

Versuch AK1 Ultraschall

4.13

I. Zielsetzung des Versuches

Mit einem System aus piezoelektrischen Ultraschallsendern und -empfängern wird die Schallgeschwindigkeit in Luft bestimmt nach der Phasen- und der Laufzeitmethode.

Bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit kann die Laufzeitmethode zur Entfernungsmessung eingesetzt werden (Echo-lotprinzip). Eine Anordnung mit zwei gleichen Ultraschallsendern wirkt wie ein Doppelspalt und liefert ein typisches Ultraschall-Interferenzmuster, das ausgemessen werden soll.

Außerdem sollen noch die elektrischen Eigenschaften des Piezosenders (Impedanz) untersucht werden.

II. Vorkenntnisse

Piezoeffekt und piezoelektrische Ultraschallwandler,
RLC-Schwingkreise, Impedanz und Resonanz,
Ausbreitung von Schallwellen, longitudinale Wellen,
Schallgeschwindigkeit in Gasen,
stehende Wellen, Schwingungsmoden,
Gruppen- und Phasengeschwindigkeit, Dispersion,
Interferenz am Spalt und Doppelspalt.

Literatur

BERGMANN, SCHÄFER: Experimentalphysik, Band I
BERGMANN, SCHÄFER: Experimentalphysik, Band III
FEYNMAN, Vol I, 23-2, 23-3
BERKELEY PHYSIK-KURS, Schwingungen und Wellen

III. Theorie zum Versuch

1) Einführung

Schallwellen mit Frequenzen oberhalb der menschlichen Hörbarkeitsgrenze (15 - 20 kHz) nennt man Ultraschall. Zum Beispiel hat eine Welle mit einer Wellenlänge von 1 cm eine Frequenz, die sich gemäß $f = c/\lambda$ zu 34,4 kHz berechnet, dabei ist c die Schallgeschwindigkeit, die in trockener Luft von 20 °C etwa 344 m/s beträgt.

Mechanische Ultraschallgeber wie Pfeifen oder Sirenen erreichen Frequenzen bis 500 kHz. Bequemer sind elektroakustische Schallwandler, die elektrische Schwingungen nach dem Prinzip des umgekehrten Piezoeffekts in mechanische umwandeln.

2) Der piezoelektrische Effekt

Den piezoelektrischen Effekt beobachtet man bei einigen Kristallen und keramischen Materialien:

Kristalle:	keramische Massen:
Quarz SiO_2	PZT (Bleizirconat-Titanat)
Turmalin	Bariumtitanat
Lithiumsulfathydrat $\text{Li}_2\text{SO}_4 + 6 \text{H}_2\text{O}$	Bleimetaniobat
Seignette-Salz (Kalium-Natrium-Tartrat) $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 + 4 \text{H}_2\text{O}$	Lithiumniobat
ADP (Amonium-Dihydrogen-Phosphat) $\text{NH}_4 \cdot \text{H}_2\text{PO}_4$	
KDP (Kalium-Dihydrogen-Phosphat) $\text{K} \cdot \text{H}_2\text{PO}_4$	

Tabelle 1: Piezoelektrische Materialien

Diese Materialien haben unterhalb einer kritischen Temperatur (Curie-Temperatur) ein elektrisches Dipolmoment. Erhitzt man diese Materialien über die Curietemperatur, legt ein elektrisches Feld an und kühlt sie wieder ab, so friert die erzwungene Polarisierung ein und das Material ist mit einem permanenten (makroskopischen) Dipolmoment behaftet. Je nach Herstellung kommt es nun bei Anlegen einer äußeren Spannung zu einer Längenänderung oder einer Scherung des Piezokörpers.

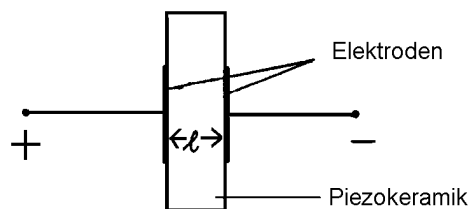


Abb. 2: Prinzipieller Meßaufbau zum Piezoeffekt

Legt man eine Wechselspannung an die Elektroden des Piezokörpers nach Abb. 2, dann erhält man einen Ultraschall-generator. Umgekehrt erzeugt eine Längenkompression des Piezokörpers eine Spannung zwischen den Elektroden. Dieselbe Anordnung kann also auch als Empfänger für Ultraschallwellen benutzt werden.

