



**Technische
Universität
Dresden**

Fakultät Physik

Physikalisches Grundpraktikum

Versuch: **SW**

Aktualisiert: am 9. April 2026

Stehende Wellen

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	2
2 Allgemeine Grundlagen	2
2.1 Schallwellen in Luft	2
2.2 Reflexion und stehende Schallwellen	3
2.3 Eigenfrequenzen im endlich ausgedehnten Medium	3
3 Experimente	3
3.1 Erzeugung und Messung der Frequenz	3
3.1.1 Longitudinale Stab-Schwingung	3
3.1.2 Stimmgabel	4
3.1.3 Tonfrequenzgenerator	4
3.2 Messung der Wellenlänge	4
3.2.1 Original KUNDTSche Methode	4
3.2.2 Mikrophon	4
3.2.3 Schallgeschwindigkeit nach Quincke	5
3.3 Variation des Gases	5
4 Platzanleitung	6
5 Anhang	8
5.1 Die Wellengleichung für den Schallwechseldruck	8
5.2 Schallwechseldruck	9
5.3 Adiabatisches Kompressionsmodul	9
Fragen	9

1 Aufgabenstellung

1. Nach der Methode von Quincke ist anhand der Schallgeschwindigkeit der Luft die Frequenz f zweier gegebener Stimmgabeln (Mittelwert von jeweils fünf Messungen) zu ermitteln.
2. Mittels Tonfrequenzgenerator, Lautsprecher und Mikrophon ist mit Hilfe stehender Wellen in einem horizontalen Glasrohr (KUNDTSches Rohr) nahe der Reflexionswand die Schallgeschwindigkeit c in Gasen (Luft) zu bestimmen und auf 0°C umzurechnen.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Schallwellen in Luft

Eine Welle ist ein *zeitlich* und *räumlich periodischer* Vorgang. Bei elastischen Wellen werden einzelne Volumenelemente durch elastische Deformation aus dem Gleichgewicht (homogener Körper, konstante Dichte) gebracht und führen am Ort x harmonische Schwingungen (Dichteschwankungen) aus. Infolge der elastischen Kopplung benachbarter Volumenelemente breiten sich die Schwingungen als elastische longitudinale Wellen räumlich aus.

Bei Luft als elastischem Medium ist die „elastische Konstante“ im entsprechenden *Hookeschen Gesetz* ($dp = -K \cdot dV/V$) das Kompressionsmodul K . Dieses ist bei einem idealen Gas für isotherme und adiabatische Prozesse unterschiedlich, durch den Druck p und den Adiabatenexponenten κ gegeben:

$$K^{\text{iso}} = -V \frac{dp^{\text{iso}}}{dV} = p \quad \text{und} \quad K^{\text{ad}} = -V \frac{dp^{\text{ad}}}{dV} = \kappa p.$$

Periodische Druckschwankungen oder *Schall* breiten sich in Luft als *longitudinale Dichte-Welle* mit der *Phasengeschwindigkeit* $c = \omega/k = f\lambda$ aus, wobei die periodischen Druckschwankungen so schnell erfolgen, dass die Kompressionen *adiabatisch* ablaufen.

Als periodisch veränderliche Größen, deren Schwingungsphase sich mit c ausbreitet, können z. B. der Schall-Ausschlag $\xi(t, x)$, die -Schnelle $v_s(t, x)$ oder der -Wechseldruck $p_w(t, x)$ betrachtet werden. Die zugehörigen Lösungen der ebenen Wellengleichungen lauten:

$$\begin{aligned} \xi(t, x) &= \hat{\xi} \cos(\omega t - kx) \\ v_s(t, x) &= \frac{\partial \xi}{\partial t} = \omega \hat{\xi} \cos(\omega t - kx + \pi/2) \\ p_w(t, x) &= \rho c \cdot v_s = \hat{p} \cos(\omega t - kx + \pi/2). \end{aligned}$$

Dabei ist ρ die Dichte, c die Schallgeschwindigkeit und x die Ausbreitungsrichtung. Schallschnelle und Schallwechseldruck sind in Phase [4], während der Schallwechseldruck gegenüber dem Schallauschlag eine Phasenverschiebung um $\pi/2$ aufweist (s. Anhang). Außerdem ist c temperaturabhängig (Herleitung s. Anhang):

$$c(T) = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho(T)}} = \sqrt{\kappa R' T} \quad (1a)$$

$$c_{\text{Luft}}(\vartheta) = \left(331 + 0,6 \frac{\vartheta}{[^\circ\text{C}]} \right) \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (1b)$$

Zahlenwerte für Luft: Molare Masse $M \approx 29 \text{ g/mol}$; $\kappa \approx 1,4$; $R' = \frac{R}{M} = \frac{1}{M} \cdot 8,315 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$.

