

Grundpraktikum

Versuchsreihe: Materialwissenschaft

Ultraschall

B401

Stand: 27.03.2015

Ziel des Versuchs:

Mit Hilfe von Ultraschallprüfverfahren sollen Materialkonstanten bestimmt und die zerstörungsfreien Werkstoffprüfung gezeigt werden.

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	1
2.1	Schall	1
2.2	Schallgeschwindigkeiten	2
2.3	Schallfeldgrößen	4
2.4	Reflexion und Brechung	4
2.5	Ultraschallerzeugung	7
2.6	Ultraschallprüfverfahren	8
2.7	Schallschwächung und –verstärkung	9
2.8	Ultraschallprüfköpfe	10
3	Versuchsdurchführung	11
3.1	Geräte	11
3.2	Proben	11
3.3	Versuchsablauf	11
4	Versuchsauswertung	13
4.1	Dickenbestimmung	13
4.2	Schallgeschwindigkeitsmessung	13
4.3	E-Modul-Bestimmung	13
4.4	Fehlersuche	13
5	Literatur	14
6	Abbildungsverzeichnis	14
7	Anhang	15
7.1	Materialkonstanten	15
7.2	Echobilder	16
7.3	Student-Faktor	17

1 Einleitung

Ein allgemein bekanntes Werkstückprüfverfahren, das die Eigenschaften des Schalls nutzt, ist das Anschlagen einer Tasse oder eines Glases mit dem Finger. Auch grobe Fehler in Schmiede- oder Gussstücken lassen sich durch den leicht veränderten Klang nach dem Anschlagen mit einem Hammer feststellen.

Der Versuch B401 vermittelt einen Einblick in die Ultraschallprüfung, ein wichtiges Teilgebiet der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Unter Ausnutzung der physikalischen Eigenschaften von Schallwellen, speziell Ultraschallwellen, lässt sich ein Werkstück im Hinblick auf verschiedene Kriterien mit dieser Prüfmethode untersuchen. Dickenmessungen, auch an ungünstigen Stellen (z.B. Werkstücke mit rundem oder ovalem Querschnitt) und bei dickwandigen Prüfkörpern, Schweißnahtprüfungen, Fehlersuche (Lunker¹, Risse, Einschlüsse, Seigerungen², Bindefehler usw.) und die Bestimmung deren Größe und Lage sind Beispiele für die Einsatzmöglichkeiten der Ultraschallprüfung. Die gute Handhabbarkeit der Ultraschallprüfgeräte ermöglicht auch die Untersuchung von solchen Objekten, die bereits fest in einen Aufbau integriert sind oder deren Dimensionen bzgl. Größe und Gewicht ein Verbringen zum Prüfgerät unrentabel oder sogar undurchführbar machen.

Man unterscheidet viele Prüfverfahren. Das älteste Verfahren ist das Durchschallungsverfahren bei kontinuierlicher Beschallung des Prüfkörpers. In dem Versuch B401 wird allerdings das heute gebräuchliche, das Impulsoverfahren bei Senkrechteinschallung oder Schrägeinschallung zum Einsatz kommen. Ultraschallverfahren werden außer zur Werkstoffprüfung auch zur Bestimmung von Materialkonstanten wie Schallgeschwindigkeiten oder elastischen Konstanten herangezogen. Als Nachteile der Methode seien die oftmals schwierige Interpretation der Messwerte und die nicht vorhandene Möglichkeit zur direkten Dokumentation genannt.

Vielfältige Anwendungen von Ultraschall finden sich auch in der Medizin und anderen Bereichen.

2 Grundlagen

2.1 Schall

Schallerzeugung ist stets mit mechanischen Schwingungen verbunden. Schallwellen sind also Wellen, deren Ausbreitung stets an ein Medium gebunden ist. Bei der gewöhnlichen Schallübertragung dient die Luft als Medium. In Flüssigkeiten und Gasen treten Schallwellen nur als Longitudinalwellen (Abbildung 1) auf. Im Festkörper, in dem Schallwellen elastische Schwingungen darstellen, treten zusätzlich auch Transversalwellen (Abbildung 2) auf. Bei Longitudinalwellen erfolgen die Schwingungen in Ausbreitungsrichtung, bei Transversalwellen senkrecht dazu.

Der für Menschen hörbare Frequenzbereich erstreckt sich von 16 Hz bis 20 kHz (Hörschall). Schallwellen mit kleineren Frequenzen werden als Infraschall bezeichnet, mit höheren Frequenzen als Ultraschall. Bei Frequenzen im GHz-Bereich spricht man von Hyperschall. Grundsätzlich gelten für Schallwellen dieselben Gesetze wie für andere Arten von Wellen, wie z. B. elektromagnetische Wellen. So beobachtet man Reflexion, Brechung, Beugung und die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit vom Medium auch bei Schallwellen.

¹ Lunker sind Hohlräume im Inneren des Werkstoffs oder Einbeulungen an der Oberfläche, die beispielsweise während des Fertigungsprozesses durch Wärmeschrumpfung in einem aushärtenden Bauteil entstehen.

² Seigerungen sind Entmischungen einer Schmelze bei der Metallherstellung. Sie entstehen beim Übergang der Schmelze in den festen Zustand. Dabei spielen die unterschiedliche Löslichkeit der Legierungselemente in flüssiger und fester Phase und unter anderem die unterschiedliche Dichte der Legierungselemente eine Rolle. Durch Seigerungen ergeben sich unterschiedliche Werkstoffeigenschaften innerhalb eines Gussstückes.

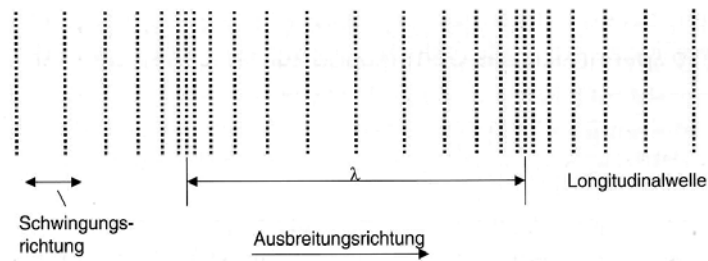


Abbildung 1: Longitudinalwelle

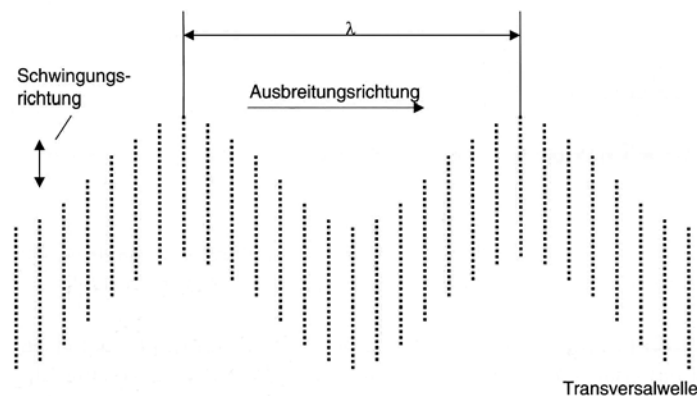


Abbildung 2: Transversalwelle

Die Frequenz f und die Wellenlänge λ sind über die Ausbreitungsgeschwindigkeit c miteinander in bekannter Weise verbunden:

