



Die Schallgeschwindigkeit

Ultraschall zur Material- und Lackstärkenmessung von Stahl, Aluminium, GFK und CFK

Inhaltsverzeichnis

1	Die Schallgeschwindigkeit	1
1.1	Kundtsche Rohr	1
1.1.1	Aufbau.....	2
1.1.2	Physikalische Grundlagen	3
1.1.3	Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft.....	3
2	Materialstärkenmessung mittels Ultraschall-Impuls-Laufzeit-Verfahren.....	4
2.1	Wie funktioniert das Ultraschall-Impuls-Laufzeit-Verfahren?.....	5
2.2	Wanddicken- und Lackschichtdickenmessung auf Stahl, Aluminium, GFK und CFK.....	6
3	Literatur.....	7
3.1	Weblinks.....	7
3.2	Einzelnachweise	7

1 Die Schallgeschwindigkeit

Schallwellen können sich nur in einem Medium ausbreiten: einem Gas, einer Flüssigkeit oder einem Festkörper. Klar! Kein Medium, keine Schallwelle: Das Vakuum ist lautlos. Doch wie schnell breitet sich eine Schallwelle aus? Vielleicht mit 330 m/s oder doch eher mit 1530 m/s?

Beide Antworten könnten richtig sein, denn die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle - kurz Schallgeschwindigkeit genannt - hängt von vielen Faktoren ab. So ist es z.B. nicht egal, ob die Schallwelle sich in Kupfer oder Luft ausbreitet und welche Temperatur die Medien haben.

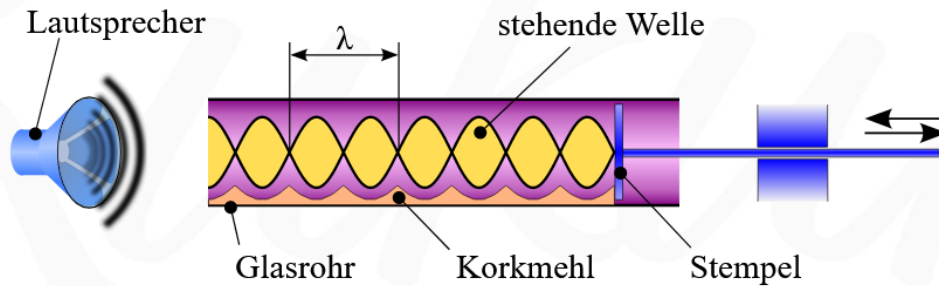
1.1 Kundtsche Rohr

Das **kundtsche Rohr** (auch kundtsche Röhre; nach dem Physiker August Kundt, der seine Beobachtungen 1866 publizierte^[1]) erlaubt es, stehende Schallwellen in einem Glasrohr sichtbar zu machen. Stehende Wellen ergeben z. B. bei fast allen Musikinstrumenten den Ton, insbesondere bei allen Arten von Flöten und Pfeifen. Durch seinen einfachen und anschaulichen Aufbau ist das kundtsche Rohr ein beliebter Demonstrationsversuch der Schulphysik.