Dabei ist ϑ die Temperatur in $^\circ\text{C}$. Für den Adiabatenexponenten gilt $\kappa \approx 1,67$; $1,4$ bzw. $1,33$ für ein-, zwei- bzw. dreiatomige Gase.

2.2 Reflexion und stehende Schallwellen

Bei der Reflexion einer Schallwelle an einer Wand, die sich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung am Ort $x = 0$ befindet, ist der Schallwechseldruck p_w maximal (Phasensprung Null) und der Schallausschlag Null (Phasensprung π).

Die Überlagerung (Addition, Superposition, Interferenz) von hin- (ξ^+) und rück- (ξ^-) laufender Welle gleicher Frequenz und Amplitude ergibt eine *stehende Welle*

$$\begin{aligned}\xi^+(t, x) &= \hat{\xi} \cos(\omega t - kx) \\ \xi^-(t, x) &= \hat{\xi} \cos(\omega t + kx - \pi).\end{aligned}\tag{2}$$

Für den Schallausschlag folgt (das Endergebnis durch Separation bezüglich x und t , Additionstheorem):

$$\begin{aligned}\xi_{\text{res}} &= \hat{\xi} \cdot [\cos(\omega t - kx) + \cos(\omega t + kx - \pi)] \\ &= \hat{\xi} \cdot [\cos(\omega t - kx) - \cos(\omega t + kx)]\end{aligned}\tag{3}$$

$$\xi_{\text{res}} = \left[2\hat{\xi} \sin(kx) \right] \cdot \sin \omega t = \left[2\hat{\xi} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \right] \cdot \sin \omega t.\tag{4}$$

Gleichung (4) stellt als Gleichung einer stehenden Welle eine *Schwingung* dar, deren Amplitude mit $[2\hat{\xi} \sin(kx)]$ periodisch vom Ort x abhängt. Die Orte mit der Amplitude Null (bei $x = 0$, $x = 2n \cdot \lambda/4$) heißen *Knoten*, die Orte maximaler Amplitude (bei $x = (2n+1) \cdot \lambda/4$) heißen *Bäuche* für den Schallausschlag. Man diskutiere die den Gleichungen (2) bis (4) entsprechenden Beziehungen für den Schallwechseldruck p_w .

In jedem Fall beträgt der *Knotenabstand* $\lambda/2$. Das Erzeugen und Ausmessen stehender Wellen ist eine der wichtigsten Methoden zur Bestimmung von Wellenlängen.

2.3 Eigenfrequenzen im endlich ausgedehnten Medium

Zur optimalen Ausbildung stehender Wellen muss die Gesamtlänge des Mediums, in dem sich die Welle ausbreitet, z.B. die Luftsäule in einem Rohr, ein Vielfaches von $\lambda/4$ betragen (z.B. bei Musikinstrumenten). Die Serie von Eigenfrequenzen bei zwei geschlossenen Enden (5a) bzw. einem offenen Ende (5b) bei einem Rohr der Länge l ist:

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{nc}{2l}\tag{5a}$$

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{(2n+1) \cdot c}{4l}.\tag{5b}$$

3 Experimente

3.1 Erzeugung und Messung der Frequenz

Der Versuch wird in zwei Richtungen durchgeführt:

1. Bei bekanntem c ist die Frequenz nach der Methode von Quincke zu bestimmen.
2. Umgekehrt wird bei bekannter Frequenz die Schallgeschwindigkeit c mit dem KUNDTschen Rohr bestimmt.

3.1.1 Longitudinale Stab-Schwingung

Beim klassischen KUNDTschen Versuch regt man einen $l \approx 1,5$ m langen Metallstab zu Longitudinalschwingungen an, die durch eine am Stabende (am Schwingungsbauch) befestigte leichte Platte auf die Luftsäule übertragen wird.