$$c = f \cdot \lambda \quad (1)$$

2.2 Schallgeschwindigkeiten

In Gasen und Flüssigkeiten breitet sich Schall immer in Form von Longitudinalwellen aus. Jedes Volumenelement erfährt eine periodische Verschiebung und Druckänderung (Kompression und Expansion).

Gase werden durch Schallwellen in so schneller Folge komprimiert und expandiert, dass mit benachbarten Bereichen kein Wärmeaustausch erfolgen kann, sodass die Kompressionswärme nicht abfließen kann. Die Schallausbreitung ist demnach ein adiabatischer Vorgang.

Für ideale Gase gilt die *Adiabatengleichung* oder *Poissongleichung*

$$pV^\gamma = \text{konstant} \quad (2)$$

indem das Gasgesetz für isotherme Prozesse um den Adiabatenkoeffizient γ ergänzt wird. (p : Druck, V : Volumen). Die Schallgeschwindigkeit c berechnet sich für solch ein Gas nach

$$c = \sqrt{\frac{p\gamma}{\rho}} \quad (3)$$

(ρ : Dichte).

Durch Einsetzen des aus der thermischen Zustandsgleichung stammenden Zusammenhangs

$$p = \frac{\rho}{M} RT \quad (4)$$

ergibt sich für die Schallgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (5)$$

(ρ : Dichte, T : Temperatur, M : molare Masse, R : universelle Gaskonstante).

Da bei konstanter Temperatur die Dichte proportional zum Druck ist, hängt die Schallgeschwindigkeit nicht vom Gasdruck ab; sie steigt jedoch mit der Temperatur an:

$$c \sim \sqrt{T} \quad (6)$$

Luft kann in guter Näherung als ideales Gas betrachtet werden. In warmer Luft breitet sich Schall schneller aus als in kalter. Bei 0 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit in Luft 331 m/s, bei 20 °C beträgt sie 343 m/s. In Flüssigkeiten ist die Schallgeschwindigkeit mit der Kompressibilität³ κ verbunden:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\kappa \rho}} \quad (7)$$

Die Schallgeschwindigkeit in Wasser ist mit ca. 1400 m/s etwa viermal so groß wie in Luft.

In einem Festkörper sind, wie das stark vereinfachte Modell in Abbildung 3 zeigt, Atome über elastische Bindungskräfte miteinander verbunden.

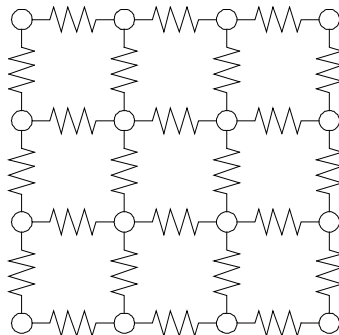


Abbildung 3: Modell eines elastischen Festkörpers

Somit hängt die Schallgeschwindigkeit von den elastischen Eigenschaften des Materials (Elastizitätsmodul⁴ E bzw. Schubmodul⁵ G , Querkontraktionszahl auch bekannt als Poissonzahl⁶ ν)⁷ sowie seiner Dichte ρ ab.

Man erhält für die Geschwindigkeit c_L der Longitudinalwellen:

³ Die Kompressibilität κ ist ein Maß dafür, wie leicht sich Flüssigkeiten/Gase unter Druck komprimieren lassen. Flüssigkeiten mit großer Kompressibilität zeigen bei Druckerhöhung eine starke Verminderung des Volumens.

⁴ Der Elastizitätsmodul E beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung im linear elastischen Bereich (s. Zugversuch).

⁵ Der Schubmodul G gibt Auskunft über die lineare elastische Verformung infolge einer Querkraft.

⁶ Die Querkontraktionszahl ν ist das Verhältnis aus relativer Dickenänderung zu relativer Längenänderung bei Einwirkung einer äußeren Kraft.

⁷ Es besteht folgender Zusammenhang: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

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

und für die Geschwindigkeit c_T der Transversalwellen:

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

Da die Querkontraktionszahl ν für alle festen Körper Werte zwischen 0 und 0.5 annimmt, gilt offensichtlich stets:

$$c_L > c_T \quad (10)$$

Als Faustregel gilt dabei ungefähr: $c_T \approx 0,5 c_L$. Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien.

Im Bereich der Raumtemperatur kann die Temperaturabhängigkeit vernachlässigt werden. Schallgeschwindigkeiten in Festkörpern sind grundsätzlich richtungsabhängig.

2.3 Schallfeldgrößen

Bei der Betrachtung der Größen des Schallfeldes genügt die Annahme des Feldes einer ebenen Welle. Pflanzte sich eine ebene Welle in Richtung x fort, so wird die **Auslenkung** ξ eines Teilchens in dieser Richtung beschrieben durch

$$\xi = \xi_0 \sin \left[2\pi \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (11)$$

(ξ_0 : Amplitude, t : Zeit, f : Frequenz, λ : Wellenlänge).

Bei Ausbreitung einer Schallwelle ist an Orten erhöhter Teilchendichte der Druck gegenüber dem Normaldruck erhöht, an Orten geringerer Teilchendichte vermindert.

Dieser sinusförmige Wechsel von Über- und Unterdruck wird als **Schalldruck** p bezeichnet. Er überlagert den normalen statischen Druck \hat{p} .

$$p = \hat{p} + v_0 c_L \rho \cos \left[2\pi \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (12)$$

Unter **Schallkennimpedanz** W (veraltet: Schallwiderstand) versteht man den Widerstand, den ein Material der Schallausbreitung entgegensetzt:

$$W = c_L \rho \quad (13)$$

2.4 Reflexion und Brechung

Trifft eine Schallwelle auf eine Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Schallkennimpedanzen W_1 und W_2 , so treten Reflexion und ggf. Brechung der Welle auf. Hier muss zwischen senkrechtem und schrägem Einfall unterschieden werden.

