

## Ultraschallprüfung 1 (US1)

### 1 Versuchsziel

Ziel und Aufgabe der Werkstoffprüfung ist es, einerseits Kenngrößen für die Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften und für die Bauteildimensionierung zu ermitteln und andererseits die bei der Herstellung und Verarbeitung der Werkstoffe bzw. Werkstücke auftretenden Fehler rechtzeitig zu erkennen. Damit ist die Werkstoffprüfung ein wichtiger Bestandteil für die Qualitätssicherung und Qualitätsüberwachung.

Eine wichtige Rolle spielen dabei die Verfahren der *zerstörungsfreien* Werkstoffprüfung. Ausgehend von den Versuchsgrundlagen soll die Problematik im Versuch - Fehlerprüfung - an Hand der Ultraschallprüfung diskutiert werden:

- Kennenlernen des Ultraschall-Echo-Verfahrens und seiner Grenzen
- mittels Ultraschall-Prüftechnik Fehler in Testkörpern zu detektieren
- mittels Ultraschall-Prüftechnik Wanddicken zu bestimmen

### 2 Vorteile und Verfahrensgruppen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung

Unter den oben genannten Gesichtspunkten zeichnen sich die Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung durch folgende Vorteile aus.

- Die Prüfung kann direkt am Objekt während des Produktionsprozesses vorgenommen werden.
- Die Prüfung kann unter normalen oder bestimmt vorgegebenen Betriebsbedingungen ausgeführt werden.
- Es ist eine 100 %ige Prüfung gleichzeitig auf mehrere Eigenschaften hin möglich.
- Die Verfahren liefern eine fast 100 %ige Sicherheit für das Verhalten eines Bauteils.
- Die Überwachung einzelner Produktionsstufen und -prozesse ist getrennt möglich; durch automatische Auswertung der Messwerte ist eine kurzzeitige Korrektur der Technologie möglich (Rückkoppelprinzip).
- Die Methoden verlangen meist eine sehr kurze Prüfzeit.
- Teile mit sehr hohen Material- und Herstellungskosten gehen durch die Prüfung nicht verloren (Prüfung einmaliger, kostbarer Teile).
- Die zeitliche Beobachtung von aufgefundenen Fehlern, deren Veränderung oder Stillstand, besonders an großen Objekten ist möglich.
- Die Prüfverfahren können automatisiert werden.

Nachteilig ist, dass die Anzeige der zerstörungsfreien Prüfverfahren stets mit Hilfe der aus der zerstörenden Prüftechnik bekannten Prüfmethoden kalibriert werden muß. Die zerstörungsfreien Prüfverfahren sind daher Relativverfahren. In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung ist eine Vielzahl moderner Verfahren bekannt [1]. Am häufigsten benutzt werden:

- die Penetrierverfahren (Flüssigkeitseindringverfahren)
- das Magnetpulververfahren
- das Wirbelstromverfahren
- die Röntgen- und Gammastrahlenprüfungen
- die Ultraschallprüfung
- die optische Holographie
- sowie die Schallemissionsanalyse

Computergestützte Messdatenerfassung bzw. -auswertung und integrierte Bildverarbeitung werden immer häufiger in der zerstörungsfreien Prüfung zur Produktionssteuerung und Qualitätskontrolle eingesetzt, Ultraschall-Prüfverfahren sind dabei eine Gruppe. Nachteil solcher computergesteuerten Prüfverfahren ist, dass der Anwender nicht sofort sieht, wie läuft das Verfahren ab, was beachtet werden. Deshalb wird in diesem Versuch auf die klassische Technik zurückgegriffen.

### 3 Ultraschall-Prüftechnik

Bedingt durch die Entwicklungsetappen der Ultraschall-Prüftechnik sind drei Ultraschall-Prüfverfahren bekannt: Das Durchschallungsverfahren, das Resonanzverfahren sowie das Impuls-Echo-Verfahren. Wegen seiner einfachen Durchführbarkeit und hohen Aussagefähigkeit der Prüfergebnisse ist das **Impuls-Echo-Verfahren** das am häufigsten zur Fehlersuche angewendete Ultraschallprüfverfahren.

