

1 Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in vorgegebenen Flüssigkeiten

2 Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

Beugung am Spalt und Gitter, Brechzahl, Ultraschall, piezoelektrischer Effekt, stehende Wellen, Phasengitter, DEBEY-SEARS-Effekt,

Literatur:

W. Ilberg, M. Krötzsch Physikalisches Praktikum,
Kapitel M8, 02, 03
Teubner Verlag 1982

H. J. Paus Physik
Kapitel 48, 52
Hanser Verlag 1995

H. Stroppe Physik
Kapitel 37, 39, 41
Fachbuchverlag 1994

Grimsehl Lehrbuch der Physik
Bd. 3, Kapitel 3.1, 3.2
Teubner Verlag 1988
Bd. 1, Kapitel 12
Teubner Verlag 1991

2.1 Mechanische Schwingungen und Wellen

Schwingungen und Wellen treten vor allem in zwei Erscheinungsformen auf, als elektromagnetische und mechanische, zeitlich bzw. räumlich periodische Zustandsänderungen. Grundsätzlich unterscheiden sich beide Formen dadurch, dass die elektromagnetische Schwingung bei der Ausbreitung in Form von Wellen keinerlei stoffliche Teilchen benötigen, während die mechanischen Schwingungen bei der Ausbreitung an Materie, und zwar an ein elastisches Medium gebunden sind. Als Schall bezeichnet man mechanische Schwingungen und Wellen kleiner Amplitude. Der Schallbereich wird wie folgt aufgeteilt:

f	<	16 Hz	Infraschall
16 Hz	bis	16000 Hz	Hörschall (Akustik)
16000 Hz	bis	10^{10} Hz	Ultraschall
	>	10^{10} Hz	Hyperschall

Wird in einem deformierbaren Stoff eine Schwingung erregt, so bleibt diese nicht auf das Erregerzentrum beschränkt. Die benachbarten Teilchen werden durch die von der Schwingung hervorgerufenen elastischen Spannungen (Kopplung) ebenfalls angeregt. Dieser zeitlich und räumlich periodische Vorgang wird als Welle bezeichnet. Gl. (1) stellt die für die Schallwellen kleiner Amplitude gültige Wellengleichung dar.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} . \quad (1)$$

Darin bedeuten u die Elongation (Verrückung) und c die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit). Gase und Flüssigkeiten besitzen eine Volumenelastizität, aber keine Formelelastizität, d. h. die Schallwelle kann sich nur als Druckwelle fortpflanzen, wobei die Teilchen in Fortpflanzungsrichtung schwingen (Longitudinalwelle). Im Festkörper können außerdem Transversalwellen und Torsionswellen vorkommen.

Bei der räumlichen Ausbreitung grenzt an jedes Teilchen eine große Anzahl phasengleich schwingender Teilchen, die alle einer Fläche zugeordnet werden können, der Wellenfläche. Die Ausbreitungsrichtung der Welle stimmt mit der Flächennormalen überein. Aus der Wellengleichung kann man drei spezielle Wellenformen ableiten: Ebene Wellen, Zylinderwellen und Kugelwellen. Alle akustischen Vorgänge sind also an ein Medium gebunden, sie sind weitgehend von der Art des Mediums und dessen akustischen Eigenschaften abhängig. Die wichtigsten akustischen Konstanten der Stoffe sind die Schallgeschwindigkeit, die Impedanz (Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte) und der Schallabsorptionsgrad.

