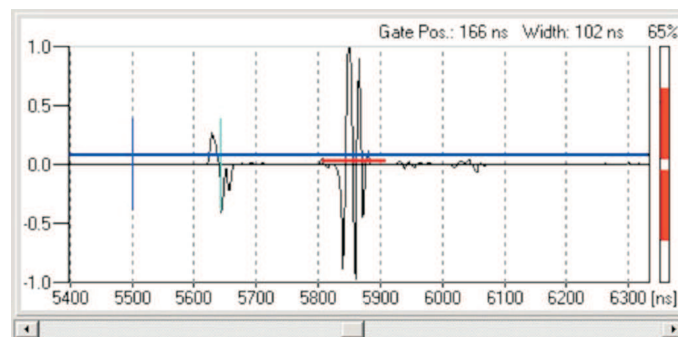


Abbildung 7: Typischer Signalverlauf eines A-Scans.

Die akustische Welle wird sowohl an Vorder- und Rückseite der Probe als auch an inneren Grenzflächen, z.B. an Poren oder Rissen, reflektiert. Schematisch ist die Reflexion der Schallwelle und das resultierende Signal des A-Scans in Abb. 8 dargestellt. Ein Fehlerecho geht immer mit der Schwächung des Rückwandechos einher, da ein Teil der akustischen Welle bereits am Fehler zurückgeworfen wird. Die entsprechenden Echos sind im A-Scan erkennbar und lassen z.B. Rückschlüsse auf die Größe und Lage eines Fehlers oder die Dicke der Probe zu.

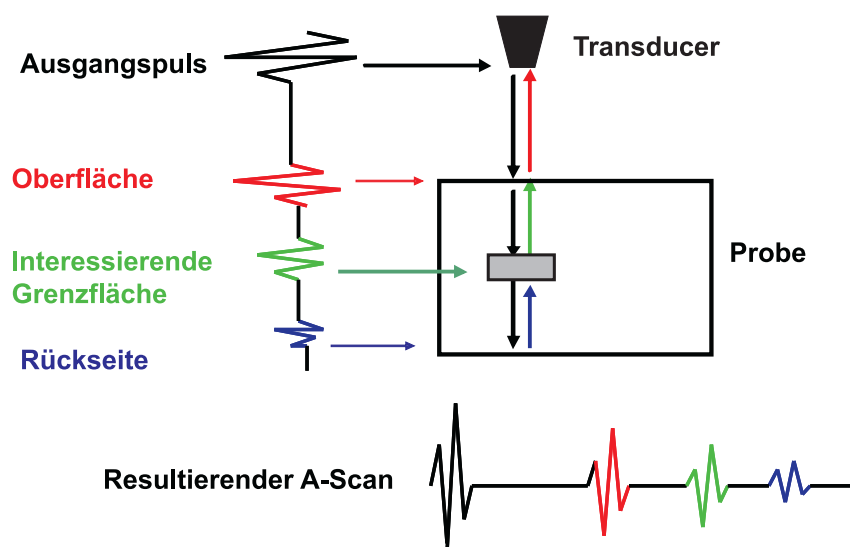


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Reflexion der Schallwelle in der Probe und des resultierenden Signalverlaufs des A-Scans.

6.2 B-Scan

Beim B-Scan wird eine tiefen aufgelöste Querschnittsaufnahme der Probe in y-Richtung erzeugt. Das Mikroskop nimmt dabei in y-Richtung eine Reihe von A-Scans auf und stellt diese nebeneinander. Dabei werden die im A-Scan vorhandenen Signale gleichgerichtet und die Signalhöhen in Farben kodiert. Jede Spalte eines solchen B-Scans enthält die Informationen des A-Scans eines Ultraschallsignals. Die Geometrie des B-Scans ist in Abb. 9 verdeutlicht.

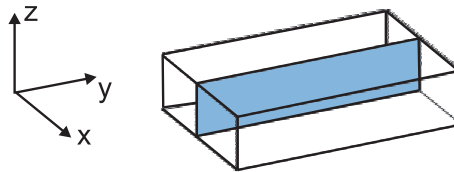


Abbildung 9: Messgeometrie des B-Scans.