Ist der Stab z.B. in der Mitte eingespannt, so beträgt seine Gesamtlänge $l_M = \lambda_M/2$ mit Schwingungsbäuchen an den Enden, bei anderen Einspannungen kann auch mit den Oberschwingungen gearbeitet werden, siehe Abb. 1a. Damit gilt bei bekannter Schallgeschwindigkeit für dünne Metallstäbe $c_M = \sqrt{E/\rho}$ für Longitudinalwellen (s. Tab. 1) für die Frequenz:

$$f = \frac{c_M}{\lambda_M} = \frac{c_M}{2l_M} \quad (6)$$

Ein freies Ende des Stabes wird dabei mit einem mit Kollophonium getränkten Lappen zur laut hörbaren Grundschiwingung angeregt.

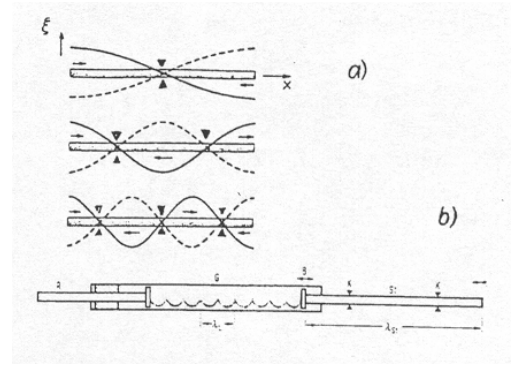


Abb. 1: a) Einspannmöglichkeiten eines Metallstabs der Länge l
b) KUNDTSches Rohr

3.1.2 Stimmgabel

Bei dieser Ausführung des Quincke-Versuchs werden Stimmgabeln definierter Frequenz benutzt. Zur Erhöhung und zeitlichen Konstanz der Anregungsamplitude wird ein Röhren-Schwingkreis benutzt, in dessen Gitterkreis eine Induktivität in der Nähe eines eisernen Schenkels der Stimmgabel sitzt. Die anfänglich kleinen Ausschläge der Stimmgabel übertragen sich einerseits auf die Luftsäule und andererseits induktiv auf den Schwingkreis, dessen Rückkopplungsfaktor durch ein Potentiometer eingestellt werden kann. Damit bleibt die Amplitude konstant.

3.1.3 Tonfrequenzgenerator

Die aufgebaute Ausführungsform basiert in Abwandlung des Kundt-Versuchs auf einem Lautsprecher, der von einem auf $\frac{\Delta f}{f} \approx 1\%$ genau einstellbaren Tonfrequenzgenerator gespeist wird und die Luftsäule vom Rohrende über eine Membran zu Schwingungen anregt. Die Spannungsamplitude sollte ca. 80 mV betragen. Die genaue Frequenz kann mit Hilfe eines Impulzzählers ermittelt werden.

3.2 Messung der Wellenlänge

Alle Varianten zur Bestimmung der Wellenlänge nutzen stehende Wellen aus. Die Knoten sind meistens besser zu lokalisieren als die Bäuche. Nach Möglichkeit ist über eine größere Knotenzahl zu mitteln. Sollten störende Oberschwingungen mit angeregt werden, so muss man sich auf den gewünschten Grundton konzentrieren.

3.2.1 Original Kundtsche Methode

Im Glasrohr, an dessen einem Ende die Schwingung vom Metallstab nach Abb. 1b auf die Luft übertragen wird, befinden sich Korkteilchen, die anfangs nach leichtem Drehen des Rohres gleichmäßig an der Wand des Rohres verteilt sind. Nach dem Einschwingen des Tones kann die Rückwand (Reflexionsstelle) etwas verschoben werden (Längenabstimmung), bis optimale Resonanz erreicht ist. Dann bleiben an den Knoten die Korkteilchen in Ruhe und lagern sich sichtbar ab, während an den Bäuchen maximale Bewegung der Korkteilchen beobachtet wird.

3.2.2 Mikrophon

Bei der im Versuch benutzten Ausführung ($f \approx 2$ bis 3 kHz) kann auf der Achse eines relativ langen Glasrohres (1 m) in der Nähe der dem Lautsprecher gegenüberliegenden Abschlusswand ein Mikrophon um maximal 20 cm verschoben werden. Das Mikrophon spricht auf den Schallwechseldruck $p_w \sim v_s \cdot \omega$ an. Knoten und Bäuche werden als Maxima und Minima auf dem Digitalvoltmeter

angezeigt. In unmittelbarer Nähe der Wand werden nahezu unabhängig von der relativ großen und konstanten Gesamtlänge des Rohres immer Knoten und Bäuche zu beobachten sein, so dass sich eine frequenzbezogene Längenabstimmung erübrigt.