2.2 Erzeugung von Ultraschall

Für die Ultraschallerzeugung wird in diesem Versuch ein piezoelektrischer Schwinger verwendet. Bestimmte Kristalle erzeugen infolge einer Deformation oder Dehnung freie elektrische Ladungen. Dieser Effekt wird als direkter piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Andererseits werden durch das Anlegen eines elektrischen Feldes an solch einen Kristall elastische Spannungen und Deformationen erzeugt. Das ist der reziproke piezoelektrische Effekt. Letzterer wird hier angewandt, um Ultraschallwellen zu erzeugen. Praktische werden die piezoelektrischen Schwinger je nach der Form in Dicken-, Längs-, Ring- oder Rohrschwinger unterschieden. Im Versuch wird ein Dickenschwinger verwendet. Er besteht aus einer kreisrunden Platte, deren Dicke klein gegenüber dem Durchmesser ist. Die Dickenschwinger werden so gefertigt, dass beim Anlegen einer Wechselspannung an die beiden Elektroden nur in Richtung der Flächennormalen longitudinale Schwingungen ausgeführt werden, dass sich also die Dicke beim Schwingen im Rhythmus der Frequenz der angelegten Wechselspannung ändert. Stimmt die Frequenz der angelegten Wechselspannung mit der Eigenfrequenz des Schwingers überein (Resonanz), so werden intensive mechanische Dickenschwingungen ausgeführt. Diese Schwingungen regen die Teilchen des umgebenden Mediums ebenfalls an und es kommt zur Ausbildung einer Welle mit der Frequenz der angelegten Wechselspannung. Die Eigenfrequenz wird durch Gl.(2) bestimmt.

$$f_{dn} = \frac{n}{2d} \sqrt{\frac{c_{hh}}{\rho}} = \frac{nc_L}{2d} . \quad (2)$$

Dabei ist n die Ordnungszahl der Schwingung (1, 3, 5 ...), c_{hh} der Elastizitätsmodul in Richtung der Dicke, c_L die Schallgeschwindigkeit in Richtung der Dicke, ρ die Dichte und d die Dicke des Schwingers. In der Praxis gibt man jedoch in der Regel die Frequenzkonstante k an:

$$f_{d_1} = \frac{K}{d} \left[\frac{\text{kHz mm}}{\text{mm}} \right] . \quad (3)$$

2.3 Spezifische Eigenschaften und Effekte des Ultraschalls

Ultraschallwellen zeigen eine Reihe von physikalischen Eigenschaften, die schon von der Akustik (Hörschallgebiet) oder der Optik bekannt sind: Reflexion, Brechung, Schallabsorption, Interferenzbildung, stehende Wellen. Die auftretenden Effekte lassen sich günstig in Primär- und Sekundäreffekte unterteilen. Primäreffekte sind u. a. der Schallstrahlungsdruck, die Wellenaufteilung und die Absorption. Die Sekundäreffekte unterteilt man grob in mechanische, thermische, elektrische, optische, in chemische und biologische Effekte. Hier wird nur auf einen optischen Effekt, der Bildung eines Phasengitters, näher eingegangen.

2.3.1 Ultraschall in Flüssigkeiten

Die in einer Flüssigkeit laufende Ultraschallwelle stellt eine elastische Welle dar, bei der in regelmäßigen Abständen Verdichtungen und Verdünnungen hintereinander herlaufen. Der Abstand zweier aufeinander folgender Verdichtungen ist durch die Schallwellenlänge in der Flüssigkeit gegeben.

Wird eine Schallwelle am Ende einer Flüssigkeit mit der Länge ℓ reflektiert, so entstehen, wenn Bedingung

$$\ell = \frac{m\lambda}{2} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

erfüllt ist, stehende Wellen, d.h. es existieren in der Flüssigkeit ortsfeste Druck

knoten und -bäuche. Zonen mit sehr großen Druckgradienten wechseln sich periodisch mit solchen Zonen ab, in denen keine oder nur sehr kleine Druckgradienten auftreten. Die Druckgradienten können zeitlich verstanden werden, d.h. man betrachtet die Druckschwankungen während einer Schwingungsperiode an einem festen Ort $\partial p(x=\text{const}, t) / \partial t$, oder räumlich, d.h. man betrachtet zu einem bestimmten Zeitpunkt die räumliche Änderung des Wechseldrucks $\partial p(x, t=\text{const}) / \partial x$.