In Abb. 10 ist der B-Scan einer Verklebung zweier Metallplatten dargestellt. Es sind deutlich die Echos der auftretenden Grenzflächen (Koppelmedium-Metall, Metall-Verklebung und Verklebung-Metall) zu erkennen. Des Weiteren sind in der Klebeschicht zahlreiche Lufteinschlüsse nachweisbar.

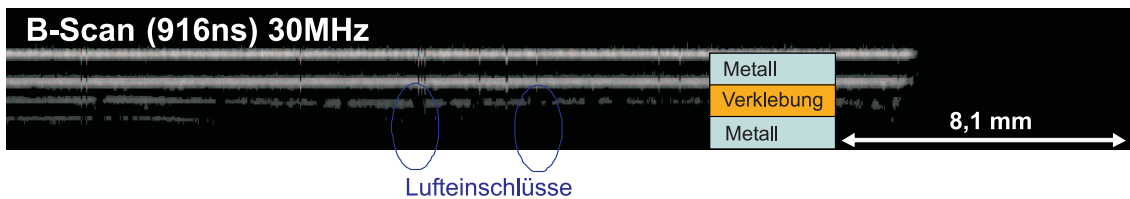


Abbildung 10: B-Scan der Verklebung zweier Metallplatten.

6.3 C-Scan

Eine weitere Betriebsart der Ultraschallmikroskopie stellt der C-Scan dar. Hier werden zahlreiche A-Scans an definierten Positionen der Probe generiert, wobei sowohl die x- als auch y-Position des Schallkopfes variiert und damit eine definierte Fläche abgerastert wird. Der C-Scan stellt einen farbcodierten Schnitt parallel zur Einstrahlungsfläche in definierter Tiefe dar. Die Dicke der untersuchten Schicht wird durch die Länge der verwendeten Laufzeit des Signals festgelegt. Ein Pixel eines C-Scans entspricht daher dem Signalwert eines einzelnen A-Scans zu einer durch die gewünschte Analysetiefe festgelegten Zeitspanne. Die Messgeometrie des C-Scans ist in Abb. 11 dargestellt.

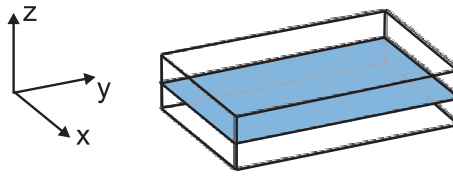


Abbildung 11: Messgeometrie des C-Scans.

Abb. 12 zeigt einen C-Scan derselben Verklebung zweier Metallplatten, die bereits bei der Vorstellung des B-Scans präsentiert wurde. Die Tiefenposition, d.h. die Laufzeit des Ultraschallsignals, wurde so gewählt, dass nur die Verklebung im C-Bild dargestellt wird. Wieder sind deutlich die bereits im B-Scan beobachteten Lufteinschlüsse zu erkennen.

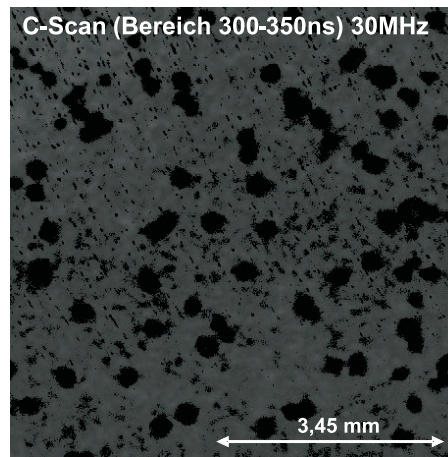


Abbildung 12: C-Scan der Verklebung zweier Metallplatten.

6.4 X-Scan

Beim X-Scan können mehr als 50 Bilder unterschiedlicher Lagen während eines Scanvorgangs in Echtzeit erzeugt und angezeigt werden. Der X-Scan stellt damit die tiefengestaffelte Kombination vieler C-Scans dar. In Abb. 13 ist die Messgeometrie eines X-Scans gezeigt.