Fällt eine Schallwelle **senkrecht** auf die Grenzfläche zwischen Medium 1 und Medium 2 mit den Schallkennimpedanzen W_1 und W_2 (Abbildung 4), so wird ein Teil der Welle reflektiert, der andere dringt durch die Grenzfläche hindurch (Transmission).

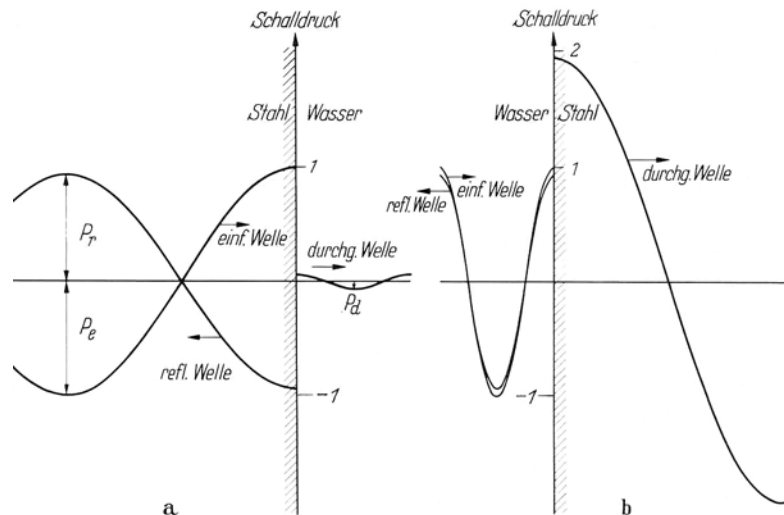


Abbildung 4: Senkrechtetes Auftreffen einer Schallwelle auf die Grenzfläche Stahl / Wasser mit $W_1 > W_2$ (a)
Wasser / Stahl mit $W_1 < W_2$ (b)

Reflexions- und Transmissionskoeffizient (R bzw. T) geben Auskunft darüber, wie groß die Schalldruckamplituden von reflektiertem und durchgehendem Teil relativ zur einfallenden Welle sind. Es gelten folgende Zusammenhänge (vgl. Fresnel-Formeln):

$$R = \frac{p_r}{p_e} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1} \quad (14)$$

$$T = \frac{p_d}{p_e} = \frac{2W_2}{W_2 + W_1} \quad (15)$$

$$1 + R = T \quad (16)$$

Ist $W_1 > W_2$, so ist der Schalldruck der reflektierten Welle gegenüber der einfallenden Welle vermindert ($R < 1$), derjenige der durchgehenden Welle ebenfalls ($T < 1$), (s. Abbildung 4a).

Ist $W_1 < W_2$, so ist der Schalldruck der reflektierten Welle gegenüber der einfallenden Welle vermindert ($R < 1$), aber derjenige der durchgehenden Welle ist erhöht ($T > 1$), (s. Abbildung 4b).

Ist $W_1 = W_2$, so findet keine Reflexion statt ($R = 0$); die einfallende Welle läuft unverändert durch die Grenzfläche ($T = 1$).

Hat R ein negatives Vorzeichen, so erfährt die reflektierte Welle an der Grenzfläche einen Phasensprung um 180 Grad (s. Abbildung 4a).

Trifft die Welle nicht senkrecht, sondern **schräg** auf die Grenzfläche (vgl. Abbildung 5), so treten Reflexion und Brechung auf. Dabei bilden sich in festen Medien nach der Reflexion bzw. Brechung jeweils eine Longitudinalwelle und eine Transversalwelle aus, in flüssigen oder gasförmigen Medien jeweils nur eine Longitudinalwelle.

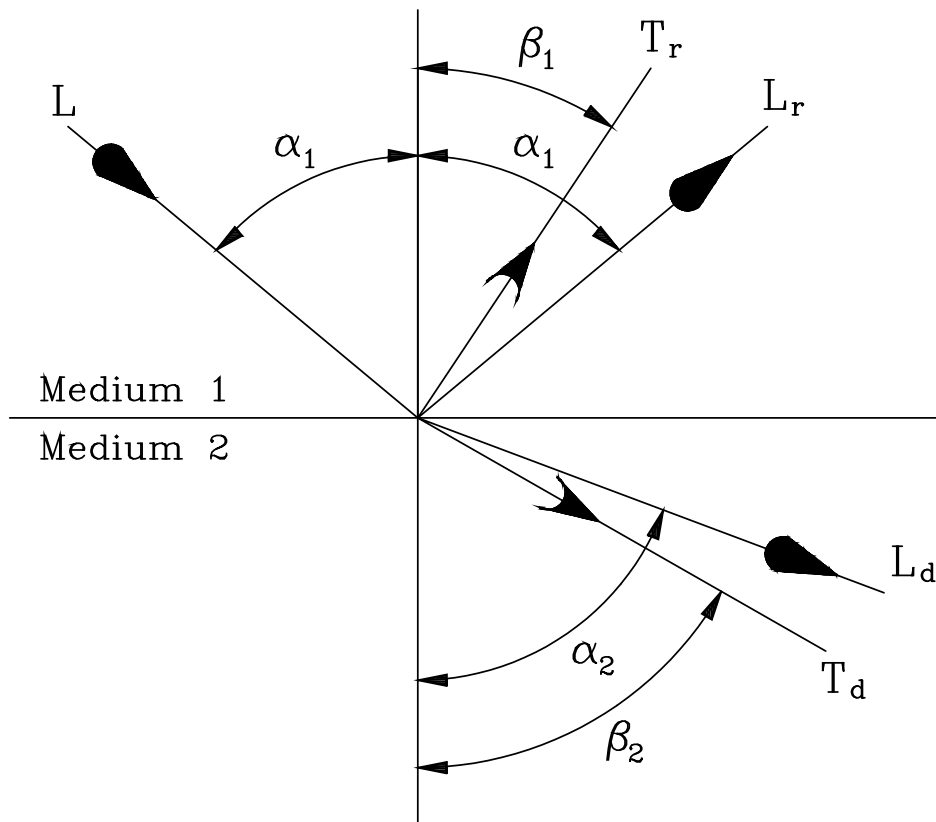


Abbildung 5: Brechung und Reflexion einer longitudinalen Schallwelle an einer Grenzfläche zweier fester Medien.