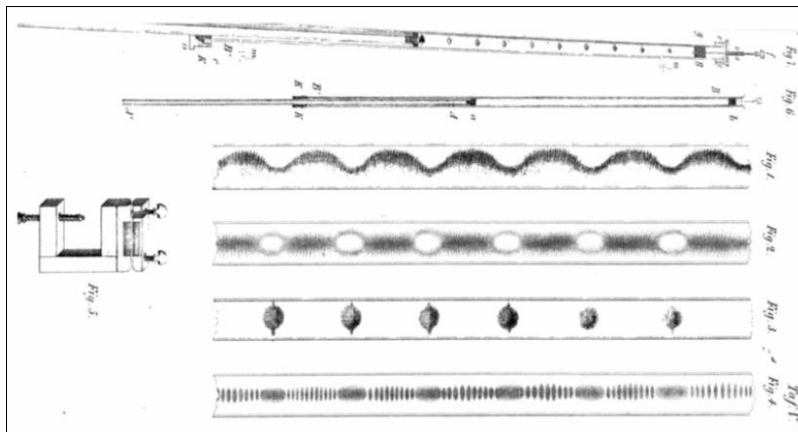
1.1.1 Aufbau

Das in dem Rohr enthaltene Korkmehl wird durch die intensive Schallwelle bewegt. Es sammelt sich dabei an Stellen, bei denen die Schallschnelle der Schallwellen am kleinsten ist, d. h. in den Knoten der stehenden Welle, und bildet dort kleine Mehlhäufchen. Zwischen diesen Mehlhäufchen befinden sich folglich die Schwingungsbäuche der stehenden Welle.



Schematische Darstellung des kundtschen Rohres mit Schallschnelle-Verteilung. Das Korkmehl sammelt sich an den Knotenpunkten der stehenden Welle

Die Mehlhäufchen bleiben auch nach dem Ausschalten des Sinustones erhalten. Sie sind nicht zu verwechseln mit dem „Aufstellen“ des Korkmehls bei eingeschaltetem Sinuston (bei mittleren Amplituden bzw. Lautstärken des Sinustones erhebt sich das Korkmehl an den Schwingungsbäuchen und bleibt fast unbewegt in einer meist lamellenförmigen Struktur stehen. Bei höheren Amplituden sind diese lamellenförmigen Erhebungen nicht zu sehen, da das Korkmehl zu sehr aufgewirbelt wird).



Darstellung der Apparatur und der Staubfiguren aus der Original-Arbeit von August Kundt, 1866

Damit Resonanz – d. h. eine stehende Welle – auftritt, muss die Länge des Rohres durch einen Stempel, der von der einen Seite in das Rohr geschoben werden kann, eingestellt werden. Am Stempel liegt ein geschlossenes Ende (und daher ein Schwingungsknoten), am offenen Rohrende dagegen ein Schwingungsbauch vor. Bärlappsporen geben unter Umständen ein besseres Bild als Korkmehl ab, da sie kleiner und leichter sind.



1.1.2 Physikalische Grundlagen

Um herzuleiten, wann im kundtschen Rohr eine stehende Welle entsteht, wird die Schnellewelle des Schalls betrachtet. Das eine Ende des luftgefüllten Glasrohres ist durch einen Stempel geschlossen, das andere Ende ist offen. Vor dem offenen Ende befindet sich die Schallquelle, ein sehr starker Lautsprecher.

- am offenen Ende hat die Schnelle einen Wellenbauch, d. h. maximale Auslenkung, weil das offene Ende mitschwingt;
- die ankommenden Schallwellen schwingen im Gleichtakt mit der Membran des Lautsprechers.

am geschlossenen festen Ende muss sich dagegen ein Knoten der Schnellewelle befinden, weil das Ende starr ist und somit nicht mitschwingt.

Aus diesen Voraussetzungen resultiert, dass für eine gegebene Wellenlänge nur bestimmte Rohrlängen in Frage kommen, bei denen Resonanz auftritt: die Länge des Rohres muss ein Vielfaches der halben Wellenlänge sein, minus einer Viertelwellenlänge.

Durch Einsetzen von mit der Schallgeschwindigkeit und Auflösen nach der Resonanzfrequenz ergibt sich:

Für die Schwingungen tritt Resonanz auf. Die Frequenz nennt man Grundschwingung oder

1. Harmonische, die weiteren Frequenzen für

1. Oberschwingung oder 2. Harmonische, 2. Oberschwingung oder 3. Harmonische usw.

1.1.3 Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft

Da mit Hilfe des kundtschen Rohres Schallwellen sichtbar gemacht werden können, kann damit die Schallgeschwindigkeit gemessen werden. Aus der vorherigen Gleichung ergibt sich: In der Gleichung wurde durch und durch ersetzt, da wir bei der Schallgeschwindigkeitsmessung die Länge des Rohres bei konstanter Frequenz variieren.

kann durch Zählen der Wellenberge bestimmt werden. Da diese aber unter Umständen nicht gut zu erkennen sind, bietet sich ein rechnerisches Vorgehen an. Dazu muss die Gleichung für zwei aufeinander folgende Resonanzen bei gleicher Frequenz gleichgesetzt werden: kann also durch Messen von und bestimmt werden. Einsetzen von und der gegebenen Frequenz in obige Gleichung liefert schließlich die Schallgeschwindigkeit.