Der Wirkungsgrad eines Ultraschallwandlers ist am besten für eine mechanische Resonanz mit hoher Güte, also eine schwach gedämpfte Eigenschwingung des Schallgebers. Für eine Piezo-Quarzplatte der Dicke l ist die tiefste Eigenfrequenz:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

E = Elastizitätsmodul

ρ = Dichte

Neben Quarz wird Bariumtitanat wegen seines hohen Wirkungsgrads viel verwendet.

3) Elektrische Eigenschaften eines Piezogebers

Die mechanischen Eigenschaften des Piezokristalls beeinflussen auch sein elektrisches Verhalten. Die elektrischen Eigenschaften lassen sich mit Hilfe eines äquivalenten Ersatzschaltbildes beschreiben (Abb. 3).

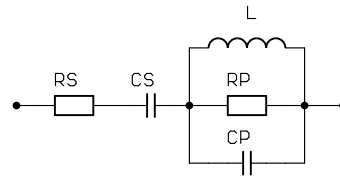


Abb. 3: Ersatzschaltbild eines Piezogebers

Bei niedrigen Frequenzen bildet die Induktivität L einen Kurzschluß und der Effekt des Serienkondensators C_S ist dominant. Dieser entspricht der Kapazität zwischen den Elektroden auf der Bariumtitanatoberfläche. Wegen der hohen dielektrische Konstante dieses Materials ($\epsilon \simeq 3000$) erhält man eine hohe Kapazität (~ 850 pF). Bei hohen Frequenzen bilden die beiden Kapazitäten einen Kurzschluß und das Verhalten wird im wesentlich durch den Serienwiderstand R_S bestimmt, der die dielektrischen Verluste im Bariumtitanat repräsentiert.

In der Nähe der Resonanzfrequenz der LC-Kombination, die gegeben ist durch

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_P}} \quad (2)$$

würde die Impedanz unendlich groß werden, wenn sie nicht durch den Widerstand R_P begrenzt würde. Dieser Widerstand entspricht der Dämpfung, die hier im wesentlichen von Abstrahlung akustischer Energie herrührt. Wegen der hohen Güte der Schwingung erwarten wir eine scharfe Resonanz in der Impedanzkurve. Wenn die Scheibe außerdem noch Schwingungsmoden bei anderen Frequenzen hat, sollte man diese an einer Spitze in der Impedanzkurve erkennen. Durch Messung der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz lassen sich also die mechanischen Eigenschaften untersuchen.

4) Geschwindigkeit von Schallwellen

Die mit dem Ultraschallgenerator erzeugten Schallwellen pflanzen sich in einem Gas gemäß der Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \left(\frac{C_P}{C_V} \frac{P}{\rho} \right) \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (3)$$

mit der Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{C_P}{C_V} \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_P}{C_V} \frac{RT}{M}} \quad (4)$$

fort. (Dabei sind C_p und C_v Wärmekapazitäten, nicht zu verwechseln mit den Kondensatorkapazitäten C_S und C_P aus dem vorhergehenden Abschnitt.)

Die Schallgeschwindigkeit in Luft soll in diesem Versuch nach den zwei folgenden Methoden bestimmt werden:

a) Die Phasenmethode

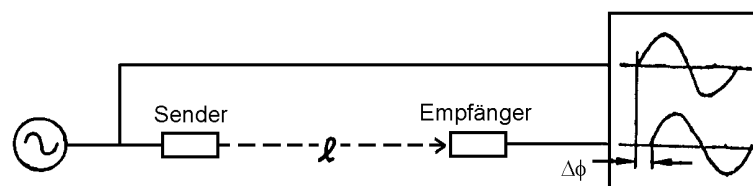


Abb. 4 Prinzipieller Aufbau zur Phasenmethode

Ein Ultraschallsender wird mit einer sinusförmigen Wechselspannung angeregt. In der Entfernung l werden die Schallwellen von einem Empfänger in elektrische Wechselspannung zurückverwandelt. Bei geeigneter Entfernung l lassen sich Sende- und Empfangssignal auf dem Oszilloskop zur Deckung bringen (relative Phase $\Delta\phi = 0$). Verändert man jetzt den Abstand l zwischen Sender und Empfänger um Δl , dann wird sich das Empfangssignal gegenüber dem Sendesignal um