3.2.3 Schallgeschwindigkeit nach Quincke

Die Luft im vertikalen Glasrohr von ca. 3 cm Durchmesser und 1 m Länge wird am oberen Ende mit der Stimmgabel zu Schwingungen angeregt. Das untere Rohrende ist mit Wasser, dessen Stand über verbundene Röhren (Schläuche) mittels eines beweglichen Vorratsgefäßes beliebig eingestellt werden kann, abgeschlossen (siehe Abb. 2). An der Wasseroberfläche als feste Wand befinden sich immer Knoten für den Schallauschlag. Im Resonanzfall ist am oberen Rohrende, dessen ungenaue Position durch Differenzbildung eliminiert wird, ein Bauch und der Ton laut hörbar (Resonanz, Kombination von festem Ende auf der einen und losen Ende auf der anderen Seite). Es müssen mindestens zwei Marken für den Wasserstand, die zwei Resonanzstellen im Abstand $\lambda/2$ entsprechen, ausgemessen werden.

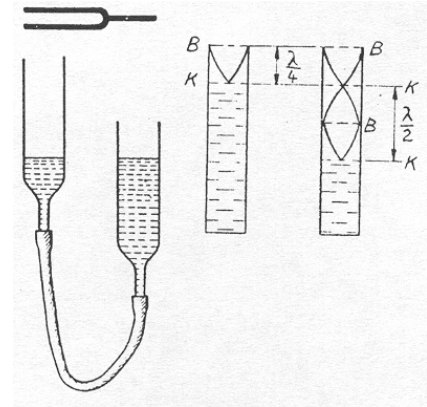


Abb. 2: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit nach Quincke

3.3 Variation des Gases

Beim KUNDTschen Rohr besteht die Möglichkeit, die Luft mit einem zweiten Gas herauszudrücken (oder abzupumpen) und ca. 5 min lang entweder CO_2 oder Ar einzulassen. Danach kann bei geschlossenem Rohr der Versuch mit dem neuen Gas, das sich in ρ und κ von Luft unterscheidet, wiederholt werden.

4 Platzanleitung

Aufgabenstellung

1. Nach der Methode von Quincke ist anhand der Schallgeschwindigkeit der Luft die Frequenz f zweier gegebener Stimmgabeln (Mittelwert von jeweils fünf Messreihen) zu ermitteln.
2. Mittels Tonfrequenzgenerator, Lautsprecher und Mikrophon ist mit Hilfe stehender Wellen in einem horizontalen Glasrohr (KUNDTSches Rohr) nahe der Reflexionswand die Schallgeschwindigkeit c in Luft zu bestimmen und auf 0°C umzurechnen.

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Sie benötigen die Beziehung zwischen Wellenlänge und Schallgeschwindigkeit $c = \lambda f$ und die Größe des Knotenabstandes: $d = \lambda/2$.

zu 1.

- Beachten Sie zum Einspannen der Stimmgabel und Inbetriebnahme des Generators die Bedienungsanleitung unten.
- Den Abstand der Stimmgabel möglichst nicht verändern, die Stimmgabel gegebenenfalls mit dem kleinen Hammer anstoßen.
- Mindestens zwei Stellungen (Knotenpositionen) der Wasseroberfläche im Rohr, bei denen das Quincke-Rohr in Resonanz für den Grundton mit maximaler Lautstärke gerät, durch zehnmaliges Ausmessen bestimmen.
- Man darf sich durch mögliche, bei zu starker Rückkopplung mit angeregte Oberschwingungen nicht beirren lassen.

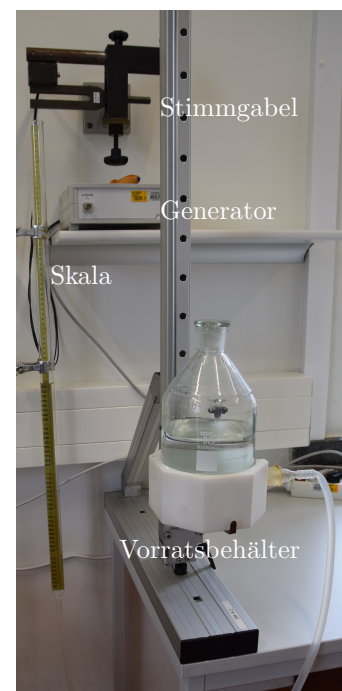


Abb. 3: Aufbau n. Quincke

zu 2.