Schwerpunkte der Werkstoffprüfung mit Ultraschall sind:

- Schweißnahtprüfung
- Blechprüfung
- Prüfung von Schmiedestücken
- Prüfung von Maschinenteilen
- Gussteilprüfung
- Prüfung von polymeren und keramischen Werkstoffen

#### 3.1 Definition und verwendete Frequenzen für Materialprüfungen

Als Ultraschall bezeichnet man alle mechanischen Schallwellen mit Frequenzen oberhalb 20 kHz. Im Gegensatz zu den elektromagnetischen Wellen sind mechanische Schwingungen an ein elastisches Medium gebunden. Für die Materialprüfung kommt der Bereich von 0,25 MHz bis 10 MHz mit Wellenlängen der Größenordnung von einigen Millimetern in Frage. Festgestellt werden Materialfehler wie Risse, Lunker u.ä., außerdem kann die Materialdicke besonders an unzugänglichen Stellen gemessen werden. Mit höheren Frequenzen (bis maximal 120 MHz je nach Einsatzzweck) lassen sich auch spezielle Gefügeuntersuchungen durchführen.

Die Materialprüfung bei derartig hohen Frequenzen beruht auf einer guten Bündelung des Schallstrahles und dem hohen Reflexionsgrad dünnster Materialtrennungen. Niedrige Frequenzen sind wegen der größeren Wellenlänge für grobes Gefüge (z. B. Gußgefüge) oft besonders geeignet.

### 3.2 Ultraschall-Erzeugung

Ultraschall wird mit Hilfe elektroakustischer Wandler unter Ausnutzung des piezoelektrischen oder magnetostriktiven Effektes erzeugt. Diese Wandler (z. B. Quarz, Bariumtitanat, Piezokeramik bzw. Nickel-Blechkpakete) werden durch elektrische, hochfrequente Wechselspannungen zu mechanischen Schwingungen unter Ausnutzung des Resonanzeffektes angeregt. Die Resonanzfrequenz hängt von der Dicke  $d$ , z.B. des Quarzscheibchens ab:

$$f \text{ [MHz]} = \frac{2,8}{d \text{ [mm]}} \quad (1)$$

für Quarz gilt somit:

$$\begin{aligned} f &= 1,0 \text{ MHz} \rightarrow d = 2,8 \text{ mm} \\ f &= 2,0 \text{ MHz} \rightarrow d = 1,4 \text{ mm} \\ f &= 4,0 \text{ MHz} \rightarrow d = 0,7 \text{ mm} \\ f &= 6,0 \text{ MHz} \rightarrow d = 0,47 \text{ mm} \\ f &= 10,0 \text{ MHz} \rightarrow d = 0,28 \text{ mm} \\ f &= 25,0 \text{ MHz} \rightarrow d = 0,112 \text{ mm} \end{aligned}$$

Aus diesem Grund: **Vorsicht beim Arbeiten mit den Tastköpfen** - besonders bei hohen Frequenzen - da die Quarzscheibe leicht bricht, auch wenn sie eine Kunststoffschutzfolie trägt!

Es lassen sich sowohl Longitudinalwellen als auch Transversalwellen anregen, die jeweils unterschiedliche Schwingungsmechanismen zeigen.

### 3.3 Eigenschaften von Ultraschall

Die Ausbreitung des Ultraschallfeldes wird begrenzt durch:

**Absorption**, die frequenzabhängig ist. Bei zähen Materialien ist sie groß (Kupfer), bei anderen Materialien wie Stahl und Aluminium gering,

**Streuung**, die besonders stark ist, wenn das Gefüge einen Korndurchmesser der Größe der Wellenlänge  $1/3 \lambda$  bis  $1 \lambda$  erreicht,

**Reflexion** an der Grenzschicht, deren Größe von Verhältnis der Schallwiderstände abhängt.

(Schallwiderstand = Dichte ( $\rho$ ) \* Schallausbreitungsgeschwindigkeit ( $v$ )).