Für die **Reflexion** lässt sich folgendes festhalten:

Nach dem Reflexionsgesetz gilt für die Longitudinalwellen L und L_r „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“. Gemäß den unterschiedlichen Geschwindigkeiten für Longitudinal- und Transversalwellen gilt für die Ausbreitungsrichtung der Wellen L_r und T_r:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{c_{L,1}}{c_{T,1}} \quad (17)$$

(c_{L,1}: Ausbreitungsgeschwindigkeit Longitudinalwellen im Medium 1;
c_{T,1}: Ausbreitungsgeschwindigkeit Transversalwellen im Medium 1)

Die Gesetze bei der Betrachtung der Ausbreitungsrichtungen der **gebrochenen** Strahlen L_d bzw. T_d lauten:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_{L,1}}{c_{L,2}} \quad (18)$$

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{c_{L,2}}{c_{T,2}} \quad (19)$$

($c_{L,2}$: Ausbreitungsgeschwindigkeit Longitudinalwellen im Medium 2;
 $c_{T,1}$: Ausbreitungsgeschwindigkeit Transversalwellen im Medium 2)

2.5 Ultraschallerzeugung

Die gebräuchlichen Verfahren zur Erzeugung und zum Nachweis von Ultraschall beruhen auf dem **piezoelektrischen Effekt**.

Die Atome eines piezoelektrischen Kristalls sind in der Elementarzelle so angeordnet, dass durch die Verschiebung von einzelnen Atomen gegeneinander, z. B. durch Ausüben von mechanischem Druck oder Zug in Richtung einer polaren Achse die Ladungsschwerpunkte von positiver und negativer Ladung nicht mehr zusammenfallen. Die vorher elektrisch neutralen Elementarzellen werden zum Dipol; die Oberfläche des Kristalls weist elektrische Ladungen auf (s. Abbildung 6), es entsteht eine elektrische Spannung. Vertauschung von Druck- und Zugbelastung führt zu einem Vorzeichenwechsel der Ladung; so führt ein abwechselnd zug- und druckbelasteter Kristall zu Wechselfspannungen an seiner Oberfläche.

Der piezoelektrische Effekt ist umkehrbar und wird als **reziproker piezoelektrischer Effekt** bezeichnet: Legt man eine Wechselfspannung an den Kristall an, ruft man mechanische Schwingungen hervor und der Kristall strahlt eine Longitudinalwelle ab. Der (reziproke) piezoelektrische Effekt ist von der Kristallsymmetrie abhängig; eine notwendige Voraussetzung ist das Fehlen eines Symmetriezentrums in der Elementarzelle.

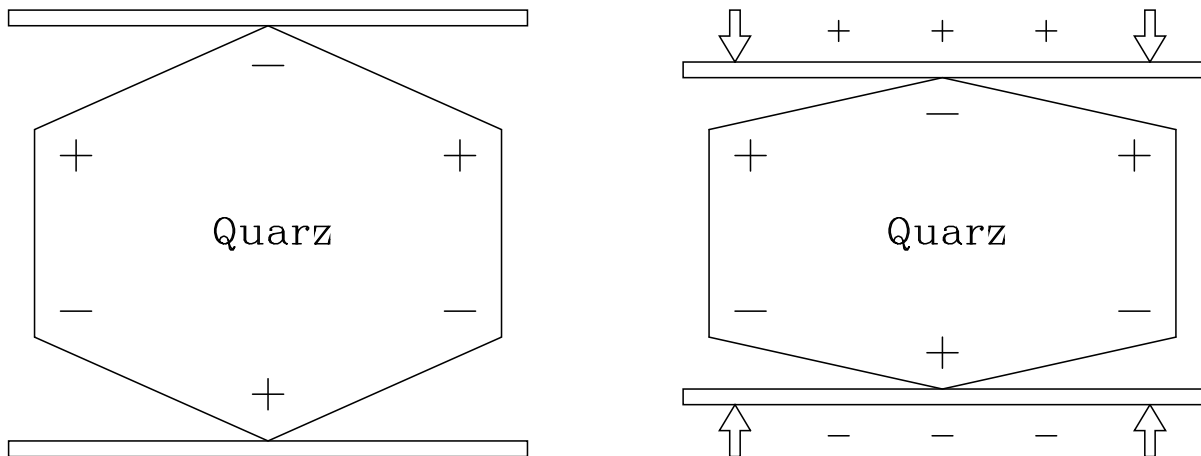


Abbildung 6: Piezoelektrizität beim Quarz (+: Si-Atom; -: O-Atom) durch Druckbelastung

Die Schwinger in Prüfköpfen für Ultraschallverfahren bestehen nicht aus Einkristallen, sondern aus piezoelektrischer Keramik wie Bariumtitanat und Bleizirkonat-Titanat (BZT).

2.6 Ultraschallprüfverfahren

Ultraschall ist aus mehreren Gründen für die Werkstoffprüfung geeignet: Geradlinige Fortpflanzung, hohes Durchdringungsvermögen, sowie hoher Reflexionsgrad an Grenzflächen. Da die theoretische untere Erkennbarkeit von Fehlern: $x_{min} = \lambda/2$ (λ : Wellenlänge) beträgt, und die hohen Frequenzen des Ultraschalls (im MHz-Bereich) kleinen Wellenlängen entsprechen, sind durch dieses Verfahren auch relativ kleine Fehler nachweisbar.

Sendet man Ultraschallwellen in ein Werkstück, so durchlaufen sie das Material mit Schallgeschwindigkeit. Sie werden an der Rückwand bzw. einem davor liegenden Fehler reflektiert, laufen zum Prüfkopf zurück und durchlaufen teilweise erneut das Werkstück. Die gebräuchlichen Reflexionsverfahren werten den reflektierten Anteil des Ultraschalls aus, wie z.B. das in diesem Versuch genutzte **Impulsechoverfahren**:

Hier dient derselbe Prüfkopf zum Aussenden und zum Empfangen des Ultraschalls, was nur durch Ultraschallimpulse realisierbar ist. Die Dauer eines Impulses beträgt ca. 10 μ s bei einer Impulsfolgefrequenz von etwa 100 Hz.