- Das Glasrohr ist an einer Seite mit einem Lautsprecher, an der anderen mit einer Wand abgeschlossen. Durch die Wand wird ein Mikrophon in das Rohr eingeführt. Der Lautsprecher wird mit einem Sinussignal-Generator HM8032 angeregt. Im Resonanzfall bilden sich im Rohr stehende Wellen aus. Der Verlauf des Schalldruckes wird über der Rohrlänge mit dem Mikrophon gemessen (siehe Abb. 4). Es werden drei Frequenzen f zwischen 2,5 und 3,5 kHz benutzt. Die garantierte maximale Abweichung der Frequenz ist kleiner als $0,1\% \pm 1$ Digit. Der Effektivwert der Spannung sollte etwa 0,06 bis 0,08 V betragen, was einer Einstellung mit -20 db Dämpfung bei auf fast Minimum eingestellter Amplitude am Generator entspricht.
- Das batteriebetriebene Mikrophon, das auf den Schallwechseldruck reagiert, muss nach 30 min mit dem roten Knopf aufgrund der Abschaltautomatik wieder eingeschaltet werden. (HINWEIS: Betriebsartenschalter auf Stellung =)
Das Mikrophon wird an ein Multimeter im 2 V-Messbereich (Gleichspannung) angeschlossen.

Die Empfindlichkeit des Mikrophons ist zwischen 18 und 300 mV/mbar einstellbar. Durch langsames (in mm-Abständen) Verschieben der Mikrophon-Achse in Längsrichtung können mehrere Knoten (bezogen auf den Schalldruck) ausgemessen werden (mindestens über drei Halbwellen). Der Mikrophontransport erfolgt von Hand auf einem Transportwagen.

- Durch grafische Darstellung der Spannung in der Nähe der Knoten kann die Knotenposition mittels Interpolation genauer bestimmt werden. In der Nähe der Wand werden Knoten und Bäuche ausgemessen.

Bedienung des Stimmgabelverstärkers

Einspannen der Gabel Der Erregerkopf wird in die höchstmögliche Lage gebracht und die Stimmgabel möglichst kurz eingespannt. Danach ist der Erregerkopf parallel im Abstand von ca. 1 mm so anzuordnen, dass er genau mit einem freien Gabelende abschließt.

Inbetriebnahme des Generators Schließen Sie den Netzstecker an und schalten Sie den Generator über den Kippschalter ein, die Netzkontrolle sollte nun leuchten. Nach der Anlaufzeit des Generators beginnt die Stimmgabel zu schwingen. Stellen Sie zuletzt den Spalt zwischen Erregerkopf und Stimmgabel auf optimale Lautstärke minimal ein.

Achtung! Betreiben Sie den Generator immer bei ausreichendem Abstand zwischen Stimmgabel und Erregerkopf, um ein Mitschwingen der Stimmgabelaufhängung und Überlastungen zu vermeiden.

Hinweise zur Auswertung

Zur Bestimmung einer Differenz (z.B. Wellenlänge) aus einer Messreihe von diskreten **äquidistanten** Werten (aufeinander folgende Positionen von Knoten und Bäuchen) empfiehlt sich eine vereinfachte lineare Regression. Betrachten wir die Positionen $x_1, x_2, \dots, x_N$ als Funktion des Indexes $k = 1, 2, \dots, N$ so ergibt sich die mittlere Differenz aus dem Anstieg b der folgenden Ausgleichs-„Geraden“:

$$x(k) = b \cdot k + a, \quad (7)$$

der sich durch den folgenden Zusammenhang berechnen lässt:

$$b = \frac{12 \sum_{k=1}^N k \cdot x_k - 6(N+1) \sum_{k=1}^N x_k}{N(N^2 - 1)}. \quad (8)$$

Weiterhin lässt sich die zufällige Unsicherheit von b einfach abschätzen durch:

$$\Delta b_{\text{zuf}} = s_x \cdot \sqrt{\frac{12}{N(N^2 - 1)}} \quad \text{mit} \quad s_x = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{k=1}^N \Delta(x_k - (b \cdot k + a))^2} \quad (9)$$

Dies ist unter der Annahme gleicher zufälliger Messunsicherheiten für alle x_k gültig. Die Berechnung von s_x erfordert weiterhin die Bestimmung des absoluten Gliedes a . Für den vorliegenden Versuch ist es jedoch vernünftig, vereinfachend für s_x eine mittlere Ables- bzw. Einstellunsicherheit anzusetzen.