Stoffe mit hohem Schallwiderstand nennt man schallhart, das Gegenteil ist schallweich.

Das gilt nicht mehr für Schichten von der Größenordnung der Wellenlänge  $\lambda$  und darüber. Der Reflexionsgrad  $R$  wird bestimmt aus

$$R = \frac{(m^2 - 1)^2}{(m^2 + 1)^2} \quad \text{mit} \quad m = \frac{\rho_1 \cdot v_1}{\rho_2 \cdot v_2} \quad \text{für} \quad d_2 \gg \lambda_2 \quad (2)$$

und dem Verhältnis von Dicke  $d$  und Wellenlänge  $\lambda$  des zweiten Stoffes, wobei  $\rho_1 v_1$  der Schallwiderstand des einen Materials,  $\rho_2 v_2$  der Schallwiderstand des anderen Materials ist. Ultraschall tritt gebündelt auf und kann somit als gerichteter Schallstrahl verwendet werden.

Die für das Material charakteristische Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ , die Frequenz  $f$  und die Wellenlänge  $\lambda$  sind durch folgende allgemeingültige Beziehung verbunden

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (3)$$

### 3.4 Das Impuls-Echo-Verfahren

Der Ultraschall wird bei dieser Verfahrensvariante in kurzen Ultraschallimpulsen ( $\mu s$  lang) in von der Impulsfolgefrequenz (10 Hz bis 100 Hz) bestimmten zeitlichen Abständen in den Prüfling gesandt.

In den Impulspausen kann das Gerät Ultraschall-Echos empfangen. Strahlt man Ultraschall in ein Werkstück ein, so wird im allgemeinen das Ultraschall an der gegenüberliegenden Wand wegen der dort angrenzenden Luft ( $R = 100\%$ ) vollständig reflektiert und vom Prüfkopf als Echo empfangen. Auf dem Leuchtschirm, Bild 1, der zur Anzeige dient, erscheint stets links der Sendeimpuls S als Zacke, dann das Rückwande Echo RE in einem Abstand vom Sendeimpuls, der direkt dem vom Schall im Werkstück zurückgelegten Weg proportional ist. Dieses Bodenecho wird erneut reflektiert und nach Durchlaufen des gesamten Prüfstückes wieder auf dem Leuchtschirm zu sehen sein (bei entsprechender Maßstabeinstellung). So erscheinen mehrere Echos mit abnehmender Amplitude, siehe auch Bild 2, bis die eingestrahlte Energie aufgebraucht ist. Die Mehrfachechos können vorteilhaft zur Dickenmessung benutzt werden, Kapitel 3.8.

Bringt man einen Maßstab unter dem Leuchtschirm an, kann man den vom Ultraschall zurückgelegten Weg direkt messen. Wegen der stoffspezifischen Schallgeschwindigkeit muss für jeden Werkstoff das Ultraschallgerät auf diese spezifische Schallgeschwindigkeit eingestellt werden. Stellt man das Leuchtschirmbild so ein, dass man nur den Sendeimpuls und das erste Bodenecho sieht, kann man ein Material eindeutig auf Fehler (Risse, Lunker, Löcher usw.) untersuchen, Bild 1.