Abb. 14 zeigt den zur bereits präsentierten Verklebung zweier Metallplatten gehörigen X-Scan. Je nach Tiefenlage ist das Echo der verschiedenen Grenzflächen zu erkennen: Im ersten Bild die Reflexion an der Probenoberfläche, im vierten und fünften Bild die Reflexion an der Grenzfläche Metall-Kleber sowie im siebten (und geringfügig auch im achten und neunten) Bild die Reflexion an Lufteinschlüssen im Kleber.

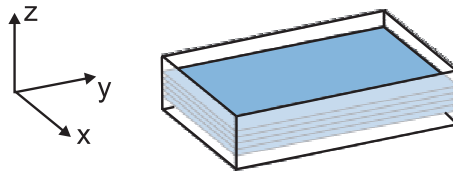


Abbildung 13: Messgeometrie des X-Scans.

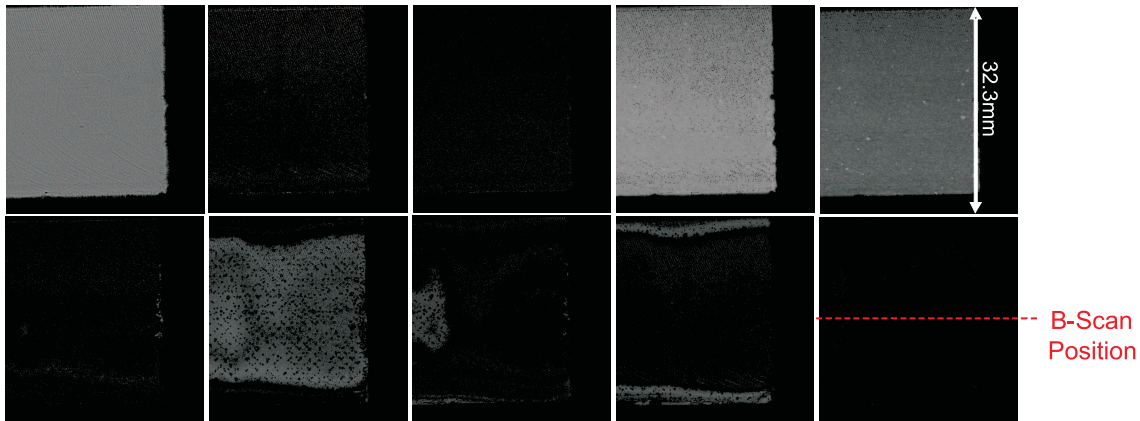
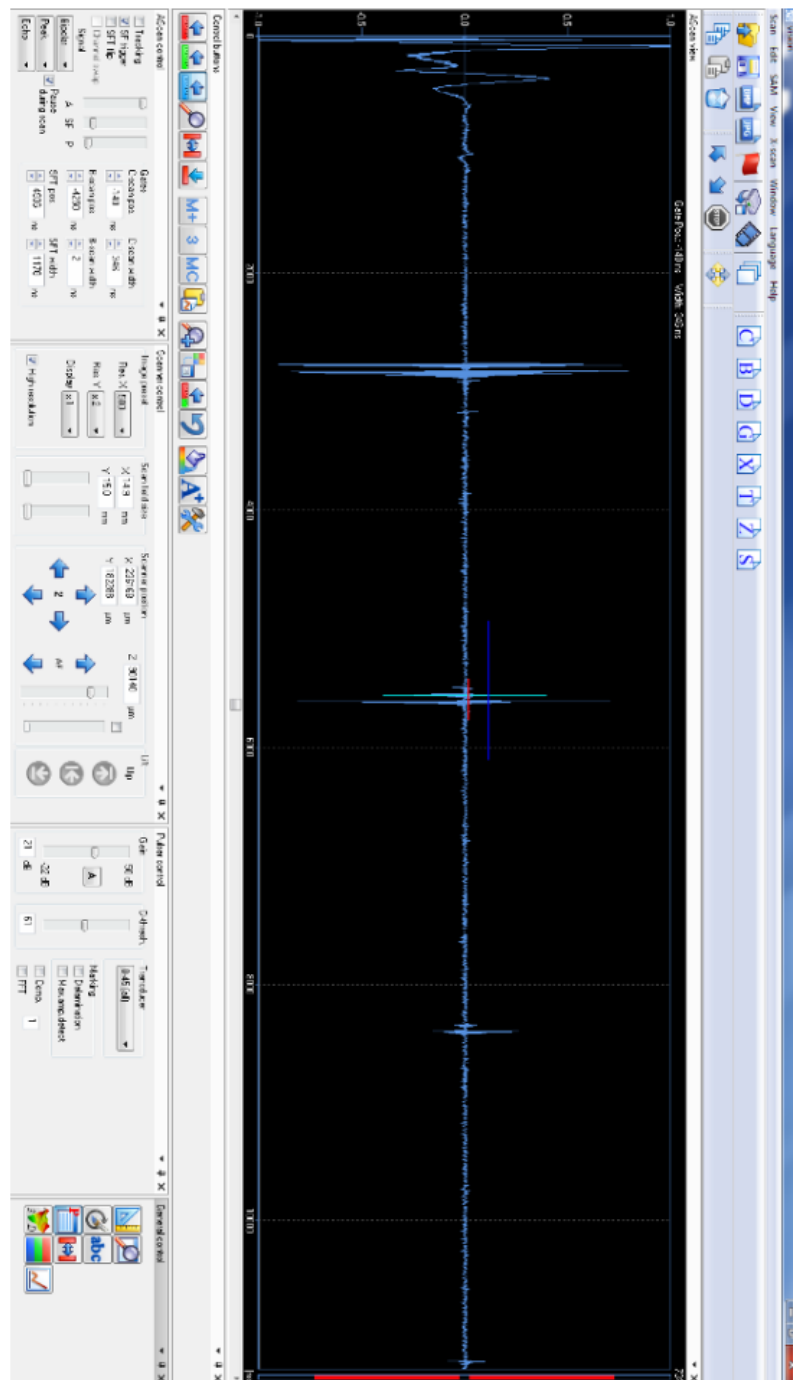


