

F1 Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

Physikalische Grundlagen

Schallwellen sind mechanische Wellen. Ihre Ausbreitung ist an Stoffe gebunden. Die Geschwindigkeit der Schallwelle ist im Allgemeinen von den elastischen Konstanten des Trägermediums (bei kristallinen Stoffen entsprechend vielen), von der Ausbreitungsrichtung im Medium, von der Art der Welle (Longitudinal- oder Transversalwelle) und, bei Transversalwellen, von ihrer Polarisierung abhängig.

In homogenen Stoffen vereinfacht sich die Situation erheblich. Man findet für ein allseitig ausgedehntes Medium

$$c_l = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (1)$$

für die Phasengeschwindigkeit von Longitudinalwellen und

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

für die von Transversalwellen. Sie hängen neben der Dichte ρ des Mediums nur vom Kompressionsmodul K und dem Schermodul G ab. (Für ein homogenes Medium genügt grundsätzlich die Angabe von zwei elastischen Konstanten. Entsprechend können obige Beziehungen auch mittels anderer, z.B. den Laméschen Konstanten μ und λ ausgedrückt werden).

Da Flüssigkeiten und Gase keine Formelastizität ($G = 0$) aufweisen, können sich nur Längswellen (Longitudinalwellen) ausbreiten.

Je nach Frequenz der Schallwelle unterscheidet man Hörschall (menschliches Ohr) und die Bereiche oberhalb und unterhalb der Hörgrenze des menschlichen Ohres, den Ultra- bzw. Infraschall.

Den Raum um eine Schallquelle, der von Schallenergie erfüllt ist, bezeichnet man als Schallfeld. Zur Kennzeichnung und Beschreibung eines Schallfeldes definiert man so genannte Schallfeldgrößen. Wichtige Größen sind unter anderen die Schallschnelle

$$v = \frac{du}{dt}, \quad (3)$$

(u...Auslenkung der Teilchen), der Wellenwiderstand

$$Z = \rho \cdot c \quad (4)$$

der Schallwechseldruck

$$p = Z \cdot v = \rho \cdot c \cdot v \quad (5)$$

und die Schallintensität

$$J = \frac{1}{2} p_{\max} v_{\max} \cdot \quad (6)$$

Betrachtet man die Ausbreitung einer zeitlich begrenzten Welle oder von nichtharmonischen Wellen, wie sie für Informationsübertragungen notwendig sind, so muss man beachten, dass diese Wellen aus einem Gemisch von Wellen verschiedener Frequenzen zusammengesetzt sind. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz abhängig (Dispersion), ist die Folge, dass sich die Wellenform im Laufe der Zeit verändert. Die Gruppengeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit des Schwerpunktes eines Wellenpaketes oder Einzelimpulses. Wegen der zeitlichen Deformation des Impulses hat der Schwerpunkt selbst eine geringe Geschwindigkeit, so dass die Gruppengeschwindigkeit um die Schwerpunktschwindigkeit gegenüber der Phasengeschwindigkeit verändert wird.

Schallwellen in transparenten Medien beeinflussen die Ausbreitung von Licht. Bei dieser als Debye-Sears-Effekt bezeichneten Erscheinung wird die Lichtgeschwindigkeit im Medium entsprechend der Schallwellenlänge λ örtlich periodisch verändert. Unabhängig davon, ob es sich um eine stehende oder fortlaufende Welle handelt, entsteht ein Beugungsgitter (Phasengitter) mit der Periode λ . Die genaue Berechnung der Intensität des gebeugten Lichts ist kompliziert und liefert für stehende und fortlaufende Wellen verschiedene Resultate.

Bei hohen Schallintensitäten sind die örtlichen Unterschiede des Brechungsindex so groß, dass die durch sie bedingte Ablenkung der Lichtstrahlen in den Vordergrund rückt. Im folgenden Bild ist diese Situation dargestellt. Die stehende Ultraschallwelle verläuft von oben nach unten. Links gleichmäßig einfallendes Licht (äquidistanter Abstand der Lichtstrahlen) wird an der Ultraschallwelle (kontinuierlich) gebrochen und verlässt rechts die Küvette helligkeitsmoduliert (Häufung der Lichtstrahlen im Abstand einer halben Ultraschallwellenlänge). Es entstehen die sog. Hiedemann-Streifen. Bei geeigneter Wellenlänge sind sie mit bloßem Auge sichtbar.