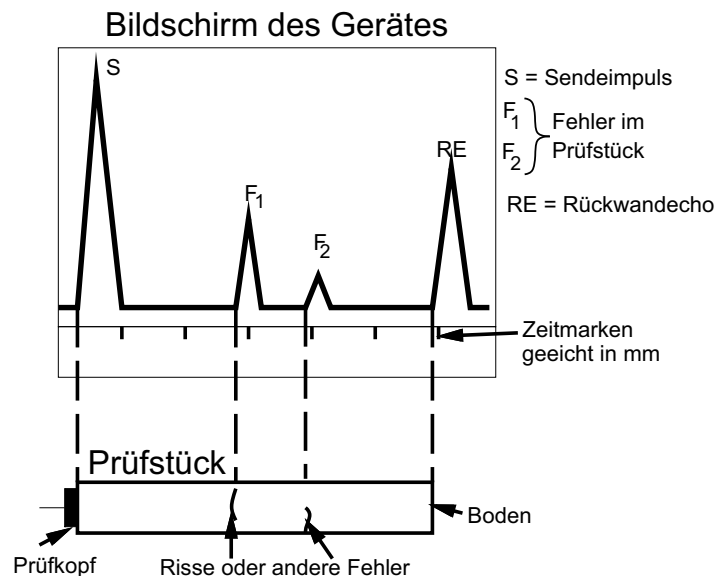


Bild 1: Schirmbild der Untersuchung eines Prüfstückes

Als wichtiges Kennzeichen für die Verwendbarkeit eines Ultraschall-Echo-Impulsgerätes, insbesondere für dünne Materialien und für den Nachweis oberflächennaher Fehler, ist neben dem Auflösungsvermögen die „Tote Zone“ anzusehen. Hierunter versteht man das an die Aufsatzfläche des Tastkopfes anschließende Gebiet, aus dem kein Echo getrennt von Sendeimpuls empfangen werden kann, weil dieser eine endliche Breite besitzt. Das Fehler- oder Bodenecho fällt mehr oder weniger mit dem Sendeimpuls zusammen. Die Intensität der Echos ist gegenüber der des Sendeimpulses um mehrere Zehnerpotenzen kleiner; sie können daher nicht angezeigt werden.

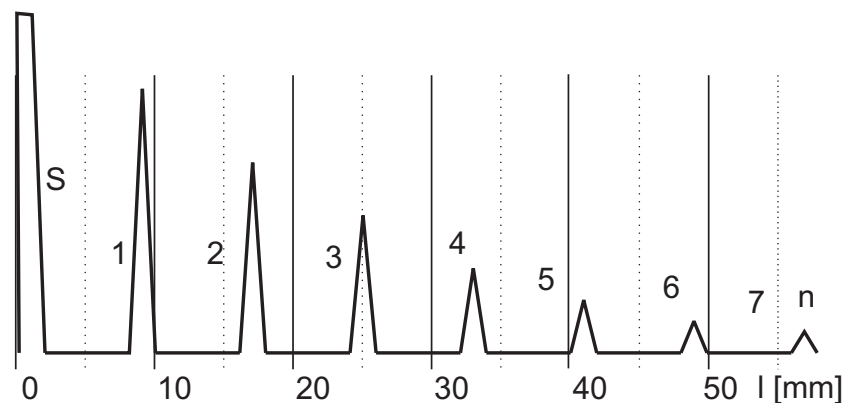


Bild 2: Schematisches Schirmbild bei Beschallung von dünnen Blechen

Die Vorteile dieses Verfahrens sind:

- nur ein Prüfkopf, der sowohl als Sender als auch als Empfänger arbeitet
- der Prüfling muss nur von einer Seite zugänglich sein
- Nachweis kleiner Fehler außerhalb der „Tote Zone“
- die Bestimmung der Tiefenlage der reflektierenden Grenzfläche (Fehler)

Das Impuls-Echo-Verfahren wird bevorzugt zur Fehlerprüfung und zur Bestimmung der Wanddicke (Dickenmessung) benutzt.

### 3.5 Prüfköpfe

Wichtigstes Zubehör zu den Ultraschallgeräten sind die Prüfköpfe. Sie können sowohl als Sender als auch als Empfänger eingesetzt werden. Es lassen sich Longitudinal- und Transversalwellen anregen, die jeweils unterschiedliche Schwingungsmoden zeigen. Als Faustregel kann angenommen werden, dass die Transversalwellengeschwindigkeit  $v_{trans}$  etwa halb so groß ist wie die Longitudinalgeschwindigkeit  $v_{long}$ .