Der Ultraschallprüfkopf sendet Ultraschallimpulse in das Werkstück (reziproker piezoelektrischer Effekt); diese laufen durch das Werkstück, werden an der Rückwand oder einem Fehler reflektiert und erreichen nach einer gewissen Laufzeit wieder den Prüfkopf. Dort werden sie in den Impulspausen in Spannungspulse umgewandelt (piezoelektrischer Effekt). Die Spannungspulse werden auf dem Leuchtschirm eines Oszilloskops dargestellt. (s. Abbildung 7)

Die vertikale Auslenkung entspricht der empfangenen Energie, die horizontale Auslenkung erfolgt proportional zur Laufzeit. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit c kann der Abstand d einer reflektierenden Wand oder eines Fehlers aus der Laufzeit t bestimmt werden:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (20)$$

Bei senkrechter Einschallung erhält man unter günstigen Voraussetzungen mindestens ein Echo, das Rückwandecho; teilweise kann der Schall erneut reflektiert werden und weitere Rückwandechos hervorrufen.

Ein ultraschallreflektierender Fehler, d.h. ein Fehler mit anderem Schallwiderstand als das Werkstück selbst, verursacht ein vorher auftretendes Echo, da die Schallwellen von ihm früher reflektiert werden, als von der Rückwand und eher den Prüfkopf erreichen. Dies können z.B. Risse, Lunker, Einschlüsse usw. sein.

Bei bekannter Dicke des Werkstücks wird die horizontale Ablenkgeschwindigkeit so justiert, dass sich das Rückwandecho am rechten Bildrand des Oszilloskops befindet. Aufgrund der Proportionalität von Laufzeit und Laufweg kann der Fehlerabstand dann direkt in Längeneinheiten abgelesen werden.

Beispiele für verschiedene Prüfsituationen und die dazugehörigen Leuchtschirmbilder finden sich in Abbildung 7, sowie im Anhang (s. Abbildung 9).

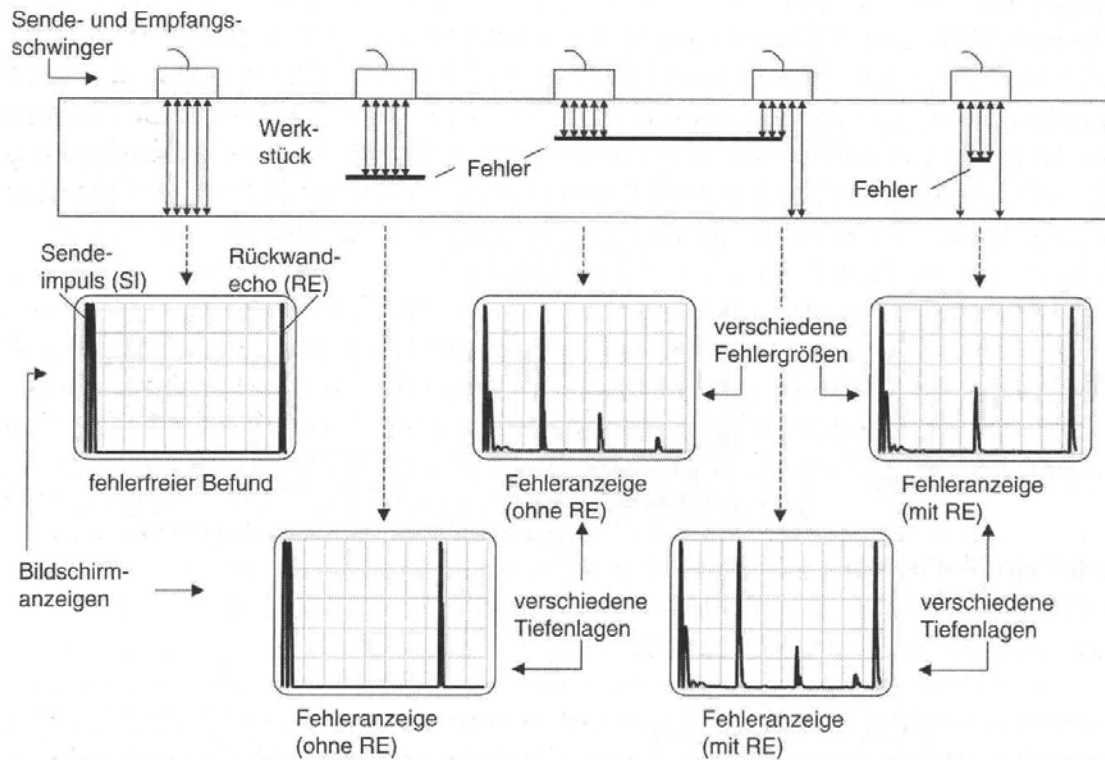


Abbildung 7: Impulsecho-Verfahren, schematisch

Neben der Fehlersuche sind auch Dickenmessungen bei bekannter Schallgeschwindigkeit und umgekehrt Schallgeschwindigkeitsmessungen bei bekannter Dicke möglich. Aus den Geschwindigkeitsmessungen lassen sich auch elastische Konstanten wie Elastizitäts- und Schubmodul berechnen (vgl. Kap. 2.2).

2.7 Schallschwächung und –verstärkung

Bei der Schallausbreitung geht ein Teil der Schallenergie durch Absorption, d.h. durch Umwandlung in Wärme verloren. Stark schallabsorbierende Materialien verwendet man zur Schalldämmung. Eine weitere Schallschwächung erfolgt in der Regel durch Streuung an Korngrenzen und Inhomogenitäten in einem Werkstück.

Die Größenangabe der Schallschwächung und Schallverstärkung α erfolgt in der Einheit Dezibel (dB); es lassen sich unmittelbar zwei Schalldrücke $p_{0,1}$ und $p_{0,2}$ miteinander vergleichen:

$$\alpha = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{0,1}}{p_{0,2}} \right) \text{ in dB} \quad (21)$$

Oft wird das Dezibel Maß verwendet, um einen Pegel relativ zu einer Bezugsgröße anzugeben; bekannt ist es in Zusammenhang mit Hörschall:

Setzt man als Bezugswert $p_{0,2}$ die Hörschwelle für das menschliche Gehör ein ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa) und für $p_{0,1}$ z.B. die Schalldruckamplitude eines Presslufthammers (2 Pa), so beträgt der Lärmpegel 100 dB.

Ist der Vergleichswert $p_{0,1}$ kleiner als der Bezugswert $p_{0,2}$, so wird der dB-Wert negativ.

2.8 Ultraschallprüfköpfe

Beim Impulsechoverfahren können Normal- und Winkelprüfköpfe benutzt werden. Mit Normalprüfköpfen kann man senkrecht, mit Winkelprüfköpfen schräg in ein Werkstück einstrahlen. Die Frequenz der Ultraschallwellen und der Einschallwinkel sind auf jedem Prüfkopf angegeben.