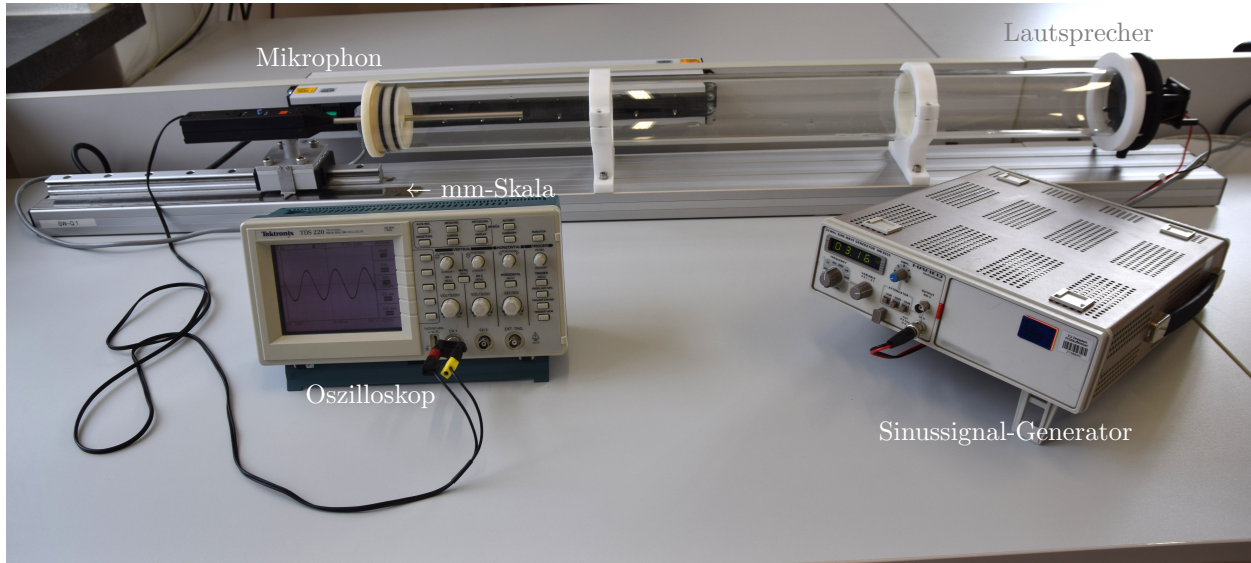


Abb. 4: Aufbau nach Kundt

5 Anhang

5.1 Die Wellengleichung für den Schallwechseldruck

Gegeben sei ein luftgefüllter Zylinder (Achse x , z.B. eine Trompete) vom Querschnitt A mit einem lokalen Druckgefälle oder Druck-Gradienten $\partial p / \partial x$. Dann wirkt auf das Volumenelement $V = A \cdot \Delta x$ die elastische Rückstellkraft $\Delta F = -A \cdot \Delta p = -A \cdot \Delta x \partial p / \partial x$ und die Masse $m = \rho A \cdot \Delta x$ erfährt die Beschleunigung

$$a_x = \frac{\partial v_s}{\partial t} = -\frac{A \cdot \Delta x \frac{\partial p}{\partial x}}{\rho A \cdot \Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (10)$$

Die ortsabhängige Geschwindigkeit v_s bewirkt eine lokale Änderung des oben betrachteten Volumenelements V

$$dV = A v_s dt = A dt \cdot (\partial v_s / \partial x) \cdot \Delta x, \quad (11)$$

die wiederum eine adiabatische Druckänderung nach sich zieht. Aus $pV^\kappa = \text{konst}$ folgt mit $K^{\text{ad}} = \kappa p$

$$dp = -K^{\text{ad}} dV / V = -K^{\text{ad}} \cdot (\partial v_s / \partial x) dt \quad (12)$$

bzw.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial v_s}{\partial x} K^{\text{ad}}. \quad (13)$$