Praktischer Aufbau eines Kundtschen Staubrohrs

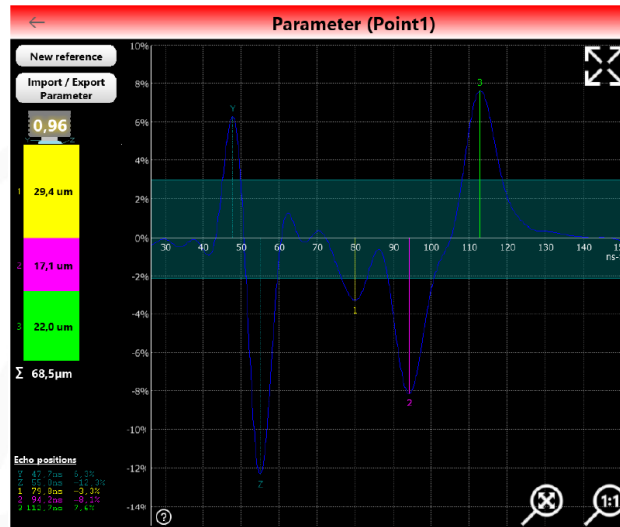
Das aufgewirbelte Korkmehl bildet ein bizarres Muster mit rippenartigen Unterstrukturen. Als übergeordnete Struktur entstehen in regelmäßigen Abständen Schwingungsbäuche (Orte, an denen die Auslenkung maximal wird) und Schwingungsknoten (Orte, an denen die Auslenkung immer null ist).

(Übrigens: Die physikalische Erklärung der Rippenstruktur ist äußerst kompliziert. Sie basiert auf der Bildung von Turbulenzen beim Umströmen der Korkteilchen und elektrostatischer Kräfte. Wir überlassen die Erklärung den Experten.) Die Schwingungsbäuche kann man nicht sehen, aber die Schwingungsknoten: An den Orten der Schwingungsknoten passiert nichts. Das Korkmehl bleibt da wo es ist: Es rührt sich nicht vom Fleck.

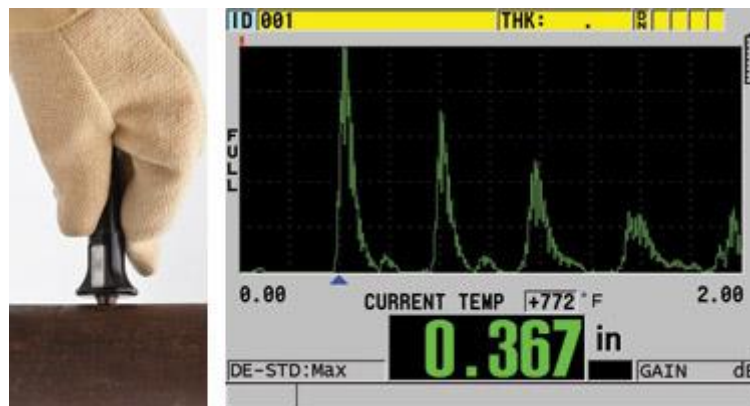
2 Materialstärkenmessung mittels Ultraschall-Impuls-Laufzeit-Verfahren