Abbildung 14: X-Aufnahme einer Verklebung zweier Metallplatten. Die Position des in Abb.10 gezeigten B-Scans ist markiert.

7 KSI VISION Software

Zur Durchführung der Ultraschallmessungen wird die Software KSI VISION benutzt. Die Software kann die xyz-Einheiten des Mikroskops ansteuern, sowie die Signale aus dem digitalen Oszilloskop auslesen. Die Datenmengen der akustischen Mikroskopie sind prinzipiell sehr hoch, deshalb ist die Speicherung einer Aufnahme relativ beschränkt. Daher wird nicht an jedem Punkt das komplette Zeitsignal (A-Scan) gespeichert. Stattdessen schränkt man vorher den zu untersuchenden Zeitbereich ein. Es besteht die Möglichkeit in einem bestimmten Zeitbereich nur den Maximalwert (Peak-Aufnahme), den integralen Durchschnitt (Mean-Aufnahme) oder einen nach der Zeit gewichteten integralen Durchschnitt (Time-Aufnahme) des Signals zu speichern.

Das KSI VISION Control-Fenster ist in Abbildung 15 gezeigt. Oben wird das Signal des A-Scans dargestellt. Mittels der Einstellungen von *Res.X* und *Res.Y* kann die gewünschte Pixel-Auflösung der aufgezeichneten Bilder in x- und y-Richtung eingestellt werden. Im Bedienfeld *Scan field size* wird der entsprechende reale Bildausschnitt festgelegt. Rechts unten befindet sich die xyz-Steuerung.