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta l}{\lambda} 2\pi \quad (5)$$

verschieben. Bei weiterer Verkürzung decken sich die beiden Signale wieder für

$$\Delta\Phi = n 2\pi \quad n = 1, 2, 3... \quad (6)$$

Hieraus läßt sich die Wellenlänge λ bestimmen zu

$$\lambda = \frac{\Delta l}{\Delta\Phi} 2\pi = \frac{\Delta l}{n} \quad (7)$$

Bei Kenntnis der Frequenz erhält man daraus die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Phase

$$v_{Ph} = \lambda f \quad (8)$$

b) Die Laufzeitmethode

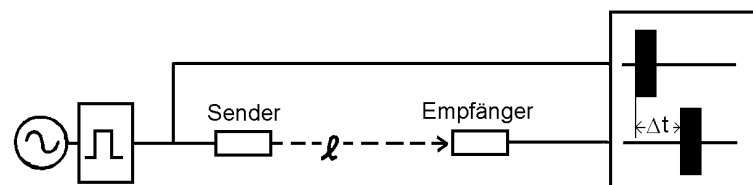


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau der Laufzeitmethode

Der Ultraschallsender wird im Pulsbetrieb angeregt. In der Entfernung l vom Sender befindet sich der Empfänger. Aus der Messung der zeitlichen Differenz Δt vom Sende- und Empfangspuls läßt sich die Geschwindigkeit des Schallpulses (= Gruppengeschwindigkeit) ermitteln:

$$V_{Gr} = \frac{l}{\Delta t} \quad (9)$$

Problematisch ist dabei die exakte Bestimmung der Entfernung l (Einbautiefe der Transducer unbekannt). Es ist daher günstiger, diese Messung bei zwei verschiedenen Abständen durchzuführen und die Gruppengeschwindigkeit aus

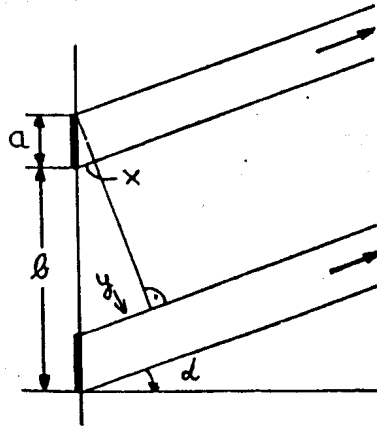
$$V_{Gr} = \frac{l_1 - l_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2} \quad (10)$$

zu berechnen.

Liegt keine Dispersion vor (dies ist bei Ultraschall in Luft gewährleistet), sind Gruppen- und Phasengeschwindigkeit gleich groß.

5) Beugung und Interferenz von Schallwellen

Ebenso wie mit Lichtwellen lassen sich Beugungs- und Interferenzphänomene mit Schallwellen untersuchen. Versorgt man mehrere Ultraschallsender mit einer antreibenden Wechselspannung, so erhält man hinreichend gut monochromatische und kohärente Schallwellen. Das Interferenzbild eines Doppelspaltes kann dann durch zwei parallel betriebene Schallquellen erzeugt werden.