Die Arbeitsweise zum Messen von Material- und Lackstärken basiert auf der Reflexion von Ultraschallwellen an den einzelnen Grenzflächen eines Schichtsystems. Zur Messung wird das Messobjekt am Messpunkt mit einem Koppelmittel versehen; anschließend wird der Sensor am Messpunkt aufgesetzt. Der im Sensorkopf befindliche Hochfrequenz-Ultraschallgeber erzeugt nun einen Ultraschallimpuls mit hoher Bandbreite. Der Impuls durchläuft ausgehend vom Messkopf die Koppelmittel-Schicht und dringt dann in das Schichtsystem ein. An jeder Grenzfläche zwischen zwei Schichten und an der Grenzfläche zum Substrat wird jeweils ein Teil des Impulses reflektiert. Diese reflektierten Teilimpulse, Echos genannt, kehren zum Messkopf zurück. Aus den Zeitdifferenzen der Echos werden unter Einbeziehung der jeweiligen Schallgeschwindigkeiten die Schichtdicken errechnet und zusammen mit dem zeitlichen Verlauf des Echosignals, auch A-Bild genannt, angezeigt.

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 Sendephase zwischen den Anregungsimpulsen werden die rückgestreuten Echos empfangen. Nach Verstärkung werden sie über der Zeitlinie als Signale wiedergegeben.



Lackschichtdickenmessung mit einem Quindt Sonic T (mehrere Schichten sind messbar)



Beispielmessung eines Olympus 38 DL Plus

2.1 Wie funktioniert das Ultraschall-Impuls-Laufzeit-Verfahren?

Das wohl bekannteste Laufzeitmessverfahren ist die Radar Technik. Das generelle Prinzip funktioniert wie folgt: Ein Signal wird durch einen Emitter ausgesendet, trifft auf ein Objekt, welches das Signal reflektiert und zurück in Richtung des Emitters sendet. Dieser kann ebenfalls als Transceiver agieren oder es wird ein Transceiver neben den Emitter verbaut. Die Zeit, die das ausgesendete Signal benötigt, um von Emitter zu einem Objekt und zurück zum Transceiver zu gelangen wird mittels einer hochpräzisen Stoppuhr gemessen.

Es ist wichtig, dass die Geschwindigkeit des Signals bekannt ist. So arbeiten Radar basierte Systeme beispielsweise mit elektromagnetischen Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit verbreiten.

Ist die Geschwindigkeit bekannt kann anhand der Formel $2s = c * t$, mit Strecke s , Geschwindigkeit c und Laufzeit t die Strecke s zum Objekt berechnet werden.

Im Falle des Ultraschall-Impuls Laufzeitverfahrens werden Schallwellen verwendet. Je nachdem welches Material gemessen werden soll, muss die Schallgeschwindigkeit der Messung angepasst werden, da es sonst zu Messfehlern kommt. Für die Messung von Materialstärken oder Schichtaufbauten reflektieren einzelne Wellen auch an den jeweiligen Grenzschichten, wodurch die Distanz zu diesen Grenzschichten ermittelt werden kann.



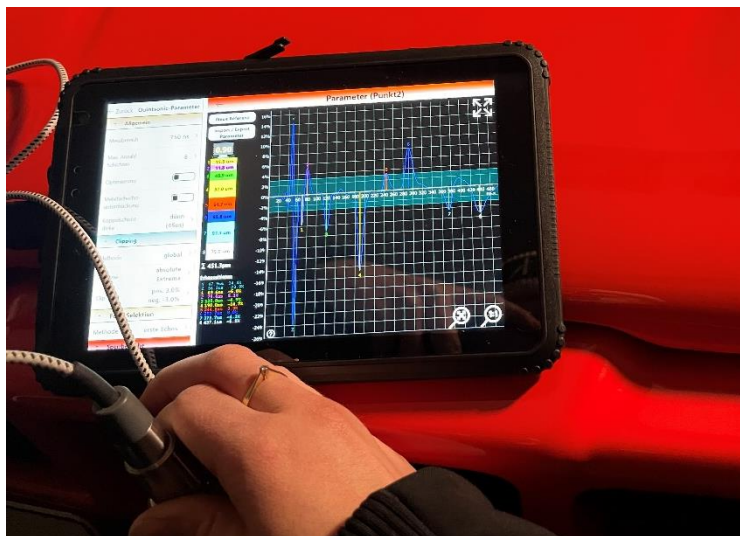
Ultraschall-Schichtdickensensor:

Dieser fungiert zugleich als Sender und als Empfänger, indem er einen Ultraschallimpuls mit Hilfe eines Koppelmittels in das Schichtsystem sendet und die an den Grenzflächen der einzelnen Schichten reflektierten Signale empfängt. Die Laufzeiten dieser Ultraschallimpulse werden ausgewertet und mit einer Auflösung von 0,1 μm in die entsprechenden Schichtdicken umgerechnet.

Messgerät und einem angeschlossenen intelligenten Ultraschall-Schichtdickensensor. Dieser fungiert zugleich als Sender und als Empfänger, indem er einen Ultraschallimpuls mit Hilfe eines Koppelmittels in das Schichtsystem sendet und die an den Grenzflächen der einzelnen Schichten reflektierten Signale empfängt. Die Laufzeiten dieser Ultraschallimpulse werden ausgewertet und mit einer Auflösung von 0,1 μm in die entsprechenden Schichtdicken umgerechnet.

2.2 Wanddicken- und Lackschichtdickenmessung auf Stahl, Aluminium, GFK und CFK

Das Messverfahren ist geeignet für Farbe, Lacke und Kunststoffschichten auf Kunststoff, Metall, Holz, Keramik und Glas.



Auf dem Lichtbild ist eine Messung an einem BMW M, mittels Quindt Sonic T zu sehen, der bekannterweise eine GFK Karosserie trägt. Auf dem Messbildschirm ist der Amplitudenverlauf der Messung zu sehen, wodurch die einzelnen Schichten sichtbar werden. Hierdurch konnte unter anderem die Lackschichtdicke ermittelt werden.



Auf dem Lichtbild ist eine Messung an einem Porsche 910 Rahmen, mittels Olympus 38 DL Plus zu sehen. Hierbei sollte die Materialstärke der verbauten Rohre mit den Herstellervorgaben verglichen werden. Auf dem Messbildschirm ist sowohl der Amplitudenverlauf als auch der Messwert erkennbar. Hierdurch konnte unter anderem die Lackschichtdicke ermittelt werden.

Bei Messobjekten mit Stahl-Substrat, deren Substrat-Wanddicke ausgemessen werden soll, liegt im Substrat meistens eine gleichbleibende Schallgeschwindigkeit vor – auch bei unterschiedlichen Legierungsbestandteilen. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich so geringfügig, dass die Auswirkung auf die Messergebnisse i.d.R. vernachlässigt werden kann.

In Materialien, z.B. in Buntmetallen und Kunststoffen, unterliegt die Schallgeschwindigkeit jedoch größeren Änderungen, so dass dadurch die Messgenauigkeit beeinträchtigt werden kann. Die Schallgeschwindigkeit muss daher mit geeigneten Verfahren bestimmt werden, z.B. durch mechanische Dickenmessungen an unbeschichteten Probekörpern bzw. durch Querschliffe bei kleineren Substratdicken.

3 Literatur

- Gottfried Schubert: Staubfiguren im Kundtschen Rohr. In: Physik in unserer Zeit. Band 12, Nr. 5, 1981, S. 147–150, doi:10.1002/piuz.19810120503.
- A. Kundt: Ueber eine neue Art Akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen. In: Annalen der Physik und Chemie, 1866, Band 127, No. 4, S. 497–523 auf Google Books

3.1 Weblinks

- Kundt'sches Rohr. 2004 (Video der FH Kaiserslautern).

3.2 Einzelnachweise

1. ↑ August Kundt: Über eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen. In: Annalen der Physik und Chemie. Band 203, Nr. 4, 1866, S. 497–523, doi:10.1002/andp.18662030402.