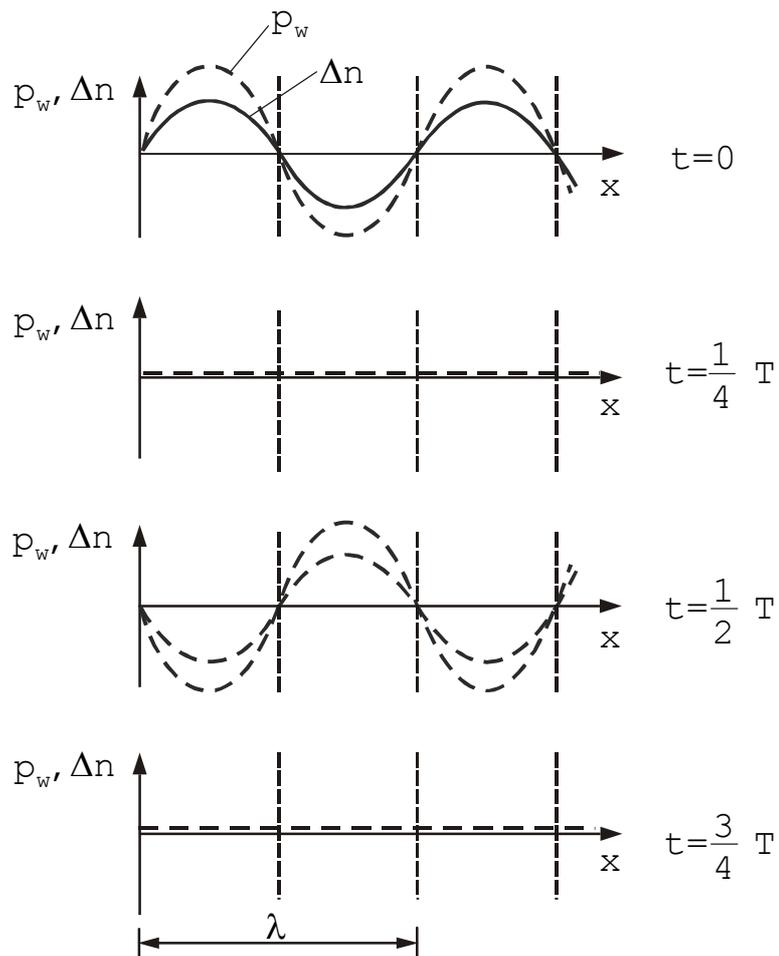


Abb. 1 : Örtliche Verteilung der Druck- bzw. der Brechzahl für 4 Zeitpunkte einer stehenden Schallwelle mit der Periodendauer T

In Abb.1 ist die Abhängigkeit des Schalldrucks p_w vom Ort x für vier Zeitpunkte t einer stehenden Welle dargestellt. Infolge der Druckschwankungen ändert

sich auch der Brechungsindex n der Flüssigkeit, wobei die Änderung des Brechungsindex Δn bei kleinen Amplituden als proportional zur Druckänderung p_w betrachtet werden kann. In einer Flüssigkeit, in der sich eine stehende Schallwelle ausbilden konnte, wechseln sich also zu den Zeitpunkten $t=0$ und $t=\frac{1}{2}T$ (T =Periodendauer der Schwingung) in der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle Zonen mit relativ großem ($n+\Delta n$) und relativ kleinem ($n-\Delta n$) Brechungsindex ab. Zu den Zeitpunkten $t=T/4$ und $t=3/4T$ hat die gesamte Flüssigkeit die gleiche Brechungszahl n .

Durchquert Licht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls die Flüssigkeit (Abb.2), so ist für seine Brechung nicht der absolute Brechungsindex von Bedeutung, sondern dessen räumliche Änderung dn/dx . Der Strahl wird zum optisch dichteren Medium hin gebrochen, d.h. zum Bereich des höheren Brechungsindex', d.h. zum Bereich des höheren Drucks. Obwohl in den Druckbäuchen zeitlich gesehen die größten Druckschwankungen auftreten, ist die räumliche Änderung dort sehr gering. Dagegen ist dn/dx am Ort der Druckknoten maximal. Daraus folgt, dass Teilstrahlen eines Strahlenbündels die Flüssigkeit im Zentrum der Druckbäuche ohne Brechung passieren können, während die Strahlteile, die die Flüssigkeit in der Nähe der Druckknoten durchdringen, abgelenkt werden (Abb.2).