7.1 Durchführung von B-Scans

Zur Aufnahme eines B-Scans muss die KSI VISION Software gestartet werden. Jetzt kann der Scanner mit den Pfeiltasten für X und Y über die Probe gefahren werden. Der Scanner sollte soweit in z-Richtung verfahren werden, bis das Signal maximal ist. Beim B-Scan handelt es sich quasi um einen Querschnitt durch die Probe. Zweckmäßig sollte vorab ein schneller C-Scan (s. unten) vollzogen werden, um sich in der Probe besser orientieren zu können. Die Breite des Querschnitts wird im Register *Scan field size* als Y-Wert eingestellt. Zusätzlich muss im A-Scan Fenster die entsprechende Zeitspanne (Tiefe des Querschnittes) gesetzt werden. Dies wird durch Klicken auf den Button mit dem Pfeil und dem grünen Streifen und das Setzen im A-Scan Fenster per Maus vorgenommen. Das Zeitfenster (grüne Linie) sollte sich über das gesamte Signal und einen geringen Bereich vorher und nachher erstrecken. Jetzt muss das *Gate* (rote Linie) gesetzt werden. Die Länge des Gate stellt den Zeitbereich dar, der im folgenden als Dicke einer Ebene interpretiert wird. Mit Hilfe des Threshold Schiebereglers *P* kann das Gate vertikal versetzt werden. Der Threshold legt fest, ab welcher Signalthöhe die Amplitude in einen Grauwert umgesetzt werden soll. Man sollte den Threshold daher so setzen, dass er oberhalb des Rauschen aber noch im Signal sitzt. Danach auf den *B Button* klicken und das Bild wird erstellt.

7.2 Durchführung von C-Scans

Zur Aufnahme eines C-Scans muss zusätzlich zu den Schritten des B-Scan noch die Größe der abgerasterten Fläche eingestellt werden. Dazu sollte man die ungefähre Größe der Probe abschätzen und die Werte unter dem Register *Scan field size* einstellen. Die Tiefe der abgerasterten Ebene wird über die Position des *Gate* (rote Linie) festgelegt. Danach auf den *C Button* klicken und das Bild wird erstellt. Ist eine unebene oder geneigte Oberfläche zu erwarten, muss zusätzlich der Surface Trigger gesetzt werden. Dazu schaltet man die Surface Trigger Funktion (*SF trigger*) an und setzt sie mit Hilfe der Maus über das Oberflächensignal (blaue Linie). Zusätzlich erscheint ein vertikaler hellblauer Balken, welcher anzeigt auf welches Signal getriggert wird. Der Schwellwert *SF* muss entsprechend verschoben werden, damit der hellblaue Balken fest im Signal sitzt, d.h. seine Position nicht springt.

7.3 Durchführung von X-Scans

Ein X Scan dient der volumetrischen Erfassung der Probe durch Schnittbilderserien. Die Anzahl der erzeugten Bilder hängt von der Relation der B-Scan Länge (grüne Linie) und der Länge des Gates (rote Linie) ab. Anschaulich wird hier die Tiefe des untersuchten Bereiches durch die Länge der grünen Linie festgelegt und die Dicke der einzelnen Schnittbilder durch die Länge der roten Linie. Das Gate sollte sich

dabei aber mindestens über ca. 2 Halbwellen des Signals erstrecken. Durch Drücken des *X Buttons* werden nun die entsprechenden Schnittbilder erzeugt. So kann man schnell einen Überblick über die innere Struktur der Probe erhalten und die exakte Tiefe von Defekten bestimmen.

8 Vorbereitungsaufgaben

1. Folgende Begriffe sollten geläufig sein:
 - Puls-Echo Verfahren
 - Fokusabstand
 - A-, B-, C-, X-Scan
 - Transducer
 - Rayleigh-Welle
 - Sparrow-Kriterium
 - akustische Impedanz
2. Suchen Sie Literaturwerte für die longitudinalen Schallgeschwindigkeiten von Chrom, Kupfer, Titan, PVC, Nylon und Acrylglas heraus.
3. Suchen Sie Literaturwerte für die Dichte von Chrom, Kupfer, Titan, PVC, Nylon und Acrylglas heraus.
4. Berechnen Sie unter Verwendung der longitudinalen Schallgeschwindigkeiten und Dichten die akustischen Impedanzen von Chrom, Kupfer, Titan, PVC, Nylon und Acrylglas.