Interferenz in einem Strahlenbündel: $x = n \frac{\lambda}{2} = \frac{a}{2} \sin \alpha_1$

Interferenz der Strahlenbündel gegeneinander: $y = n \frac{\lambda}{2} = b \sin \alpha_2$

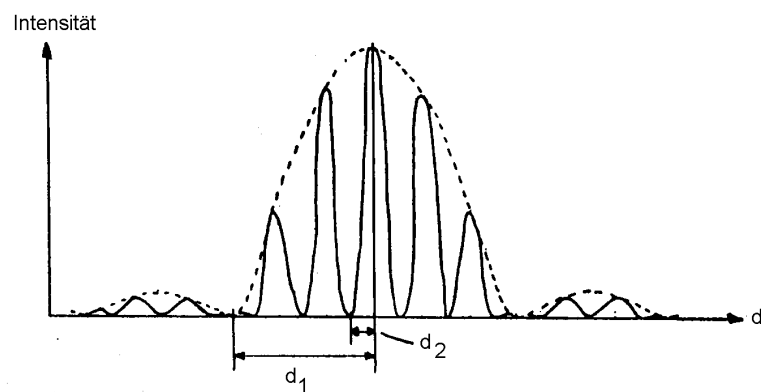


Abb. 6: Interferenzbild eines Doppelspaltes

IV. Versuchsdurchführung

1) Impedanzmessung

1a) Um die elektrischen Eigenschaften eines Barium-Titanat-Ultraschallgenerators zu untersuchen, wird eine Schaltung gemäß Abb. 7 aufgebaut. Stellen Sie am Funktionsgenerator ein Sinussignal mit einer Amplitude von etwa 5 V ein.

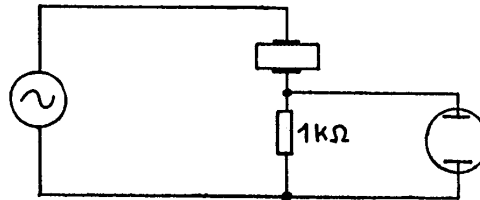


Abb. 7 Aufbau zur Impedanzmessung

Der Spannungsabfall über dem 1-k Ω -Widerstand ist proportional zum Strom durch den Ultraschallwandler, der seinerseits umgekehrt proportional zu dessen Impedanz ist (wenn man davon ausgeht, dass die Gesamtimpedanz groß gegen 1 k Ω ist).

Variieren Sie die Frequenz des Funktionsgenerators und messen Sie die niedrigste Resonanzfrequenz (etwa 40 kHz) aus. Erwarten Sie im Resonanzfall den maximalen oder minimalen Strom durch den 1-k Ω -Widerstand? (Lesen Sie auf Seite 3 nach, was unter Formel 2 für das Verhalten bei der Resonanzfrequenz beschrieben ist.)

1b) Finden Sie eine zweite Resonanz. Dies ist die zweite Harmonische. Je nach Wandlertyp kann das z.B. bei etwa der vierfachen Frequenz der ersten Resonanz sein. Suchen Sie bei Ihrem Wandler noch möglichst viele weitere höhere Resonanzen.

2) Schallgeschwindigkeit

2a) Messen Sie die Schallgeschwindigkeit mit Hilfe der Phasenmethode. Montieren Sie dazu den Sender mit und den Empfänger mit einem Reiter auf der optischen Bank. Sender und Empfänger dürfen nicht verwechselt werden. Sie sind mit S und E auf der Rückseite der Halterung gekennzeichnet. Die Bank hat eine Millimeterskala, die Reiter haben jeweils eine zugehörige Markierung zum Ablesen der Millimeterskala.

Das Sende- und Empfangssignal wird auf Kanal 1 bzw. Kanal 2 des Oszilloskops dargestellt, Triggierung auf intern mit Sendesignal oder extern¹. Betreiben Sie den Ultraschallwandler im Grundmode und bestimmen Sie durch Abzählen möglichst vieler Maxima am Oszilloskop die Wellenlänge λ (nach (7), n möglichst groß) und nach (8) die Phasengeschwindigkeit.

Zur Frequenzmessung stehen Frequenzzähler zur Verfügung. Bei der Phasenmethode eine evtl. Frequenzdrift beachten!