Die Auswahl richtet sich nach der Prüfaufgabe, dem Prüfbereich und der möglichen Lage zu erwartender Fehler. Wanddickenmessungen werden stets mit einem Normalprüfkopf durchgeführt; die Untersuchung einer Schweißnaht ist meistens nur mit einem Winkelprüfkopf möglich. Prüfköpfe hoher Frequenz werden zum Nachweis kleiner Fehler benutzt, dabei ist aber zu beachten, dass höhere Frequenzen stärker absorbiert werden, d.h. das Echo unter Umständen stark geschwächt ist. Abbildung 8 zeigt einen schematischen Schnitt durch einen Senkrechtprüfkopf.

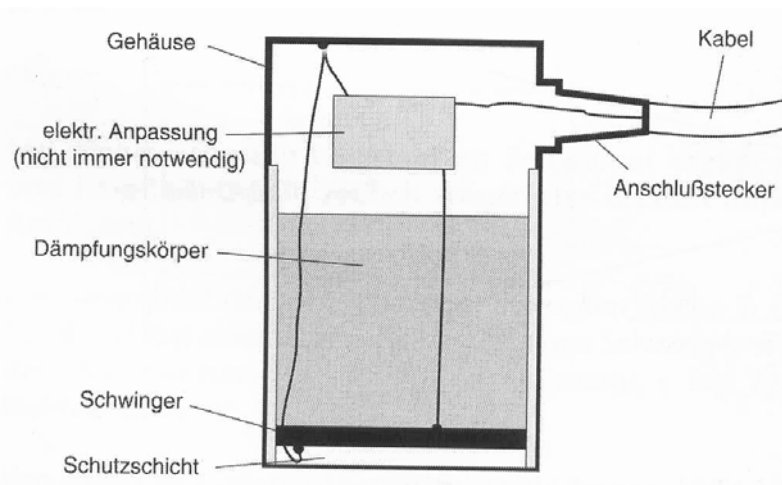


Abbildung 8: Senkrechtprüfkopf (Bauart Krautkrämer)

Der piezoelektrische Schwinger wird durch eine Schutzschicht vor Beschädigung und Abrieb geschützt. Zur Erzeugung von Impulsen bestimmter Dauer wird der Schwinger mit Hilfe eines Dämpfungskörpers gedämpft, dieser absorbiert zusätzlich den zur Rückseite abgegebenen Schall.

Fehler, die aufgrund ihrer Lage oder Form bei Benutzung eines Senkrechtprüfkopfes kein verwertbares Echo liefern, werden mit Winkelprüfköpfen (s. Anhang) geortet, die schräg in den Prüfling einschallen.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Geräte

Zur Durchführung des Versuches stehen zur Verfügung:

- Ultraschall-Dialoggerät USM 3 (*Krautkrämer*)
- Ultraschall-Dialoggerät USD 10 (*Krautkrämer*)
- Senkrechtprüfkopf MB4F mit 4MHz (*Krautkrämer*)
- Kontrollkörper 1 (DIN 54120)
- Schieblehre
- Koppelmedium ZG5

3.2 Proben

Es stehen vier Proben zur Verfügung:

- Probe 1: Treppenkörper (Werkstoff: Stahl)
- Probe 2: unbekannter Werkstoff
- Probe 3: Werkstoff (Dichte, Querkontraktionszahl sind tabelliert oder auf der Probe angegeben)
- Probe 4: fehlerhaftes Bauteil (Werkstoff: Stahl)
- Probe 5: fehlerhaftes Bauteil (Werkstoff: Stahl)

3.3 Versuchsablauf

Die Prüfköpfe sind empfindlich, deshalb sind sie vorsichtig zu handhaben. Die bereitliegenden Gummiunterlagen sind unbedingt zu benutzen, um Verschmutzungen der Umgebung mit dem Koppelmedium zu vermeiden.

Machen Sie sich zunächst mit Hilfe der Bedienungsanleitung mit den wichtigsten Funktionen des Ultraschallgerätes vertraut und testen Sie sie auf einer glatten Werkstoffoberfläche, z.B. dem Kontrollkörper 1. Benutzen Sie stets Koppelmittel, um Reflexionen an der Oberfläche zu minimieren. Der Prüfkopf wird mit dem Zeigefinger angedrückt und leicht hin- und hergedreht, bis das erste Rückwandecho maximale Höhe erreicht. Erst dann wird die Echohöhe über die Schallverstärkung des Gerätes auf etwa 80 % Bildschirmhöhe eingestellt.

Nach einer Messung wird das Koppelmittel mit Papiertüchern von der Probe gewischt.

3.3.1 Dickenbestimmung

Führen Sie zunächst mit Hilfe des Kontrollkörpers 1 eine Bereichsjustierung für 100 mm Stahl durch (s. Bedienungsanleitung).

Vermessen Sie dann jede Stufenhöhe der Probe 1 fünfmal mit der Schieblehre.

Anschließend ist jede Stufenhöhe fünfmal mit Ultraschall zu vermessen. Beachten Sie dazu, dass Entfernungsmessungen vorzugsweise zwischen dem ersten und zweiten Rückwandecho durchzuführen sind.

Notieren Sie für jede Messung den am Gerät eingestellten Prüfbereich und beachten Sie die Zahl der Nachkommastellen.

3.3.2 Schallgeschwindigkeitsmessung

Vermessen Sie die jeweilige Probe mit der Schieblehre (Quader: Länge, Breite und Höhe; Zylinder: Höhe). Stellen Sie die Schallgeschwindigkeit am Gerät so ein, dass die mit der Schieblehre gemessenen Distanzen zwischen den Rückwandechos ablesbar sind.

Wie lässt sich die Messgenauigkeit verbessern?

3.3.3 E-Modul-Bestimmung

Bestimmen Sie über die Schallgeschwindigkeiten (s. Kap. 3.3.2) den E-Modul der jeweiligen Proben.

3.3.4 Fehlersuche

Die Abmessungen der fehlerhaften Proben sind mit der Schieblehre zu messen. Die Proben sind mit dem Senkrechtprüfkopf auf Fehler zu untersuchen; die Fehlersuche sollte hier zwischen dem Sendeimpuls und dem ersten Rückwandecho erfolgen.

Schätzen Sie anhand des Echobildes ab, ob der Durchmesser des Fehlers größer oder kleiner als derjenige des Schallbündels ist.