9 Versuchsdurchführung

9.1 Untersuchung einer Aluminiumprobe

In dieser Aufgabe soll anhand sichtbarer äußerer Defekte (Lochstruktur) in einer Aluminiumprobe die Auflösung und quantitative Messung mit Ultraschallwellen untersucht werden. Dazu sollen die Tiefe und die lateralen Abmessungen der Lochstruktur quantitativ bestimmt werden. Führen Sie dazu unter Verwendung eines 10 MHz-Transducers und eines 100 MHz-Transducers

1. A-Scans
2. B-Scans

3. C-Scans und

4. X-Scans

der Probe durch. Achten Sie dabei insbesondere auf die scharfe Darstellung der Lochstruktur auf der Oberseite und Unterseite der Probe!

9.2 Bestimmung von akustischen Impedanzen

Führen Sie an Chrom, Kupfer, Titan, PVC, Nylon und Acrylglas C-Scans mit einem 100 MHz Transducer im Peak-Modus durch. Führen Sie die gleiche Messung an einem Material unbekannter akustischer Impedanz durch. Achten Sie auf einen gleichbleibenden Fokusabstand sowie Verstärkerleistung (Gain) bei den einzelnen Messungen!

9.3 Visualisierung von inneren Strukturen

Führen Sie an einem integrierten Schaltkreis und einer CFK-Platte ausgewählte B-Scans und X-Scans durch, um den inneren Aufbau zu visualisieren. Überlegen Sie anhand der jeweiligen Materialien, welche Transducerfrequenzen hierfür bevorzugt in Frage kommen.

10 Versuchsauswertung

10.1 Aluminiumprobe

1. Bestimmen Sie anhand des durchgeführten A-Scans mit dem 10 MHz Transducer die longitudinale Schallgeschwindigkeit der Aluminiumprobe.
2. Berechnen Sie die Zeit, die im jeweiligen Fokusabstand des 10 MHz und 100 MHz Transducers benötigt wird, um das Signal vom Transducer zur Probe und wieder zurück zu schicken.
3. Bestimmen Sie die theoretischen lateralen Auflösungen für die 2 verwendeten Transducerfrequenzen.
4. Bestimmen Sie anhand der durchgeführten C-Scans die lateralen Größen der Lochmasken der Aluminiumprobe. Vergleichen Sie die Ergebnisse des 10 MHz und 100 MHz Transducer untereinander sowie mit den nominellen Werten.
5. Bestimmen Sie die Tiefe der Lochstruktur aus dem 10 MHz B-Scan.

10.2 Akustische Impedanzen

1. Erstellen Sie eine Kalibriergerade mit Hilfe der Impedanzmessung an den 6 verschiedenen Materialien.
2. Bestimmen Sie anhand des Grauwertes des unbekannten Materials dessen akustische Impedanz. Überlegen Sie anhand der ermittelten Impedanz um welches Material es sich handeln könnte.

10.3 Innere Strukturen

Beschreiben Sie anhand der durchgeführten Scans des integrierten Schaltkreises und der CFK-Platte deren innere Struktur.

Literatur

- [1] Auld B. A. *Acoustic fields and waves in solids, Volume II*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 2. ed. edition, 1990.
- [2] Andrew Briggs. *Acoustic microscopy*, volume 47 of *Oxford science publications*. Clarendon Press, Oxford, 1992.
- [3] G Andrew D Briggs and Oleg V Kolosov. *Acoustic microscopy*. Monographs on the physics and chemistry of materials. Oxford Univ. Press, Oxford, 2. ed. edition, 2010.
- [4] Andrew Briggs. *Advances in acoustic microscopy*. Plenum Press, New York, NY, 1996.
- [5] Ludwig Josef Balk. Akustische Rastermikroskopie als Methode zur Oberflächenuntersuchung. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 329(2):159–164, 1987.
- [6] Roman Grigor'evich Maev. *Acoustic microscopy: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [7] H. Yu. Scanning acoustic microscopy for material evaluation. *Applied Microscopy*, 50(1):25, 2020. doi: 10.1186/s42649-020-00045-4.