Der Ultraschall wird vom Prüfkopf über ein Koppelmedium in das Prüfstück eingeschallt und auch über dieses Koppelmedium wieder empfangen. Für das Impuls-Echo-Verfahren werden **Normalprüfköpfe** oder **Winkelprüfköpfe** entsprechend des Prüfproblems eingesetzt. Bei den **Normalprüfköpfen** steht das Schallfeld (in der Regel) senkrecht zur Prüffläche. In Normalprüfköpfen wird überwiegend der longitudinale Wellenanteil genutzt, die Transversalwellen können infolge des längeren Schallweges zu Nebenechos führen. Der Nachweis oberflächennaher Fehler mit Normalprüfköpfen ist aufgrund der „Toten Zone“ nahezu unmöglich. Für diese Zwecke wurden sogenannte **SE-Prüfköpfe** entwickelt, d. h. Sender und Empfänger mit hoher Schallisolierung sind in einem Prüfkopf. Aufgrund der Geometrie dieser Prüfköpfe ist die Empfindlichkeit in einem bestimmten Tiefenbereich (der auch oberflächennah sein kann) besonders hoch.

### 3.6 Fehlergrößenabschätzung

Eine Aussage über die Größe des mittels Impuls-Echo-Verfahren gefundenen Fehlers, seiner Form und Orientierung zur Schallfeldachse gelingt durch Betrachtung der Echoform bzw. der Echohöhe bei verschiedenen Einschallwinkeln. Ein runder Fehler (Pore, Schlackeeinschluss) ruft bei gleicher Entfernung aus verschiedenen Einschallrichtungen etwa die gleiche Echohöhe und Echoform her-

vor (breites Echo). Als deutlich scharfes Echo markiert sich ein flächiger Fehler (Riss), wenn er senkrecht vom Ultraschall getroffen wird, Bild 3.

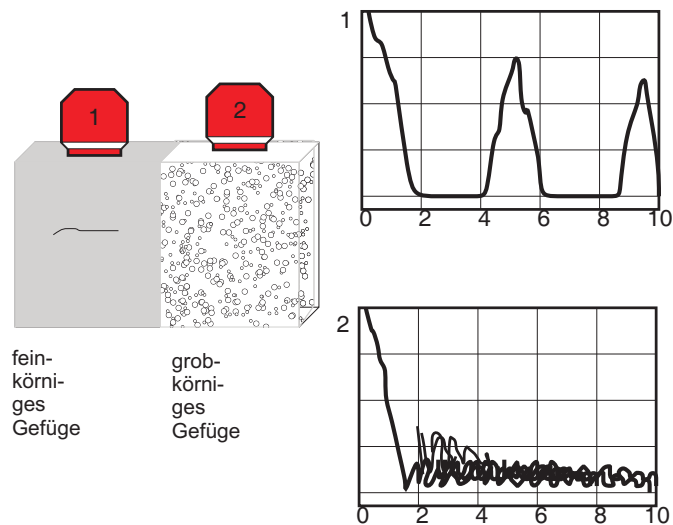


Bild 3: Grobes Gefüge verursacht starke Schallschwächung

**Wichtig:** Fehler immer senkrecht anschallen, da nur so eine Aussage über die Fehlergröße möglich ist.

Durch Wahl verschiedener Einschallrichtungen „züchtet“ man das Echo so lange, bis es eine maximale Höhe aufweist (Echodynamik). Senkrecht zur Einschallrichtung liegt dann die größte Fehlerausdehnung.

Zu quantitativen Prüfaussagen gelangt man auch, wenn die georteten Fehlerechos mit Echos von Musterfehlern (Fehler/Fehlerecho-Katalog) verglichen werden (siehe Anleitung am Praktikumsplatz). Dazu gehört viel praktische Erfahrung.