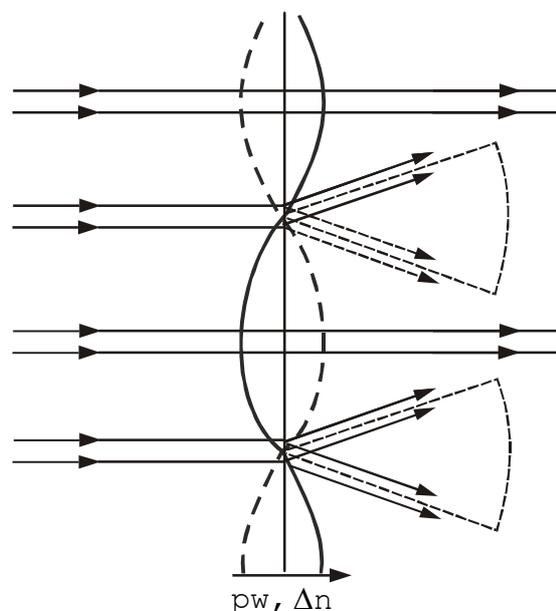
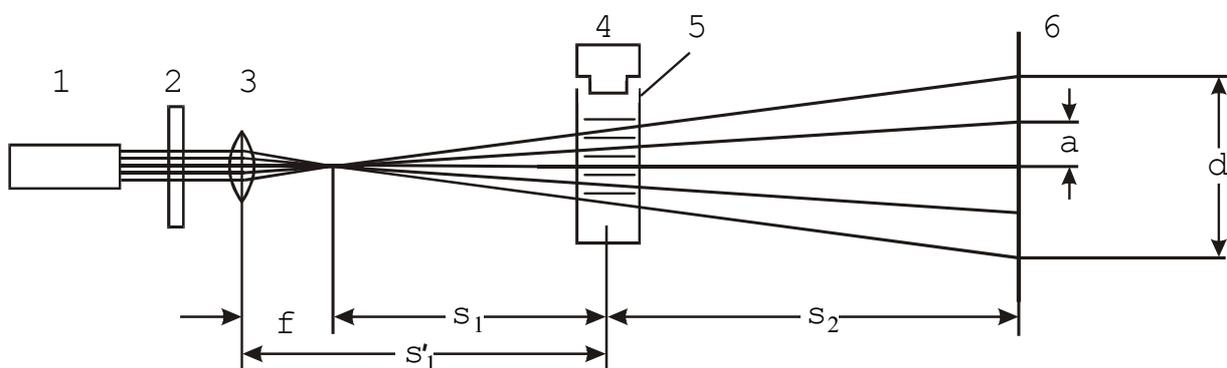


Abb.2: Brechung von Licht an einer stehenden Ultraschallwelle

Zur Abbildung der periodischen Änderung des Brechungsindex, die durch stehende Schallwellen in einer Flüssigkeit hervorgerufen wird, können 2 Verfahren genutzt werden:

- Durchstrahlung der Versuchsflüssigkeit senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung mit einem parallelen monochromatischen Lichtbündel (DEBEY-SEARS-Effekt)
- Durchstrahlung der Versuchsflüssigkeit mit einem divergenten monochromatischen Lichtbündel (Zentralprojektion).

Letzteres Verfahren soll in diesem Experiment genutzt werden. Das die Flüssigkeit durchsetzende divergente Laserlicht wird in den Bereichen mit örtlich variierender Brechzahl abgelenkt, während es in den anderen Bereichen nahezu keine Richtungsablenkung erfährt, d. h., in den Phasen $t = 0$ und $t = \frac{1}{2}T$ der Schallwelle (Abb.1) entstehen ausgeprägte helle und dunkle Streifen in der Zentralprojektion (Abb. 3).



- | | |
|-----------|--------------------------|
| 1 Laser | 2 Polarisationsfilter |
| 3 Linse | 4 Ultraschallgeber |
| 5 Küvette | 6 Schirm bzw. CCD-Kamera |

Abb. 3 : Strahlengang bei der Zentralprojektion

Die Phasen $t = \frac{1}{4}T$ und $t = \frac{3}{4}T$ der Schallwelle treten keine Brechungsindexunterschiede auf. Das die Flüssigkeit durchdringende Licht wird daher nicht abgelenkt und bewirkt lediglich eine Aufhellung des Projektionsbildes. Gemäß