2b) Messen Sie nun die Schallgeschwindigkeit mit Hilfe der Laufzeitmethode. Der mechanische Aufbau ist wie unter 2a) beschrieben. In die Zuleitung zum Sender schalten Sie den elektronischen Unterbrecher². Triggern Sie das Oszilloskop extern mit dem Triggerpuls des Unterbrechers. Zur besseren Strahlenbündelung setzen Sie auf den Sender und den Empfänger die Strahlhörner auf. Führen Sie die Messung für zwei verschiedene Abstände l durch. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus $v = \Delta l / \Delta t$. Vergleichen Sie das Ergebnis mit Ihrer Messung aus 2a).

2c) Bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit kann die Anordnung nach 2b) auch zur Entfernungsmessung benutzt werden (Echolotprinzip). Montieren Sie dazu Sender und Empfänger (beide mit aufgesetztem Horn) so, daß das zur Zimmerdecke und dort reflektierte Signal vom Empfänger wieder empfangen wird. Wie hoch ist die Zimmerdecke über dem Fußboden?

¹Der Funktionsgenerator liefert ein Triggersignal (zur Frequenz synchrones Rechtecksignal), das am Modul an der BNC-Buchse TRIG.OUTP. zur Verfügung steht.

²Wenn die Unterbrecher nicht mit 5 V arbeiten, mit 6 bis 9 V probieren. Die Unterbrecher arbeiten mit Reed-Relais, die nur ein sehr leises Ticken oder Summen verursachen. Bei einigen Unterbrecherkästen ist eine neue Schaltung eingebaut, hier sind die Leuchtdiode und der Taster an der Seite ohne Funktion. Die alten Unterbrecherschaltungen hingegen müssen erst durch Tasterdruck gestartet werden.

3) Interferenz am Doppelspalt

3) Messen Sie das Beugungsbild eines Doppelspalt. Aus aufbautechnischen Gründen wird hierbei der Doppelsender um seine Symmetrieachse gedreht und der Empfänger fest am Ort belassen.

Der Doppelsender ist auf einem Drehtisch montiert. (Zubehör zur optischen Bank). Den Empfänger montieren Sie in ca. 1 m Abstand auf einen festen Reiter (achten Sie auf gleiche Höhe zwischen Sender und Empfänger). Da die Transducer des Doppelsenders aus einer anderen Bauserie stammen können als die Einzelsender, müssen Sie die Betriebsfrequenz neu einstellen und am Oszilloskop erneut bestimmen bzw. am Frequenzzähler ablesen. Die optimale Frequenz steht evtl. auf der Platine mit dem Doppelsender. Sinnvoll ist, die Frequenz so zu wählen, daß die *Minima des Interferenzmusters* besonders ausgeprägt sind. Überlegen Sie: Was muß für die *Amplituden* der beiden Sender gelten? Sie können sich die Einzelamplituden am Oszilloskop ansehen, wenn Sie jeweils einen der beiden Sender mit dem Finger abdecken.

Messen Sie die Empfangsamplitude für verschiedene Richtungswinkel des Doppelsenders zur Empfängerrichtung (alle 2° im Bereich $\pm 50^\circ$). Tragen Sie die Empfangsamplitude gegen den Richtungswinkel auf. Bestimmen Sie aus dem Abstand des Minimums die Wellenlänge gemäß

$$\frac{\lambda}{2} = l \sin \Phi \quad (11)$$

mit l : Abstand der Schallquellen

Errechnen Sie hieraus mit Hilfe der vorher berechneten Schallgeschwindigkeit c die Frequenz ($f = c/\lambda$) und vergleichen Sie diesen Wert dem Ihrer Messung mit dem Oszilloskop.

V. Anhang

Geräteliste zum Versuch AK1: (je Arbeitsgruppe)

- 1 Übertakten mit
 - einem Funktionsgeneratoreinschub
 - einem Spannungsversorgungseinschub
- 1 Oszilloskop
- 1 optische Bank mit 2 Reitern
- 2 Einfachultraschallgeber
- 2 Strahlhörner
- 1 Doppelultraschallgeber auf Drehtischreiter
- 1 elektronischer Unterbrecher
- 1 Kasten mit Widerstand 1 k Ω und BNC-Anschlüssen für Impedanzmessung