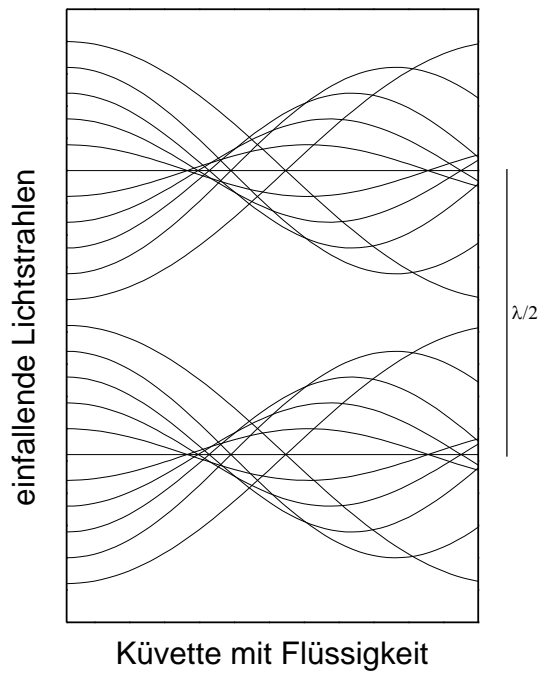


Abb.1 Ablenkung paralleler Lichtstrahlen an einer stehenden Ultraschallwelle. Das links einfallende Licht ist gleichverteilt, während es je nach durchstrahlter Flüssigkeitslänge zu einer periodischen Helligkeitsmodulation (rechts) kommt.

Versuchsvorbereitung

- Welche Geschwindigkeit haben Longitudinalwellen in dünnen Stäben? (Bei dünnen Stäben kann die Poissonsche Querkontraktionszahl ν vernachlässigt werden.)
- Schallfeldgrößen
- Leiten Sie Beziehungen für den Kompressionsmodul bei adiabatischer Kompression von Gasen und für die Schallgeschwindigkeit her.
- Frequenzbereiche von Hörschall
- Erklären Sie die Entstehung stehender Wellen bei der Reflexion am festen und losen Ende.
- Diskutieren Sie folgende Gleichung

$$u(x,t) = u_0 \sin \left\{ \omega_0 \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi_0 \right\} \quad (7)$$

- Schätzen Sie den Streifenabstand aufgrund der Beugung von Licht an einer Ultraschallwelle ($\lambda_{\text{Schall}} = 2\text{mm}$) in einer Entfernung von ca. 80 cm ab.

Wie groß ist der Streifenabstand bei der Versuchsdurchführung entsprechend Abb.2?
($f = 2\text{ cm}$, $s_1 = 20\text{ cm}$, $s_2 = 100\text{ cm}$)

Aufgaben

- Bestimmen Sie aus der optischen Abbildung einer stehenden Ultraschallwelle deren Wellenlänge und Phasengeschwindigkeit.

Dazu wird das Schallfeld mit divergentem Licht durchstrahlt, um eine Vergrößerung zu erzielen.

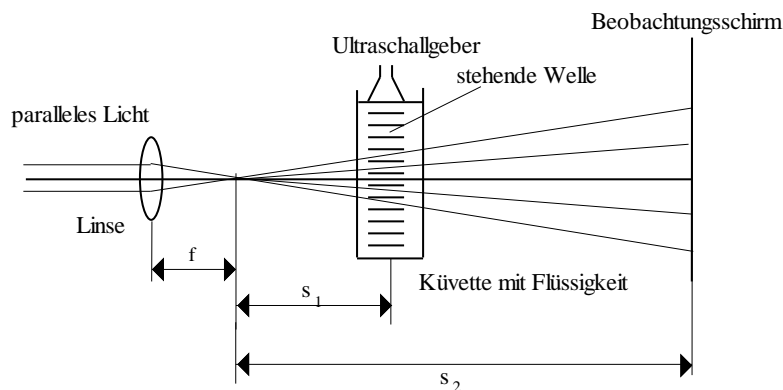


Abb.2 Versuchsaufbau

- Bestimmen Sie die Wellenlänge einer stehenden Ultraschallwelle indem Sie den Schallempfänger in der Flüssigkeit verschieben. Im Abstand einer halben Wellenlänge bilden sich Minima bzw. Maxima der stehenden Welle, welche mittels eines Oszilloskops beobachtet werden können. Berechnen Sie die Wellenlänge sowie deren Fehler und die Phasengeschwindigkeit der Ultraschallwelle.
- Bestimmen Sie die Gruppengeschwindigkeit mittels einer Laufzeitmessung eines Ultraschallimpulses.
- Berechnen Sie aus der ermittelten Phasengeschwindigkeit den Kompressionsmodul und den Wellenwiderstand der verwendeten Flüssigkeit. Führen Sie eine Fehlerschätzung für den Kompressionsmodul durch.
- Ermitteln Sie aus der Maximalspannung, welche der Schallaufnehmer liefert, die Amplitude u_{max} der kontinuierlichen Ultraschallwelle. Berechnen Sie die Schallintensität.