### 3.7 Fehlersuche in zylindrischen Proben mit Normal-Prüfköpfen

Die im Bild 4 skizzierten Materialfehler auf dem Bildschirm des Ultraschall-Gerätes zeigen einige verschieden ausgeprägte Fehler in Werkstoffen. Risse oder andere Fehler können auch komplizierter liegen, z. B. schräg zur Einstrahlungsrichtung oder mehrere Risse in verschiedener Höhe dicht nebeneinander. Weiter können Hohlstellen, Lunken u. ä. auftreten, bei denen man, wenn man von der gegenüberliegenden Seite einschallt, Echos in verschiedener Entfernung erhält. Die Entfernungsdifferenz ist etwa der Durchmesser der Hohlstelle. Bei dicht nebeneinanderliegenden Fehlern erscheinen entsprechend dicht nebeneinanderliegende Echos, wobei das Bodenecho schwächer, die entsprechende Zacke also kleiner wird. Bei Hohlstellen fehlt das Echo vom Boden des Prüfkörpers. Ein grobes Gefüge verursacht eine starke Schallschwächung und eine ausgeprägte Schallstreuung. Beides kann örtlich oder auch überall im Prüfkörper zum Ausfall der Rückwandechos führen, Bild 3. Die Streuung ist besonders stark, wenn der Korndurchmesser des Gefüges in der Größe der Wellenlänge  $\lambda$  bis  $\lambda/3$  liegt. Deshalb sind niedrigere Frequenzen wegen der größeren Wellenlänge für grobes Gefüge (z. B. Gussgefüge) geeigneter.

In gegossenem Material kann durch Gussfehler die Streuung stärker werden, so dass das erste Bodenecho scheinbar ohne Grund niedrig erscheint. Es ist auch möglich, dass sich durch Seigerungen u. ä. die Schallgeschwindigkeit ändert, dann erscheint das Bodenecho plötzlich in einer anderen

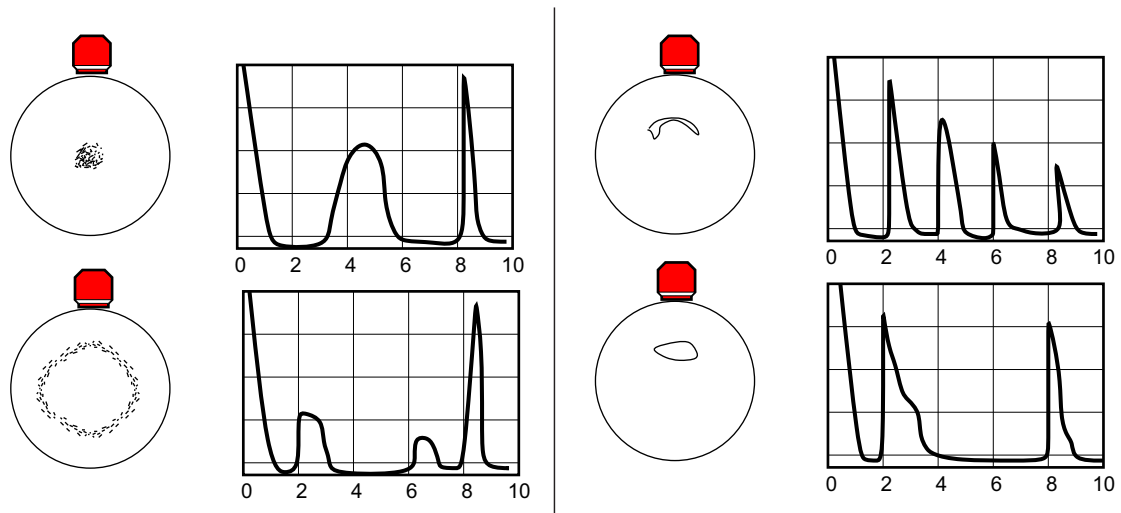


Bild 4: Arten von Schirmbildern bei verschiedenen Fehlerlagen

Entfernung. Um in unübersichtlichen Fällen aus dem Schirmbild auf die wirkliche Größe und Lage der Fehler schließen zu können, fertige man sich Übersichtsskizzen an, worin der Schallverlauf geradlinig einzuzeichnen ist und Reflexionen, Absorption usw. wie in der geometrischen Optik erfolgen.