Je nach Form der Probe ist diese von mehr als einer Seite aus abzuschallen.

4 Versuchsauswertung

Er ist bei diesem Versuch eine statistische Fehlerabschätzung für den Verfahrensvergleich notwendig. Insbesondere werden folgende Formeln für n Messwerte benötigt.

Mittelwert (arithmetisches Mittel):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (22)$$

Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (23)$$

Messunsicherheit bei 95% Vertrauensniveau:

$$\Delta x = \tau \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

τ ist hierbei der Student-Faktor (auch: t-Faktor), dieser ist Abhängig von der Stichprobenanzahl und dem Vertrauensniveau. Eine Tabelle befindet sich im Anhang (Tabelle 2).

4.1 Dickenbestimmung

Fertigen Sie eine maßstabsgetreue Skizze des Treppenkörpers an.

Für beide Verfahren (Schieblehre und Ultraschall) sind die pro Stufe die Messergebnisse, Mittelwerte und Messunsicherheiten anzugeben und zu vergleichen.

Welches Verfahren liefert genauere Ergebnisse?

4.2 Schallgeschwindigkeitsmessung

Bestimmen Sie anhand der mittleren Schallgeschwindigkeit das Material der jeweiligen Probe. Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den benötigten Materialkonstanten. Weiter sind die Messergebnisse, Mittelwerte und Messunsicherheiten anzugeben und mit den tabellierten Werten zu vergleichen.

4.3 E-Modul-Bestimmung

Bestimmen Sie anhand der mittleren Schallgeschwindigkeit das Material der jeweiligen Probe. Mit den gegebenen Werten für die Dichte und die Querkontraktionszahl und den gemessenen Werten für Schallgeschwindigkeit ist der E-Modul der Proben zu bestimmen. Messergebnisse, Mittelwerte und Messfehler sind anzugeben und mit den tabellierten Werten zu vergleichen.

4.4 Fehlersuche

Fertigen Sie maßstabsgetreue Zeichnungen der Proben und ihrer Fehler (soweit möglich) an, und zwar im Querschnitt als auch in der Draufsicht.

5 Literatur

- [1] J. und H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*; Springer-Verlag, Berlin 1986
- [2] V. Deutsch et al., *Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung, Bd.1 Die Ultraschallprüfung* Castell Verlag, Wuppertal 1999
- [3] H. Blumenauer, *Werkstoffprüfung*, VEB Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig 1989
- [4] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, Springer Verlag 2003
- [5] Bergmann, Schäfer, *Lehrbuch der Experimentalphysik*; Band 1; de Gruyter-Verlag, Berlin
- [6] W. Walcher, *Praktikum der Physik*, Teubner Verlag, Stuttgart 1989
- [7] E. Macherauch, *Praktikum in Werkstoffkunde*; uni-text; Vieweg-Verlag, 1992
- [8] Ilschner, *Werkstoffwissenschaften*; Springer-Verlag; Berlin 1990
- [9] S. Steeb et al., *Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung*, 2. Auflage, Expert Verlag, Ehningen 1988
- [10] Script: Tipps zur Fehlerrechnung der Technische Fakultät der Universität Kiel <http://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/allgemein/fehlerrechnung.pdf> [Stand: 26.2.14]

Die Begriffserklärungen in den Fußnoten entstammen der Wikipedia, ihre Inhalte steht unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation: www.gnu.org/copyleft/fdl.html

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Longitudinalwelle	2
Abbildung 2: Transversalwelle	2
Abbildung 3: Modell eines elastischen Festkörpers.....	3
Abbildung 4: Senkrechtes Auftreffen einer Schallwelle auf die Grenzfläche Strahl / Wasser mit $W_1 > W_2$ (a) Wasser / Strahl mit $W_1 < W_2$ (b).....	5
Abbildung 5: Brechung und Reflexion einer longitudinalen Schallwelle an einer Grenzfläche zweier fester Medien.	6
Abbildung 6: Piezoelektrizität beim Quarz (+: Si-Atom; -: O-Atom) durch Druckbelastung... 7	7
Abbildung 7: Impulsecho-Verfahren, schematisch.....	9
Abbildung 8: Senkrechtprüfkopf (Bauart Krautkrämer).....	10
Abbildung 9: Verschiedene Prüfsituationen und die zugehörigen Leuchtschirmbilder (Impulsecho-Verfahren).....	16

7 Anhang

7.1 Materialkonstanten

Tabelle 1: Materialkonstanten

Werkstoff	Dichte kg / m ³	c _{trans} m / s	c _{long} m / s	Z=ρc _{long} 10 ³ Pa s/m
Aluminium	2700	3130	6320	17064
Aluminiumoxid	3600	5500	9000	32400
Bakelit	1400		2590	3626
Bariumtitanat	5700		4400	25080
Beton	2000		4600	9200
Blei	11400	700	2160	24624
Glas	3600	2560	4260	15336
Glyzerin	1300		1920	2496
Gold	19300	1200	3240	62532
Grauguß (lam.)	7200	2650	4600	33120
Gußeisen	6900	2200	3500	24150
Hartgummi	1200		2300	2760
Hartmetall	11000	4000	6800	74800
Kadmium	8600	1500	2780	23908
Kupfer	8900	2260	4700	41830
Lithiumsulfat	2060		4720	9723
Luft	1		333	0
Magnesium	1700	3050	5770	9809
Messing	8100	2120	4430	35883
Motorenöl	870		1740	1514
Nickel	8800	2960	5630	49544
Platin	21400	1670	3960	84744
Plexiglas	1180	1430	2730	3221
Polyamid	1100	1080	2620	2882
Polyethylen	940	925	2340	2200
Polystyrol	1060	1150	2380	2523
PVC-hart	1400	1060	2395	3353
Porzellan	2400	3500	5600	13440
Quarz	2650		5760	15264
Quarzglas	2600	3515	5570	14482
Silber	10500	1590	3600	37800
Stahl	7850	3250	5920	46472
Titan	4540	3180	6230	28284
Uran	18700		3200	59840
Wasser	1000		1480	1480
Wismut	9800	1100	2180	21364
Wolfram	19100	2620	5460	104286
Zink	7100	2410	4170	29607
Zinn	7300	1670	3320	24236