Abb. 2 kann aus dem Streifenabstand a (der sich aus der Messung des Abstandes d zweier Streifen gleicher Helligkeit und der Anzahl N der dazwischenliegenden Streifen ergibt) der Knotenabstand $\lambda/2$ bzw. die Schallwellenlänge λ nach

$$\lambda = 2a \frac{s_1}{s_1 + s_2} \quad \text{mit} \quad a = \frac{d}{N + 1}. \quad (4)$$

ermittelt werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle c ergibt sich mit der Ultraschallfrequenz ν zu

$$c = \lambda \cdot \nu. \quad (5)$$

3 Versuchsdurchführung/Auswertung

Die zu untersuchende Flüssigkeit wird in die Glasküvette eingefüllt und der Schallkopf so abgesenkt, dass er einige Millimeter tief in die Flüssigkeit eintaucht. Der Laserstrahl wird mit einer Linse ($f = + 5\text{mm}$) aufgeweitet. In der Höhe sind der Laser und die Linse so einzustellen, dass der zu durchstrahlende Flüssigkeitsbereich etwa in der Mitte zwischen Schallkopf und Küvettenboden liegt. Der Abstand Linse - Projektionsschirm (bzw. CDD-Kamera) sollte etwa 1,3 m betragen. Bei einer mittleren Amplitudeneinstellung des Generators wird die Eintauchhilfe des Schallkopfes so nachgeregelt, dass zunächst auf dem Projektionsschirm ein ausgeprägtes System heller und dunkler Streifen erscheint. Die vom Schallkopf abgegebene Leistung wird nun so optimiert, dass einerseits ein gut auswertbares Streifenmuster entsteht andererseits aber die Konvektion in der Flüssigkeit minimal gehalten wird. Sich an den Küvettenwänden bildende Gasblasen können mit einem Glasstab entfernt werden. Mit Hilfe des Polarisationsfilters wird nun die Intensität des Laserstrahl bis auf ein Minimum verringert und der Projektionsschirm durch die CCD-Kamera (Videocam) ersetzt.

Nachdem das PC-Programm "Videocam" zur Aufnahme und Auswertung von Intensitätsverteilungen gestartet wurde, wird die Stellung des Polarisationsfilters so verändert, dass eine gut auswertbare Intensitätsverteilung auf dem Monitor entsteht. Gegebenen Falls muss dafür auch die örtliche Position, d. h. quer zur optischen Achse, der CCD-Kamera geändert werden. Durch Veränderung des Abstandes Küvette - CDD-Kamera, wobei der Abstand Linse - Kamera unverändert bleibt, kann die Anzahl der registrierten Maxima optimal eingestellt werden.

Mit dem im Programm integrierten Auswertemodus wird für mindestens 5 Einstellungen der Abstand der Intensitätsmaxima ermittelt. Dafür wird nach dem Stop der Messung je eine senkrechte Linie (Alt + S) in den ersten und in den letzten sichtbaren Peak eingezeichnet und deren Distanz d (Alt + D) in Anzahl von Pixeln bestimmt. Der Abstand a zweier Peaks in Millimeter kann wie folgt aus dem Abstand d (in Pixel) und der Anzahl der Streifen N berechnet werden

$$a \text{ [mm]} = \frac{d \text{ [Pixel]}}{N + 1} \cdot 0,014 . \quad (6)$$

Die für die Berechnung der Schallwellenlänge bzw. der Schallgeschwindigkeit der Flüssigkeit erforderlichen Entfernungen ρ_1 und ρ_2 sind ebenfalls zu bestimmen. Die Erregerfrequenz des Schallgebers kann mit einem Digitalmultimeter gemessen werden. Da die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur abhängig ist, muss die Messtemperatur angegeben werden. Führen Sie für Ihre Ergebnisse eine Größtfehlerberechnung durch. Nach Abschluss der Messungen ist die Flüssigkeit in die entsprechende Vorratsflasche zurückzugießen und die Küvette gründlich auszuspülen sowie der Schallgeber zu reinigen.

4 Kontrollfragen

- 4.1 Welche Methoden der Schallgeschwindigkeitsmessung kennen Sie?
- 4.2 Vergleichen Sie den DEBEY-SEARS-Effekt mit der Beugung an einem optischen Strichgitter!
- 4.3 Warum kann die Intensität eines Laserstrahls mit einem Polarisationsfilter geregelt werden?
- 4.4 Welche Phasenbezeichnung besteht zwischen Schallamplitude, Schalldruck und Brechzahl der Flüssigkeit?
- 4.5 Erläutern Sie die Entstehung stehender Wellen.