Für Fehler, die direkt im Schallfeld liegen, werden zur Fehlerprüfung Normalprüfköpfe verwendet. Die Größe der im Werkstoff noch nachweisbaren Fehler ergibt sich aus der Ultraschallwellenlänge, die bei den zur Ultraschallprüfung verwendeten Frequenzen von 1 bis 10 MHz in der Größenordnung von einigen Millimetern liegt. Die Materialprüfung bei diesen hohen Frequenzen beruht auf einer guten Bündelung des Schallstrahles und dem hohen Reflexionsgrad dünnster Materialtrennungen. Bei der Wahl der Prüffrequenz ist stets ein Kompromiss zwischen der Schallstreuung und der kleinsten noch nachweisbaren Fehlergröße erforderlich.

Zwischen Prüffrequenz  $f$ , Schallgeschwindigkeit  $v$  und kleinstem noch nachweisbarem Reflektordurchmesser  $d_{min}$  (Fehler) gilt folgende empirische Regel:

$$f > v/4d_{dim}. \quad (4)$$

Werkstofftechnische Fehler können Risse, Lunker, Löcher, Hohlräume, Schlackeeinflüsse o. ä. sein. Ultraschall eignet sich auch zum Auffinden von vergrabenen Bohrungen, Materialspalten bei Lötprozessen, nicht verschlossenen Sägeschnitten und zur Einschätzung der Haftfestigkeit von Schichtverbunden sowie zur Dickenmessung. Das Impuls-Echo-Verfahren liefert ein Oszillogramm, in dem die einzelnen Echos über einer Zeitachse dargestellt sind. Diese Information wird von einer festgelegten Prüfkopfposition aus erhalten (A-Bild).

Durch abscannen des Prüfobjektes mit dem Prüfkopf läßt sich ein Fehlerbild aufbauen, das einen Schnitt durch das Prüfobjekt darstellt (B-Bild).

Im C-Bild wird der Fehler auf die abgescannte Fläche projiziert (entspricht etwa einer Draufsicht). Durch das Abscannen des Prüfobjektes von der gegenüberliegenden Seite kann aus der Differenz der Fehlertiefen die Fehlerausdehnung ermittelt werden.

### 3.8 Dickenmessung nach der Methode der Mehrfachechos

Der Abstand zwischen den (mehrfachen) Rückwandechos in Bild 2 bleibt konstant. Auf dem Leuchtschirm wird eine Folge von Echos abnehmender Höhe sichtbar. Der Echoabstand ist ein Maß für die Laufzeit des Schalls im Meßobjekt und somit auch ein Maß für dessen Dicke. In der Zeit zwischen zwei Echos hat der Ultraschallimpuls das Meßobjekt zweimal durchlaufen! Die zurückgelegte Wegstrecke ist demnach gleich der doppelten Materialdicke. Die Genauigkeit der Dickenmessung kann erhöht werden, wenn man die Abstände einer größeren Zahl Echos zusammenfasst und mit Hilfe der Abstandsskala die Entfernung vom ersten bis zum letzten Echo ausmisst.

Die gesuchte Dicke  $d$  errechnet sich dann aus:

$$d = \frac{\text{Abstand } l \text{ (Sendeimpuls - } n_{\text{tes}} \text{ Echo)}}{\text{Zahl } n \text{ der Echos}} \quad (5)$$

## 4 Vorbereitungsaufgaben

1. Warum muß der Tastkopf mit Hilfe einer Flüssigkeit an den Prüfling angekoppelt werden?
2. Leiten Sie die Gleichung zur Bestimmung der Materialdicke aus der Schirmbildanzeige her!
3. Welche weiteren Ultraschall-Prüfverfahren sind Ihnen bekannt? Zeichnen Sie das Prinzip dieser Verfahren auf und geben Sie ihre Vor- und Nachteile an!
4. Welche weiteren Werkstoffparameter lassen sich durch das Ultraschallverfahren bestimmen?