7.2 Echobilder

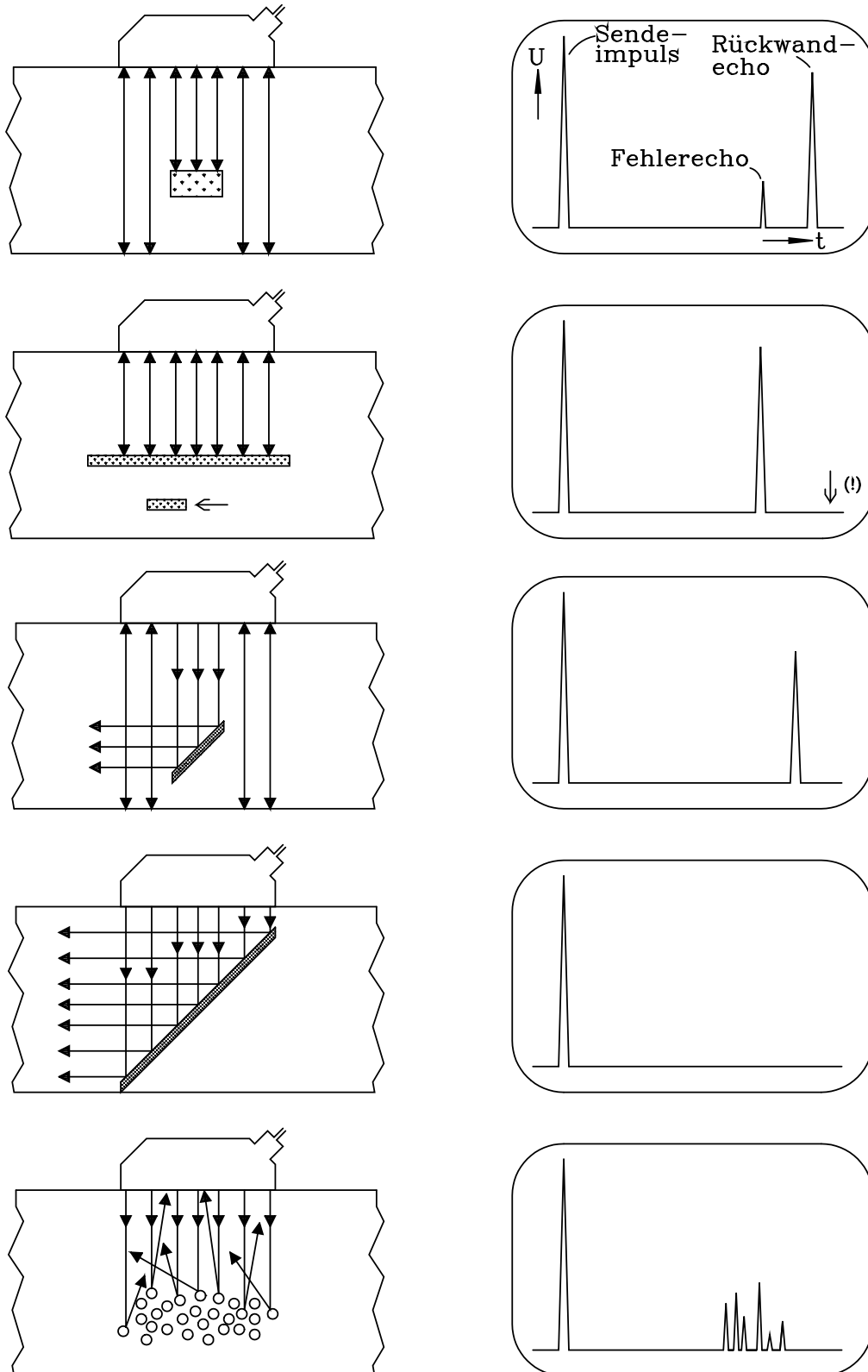


Abbildung 9: Verschiedene Prüfsituationen und die zugehörigen Leuchtschirmbilder (Impulsecho-Verfahren)

7.3 Student-Faktor

Tabelle 2: Student-Faktor

Anzahl n der Einzelwerte	1- α = 68,3 %		1- α = 90 %		1- α = 95 %		1- α = 99 %		1- α = 99,5 %		1- α = 99,7 %	
	t	t/\sqrt{n}	t	t/\sqrt{n}	t	t/\sqrt{n}	t	t/\sqrt{n}	t	t/\sqrt{n}	t	t/\sqrt{n}
2	1,84	1,30	6,31	4,46	12,71	8,98	63,66	45,01	127,32	90,03	235,8	166,7
3	1,32	0,76	2,92	1,69	4,30	2,48	9,93	5,73	14,09	8,13	19,21	11,09
4	1,20	0,60	2,35	1,18	3,18	1,59	5,84	2,92	7,45	3,73	9,22	4,61
5	1,15	0,51	2,13	0,95	2,78	1,24	4,60	2,06	5,60	2,50	6,62	2,96
6	1,11	0,45	2,02	0,82	2,57	1,05	4,03	1,65	4,77	1,95	5,51	2,25
8	1,08	0,38	1,90	0,67	2,37	0,84	3,50	1,24	4,03	1,42	4,53	1,60
10	1,06	0,34	1,83	0,58	2,26	0,71	3,25	1,03	3,69	1,17	4,09	1,29
13	1,05	0,29	1,78	0,49	2,18	0,60	3,05	0,85	3,43	0,95	3,76	1,04
20	1,03	0,23	1,73	0,39	2,09	0,47	2,86	0,64	3,17	0,71	3,45	0,77
30	1,02	0,19	1,70	0,31	2,05	0,37	2,76	0,50	3,04	0,56	3,28	0,60
32	1,02	0,18	1,70	0,30	2,04	0,36	2,74	0,49	3,02	0,53	3,26	0,58
50	1,01	0,14	1,68	0,24	2,01	0,28	2,68	0,38	2,94	0,42	3,16	0,45
80	1,00	0,11	1,66	0,19	1,99	0,22	2,64	0,30	2,89	0,32	3,10	0,35
100	1,00	0,10	1,66	0,17	1,98	0,20	2,63	0,26	2,87	0,29	3,08	0,31
125	1,00	0,09	1,66	0,15	1,98	0,18	2,62	0,23	2,86	0,26	3,07	0,27
200	1,00	0,07	1,65	0,12	1,97	0,14	2,60	0,18	2,84	0,20	3,04	0,21
über 200	1,00	$\frac{1,00}{\sqrt{n}}$	1,65	$\frac{1,65}{\sqrt{n}}$	1,96	$\frac{1,96}{\sqrt{n}}$	2,58	$\frac{2,58}{\sqrt{n}}$	2,81	$\frac{2,81}{\sqrt{n}}$	3,00	$\frac{3,00}{\sqrt{n}}$