## 5 Praktikumsaufgaben

1. Ermitteln Sie die Breite der „Toten Zone“ für die ausgelegten Prüfköpfe bei verschiedenen Frequenzen!
2. Führen Sie Untersuchungen am Kontrollkörper 1 (DIN EN 2400) [2], Bild 5, bezüglich der Anzeigempfindlichkeit und des Tiefenaufösungsvermögens durch!

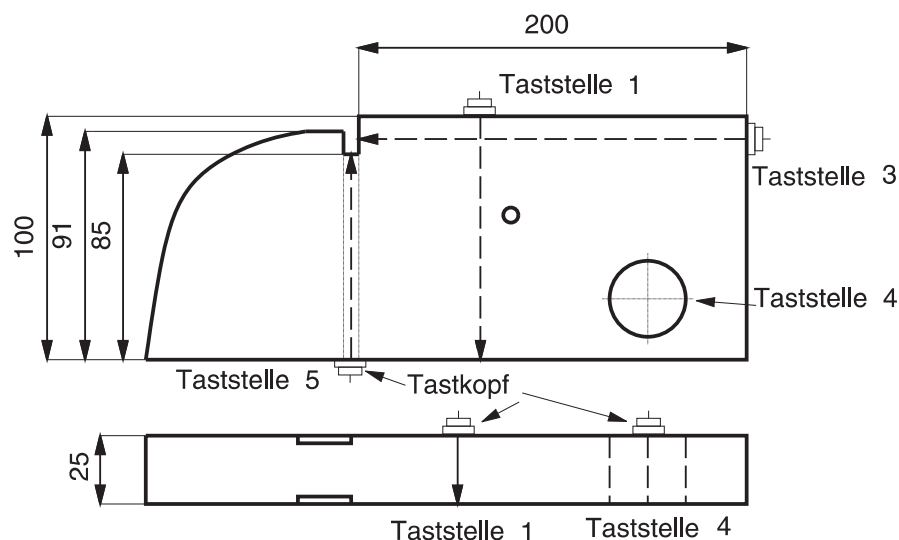


Bild 5: Massskizze des Kontrollkörpers 1 nach DIN EN 2400, [2]



3. Untersuchen Sie die vorgelegten Prüfkörper auf mögliche enthaltene Fehler. Bestimmen Sie die Lage und Form der Fehler!
4. Es sind die Wanddicken an vorgelegten Prüfkörpern zu bestimmen.

**Eine detaillierte Aufgabenstellung liegt am Versuchsplatz im  
Meitnerbau, G.-Kirchhoff-Str. 5, Raum 3.2.307 aus!**

## Literaturliste

- [1] BLUMENAUER, H.: *Werkstoffprüfung*. 6. korr. Auflage. Weinheim : VCH-Verlagsgesellschaft, 1994. – 426 S. – ISBN 978-3342005476
- [2] Ultraschallprüfung - Beschreibung des Kalibrierkörpers Nr. 1. In: *Deutsche Norm DIN EN ISO 2400* (2013)
- [3] STEEB, S.: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*. 4. Auflage. Expert Verlag, 2011. – ISBN 978-3816928522
- [4] KRAUTKRÄMER, J.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5. überarbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 1986. – 669 S. – ISBN 978-3540157540
- [5] WEISSBACH, W.: *Werkstoffkunde*. 18. Auflage. Springer-Vieweg-Verlag, 2012
- [6] MACHERAUCH, E. ; ZOCH, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. 11. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 602 S. – ISBN 978-3-8348-0343-6
- [7] BECKER, E.: *Praktikum Werkstoffprüfung*,. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1980
- [8] MILLNER, R.: *Ultraschalltechnik - Grundlagen und Anwendung*. Physik Verlag, 1987
- [9] NITZSCHE, K.: *Schichtmeßtechnik*. 1. Auflage. Würzburg : Vogel Buch -Verlag, 1996. – 502 S. – ISBN 3-8083-1530-8