Nach Ableitung von Gleichung (10) nach x und von Gleichung (13) nach t sowie Gleichsetzen von $\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial v_s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v_s}{\partial t}$ folgt für den Schallwechseldruck die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 p_w}{\partial t^2} = \frac{K^{\text{ad}}}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (14a)$$

$$p_w(x, t) = \hat{p} \cos(\omega t - kx). \quad (14b)$$

Der Quotient K^{ad} / ρ in dieser eindimensionalen Wellengleichung, einer partiellen Differenzialgleichung zweiter Ordnung, bestimmt als temperaturabhängige Materialkonstante die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Phase ($c^2 = K^{\text{ad}} / \rho$). Die harmonische Schallwelle breitet sich demnach mit folgender Phasengeschwindigkeit aus:

$$c = \lambda f = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{K^{\text{ad}}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot R' T}. \quad (15)$$

5.2 Schallwechseldruck

Der Zusammenhang zwischen p_w und v_s folgt über das Newtonsche Grundgesetz

$$F_w = m \cdot a = \rho(A\Delta x)\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = p_w A \quad \text{und} \quad -\frac{\partial p_w}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial v_s}{\partial t}$$

Integration über x liefert [4]:

$$p_w(t) = -\rho \int \frac{\partial v_s}{\partial t} dx = \rho \omega^2 \hat{\xi} \int \cos(\omega t - kx) dx = -\rho \frac{\omega^2 \hat{\xi}}{k} \cdot \sin(\omega t - kx) = \rho c \cdot v_s(t) \quad (16)$$

5.3 Adiabatisches Kompressionsmodul

Alle benutzten Beziehungen gelten im Rahmen des Modells des idealen Gases mit den Zustandsgleichungen

$$pV = mR'T \quad \text{und} \quad pV = nRT \quad (17)$$

Hierbei sind T die absolute Temperatur, p der Druck, V das Volumen, $R' = \frac{R}{M} = \frac{1}{M} \cdot 8,315 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ die spezifische Gaskonstante und $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ die universelle Gaskonstante. Beim adiabatischen Prozess findet kein Wärmeübertrag statt ($\Delta Q = 0$), was oft der Fall ist, wenn physikalische Prozesse sehr schnell ablaufen. Dann folgt für den ersten Hauptsatz:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W = mc_v \cdot \Delta T + p \cdot \Delta V = 0 \quad (18)$$

Dabei sind U die innere Energie, ΔW die vom Gas verrichtete Arbeit, ΔQ die zugeführte Wärmenergie. Durch Kombination der Gleichungen (17) und (18) erhält man die Poissonschen Adiabaten-Gleichungen:

$$T \cdot V^{\kappa-1} = \text{const.} \quad (19a)$$

$$p \cdot V^{\kappa} = \text{const.} \quad (19b)$$

$$\frac{T^{\kappa}}{p^{\kappa-1}} = \text{const.} \quad (19c)$$

Aus Gleichung (19b) folgt zunächst $dp = -\kappa p \cdot dV/V$ woraus dann mit dem Hookeschen Gesetz $-\sigma = \Delta p = -K \Delta V/V$ schließlich $K^{\text{ad}} = \kappa p$ folgt.

Beispiel	Aggregatzustand	$\vartheta/^{\circ}\text{C}$	$c/\text{m/s}$
Luft	Gas	20	343
H ₂	Gas	0	1261
H ₂ O	flüssig	25	1493
Methanol	flüssig	25	1261
Stahl	Festkörper	10	4880
Kupfer	Festkörper	10	3666
Messing	Festkörper		3479

Tab. 1: Longitudinale Schallgeschwindigkeiten

Fragen

1. Was versteht man unter einer harmonischen Schwingung, einer ebenen Welle und einer stehenden Welle (mathematische Beschreibung)?
2. Wie groß ist die Phasengeschwindigkeit einer Schallwelle in Luft? Wie ändert sich bei einer fortlaufenden akustischen Welle die Phase des Schallausschlags und des Schallwechseldruckes mit x und t ?

3. Wie unterscheiden sich isothermes und adiabatisches Kompressionsmodul und die damit berechneten Schallgeschwindigkeiten für ein ideales Gas?
4. Was bedeutet Reflexion einer ebenen Schallwelle an einer Wand? Wie entstehen stehende Wellen? Wie groß ist der Knotenabstand?
5. Man zeige durch zweimaliges partielles Differenzieren von Gl. (14b), dass dieser Ausdruck eine Lösung von Gl. (14a) ist.
6. Was versteht man unter der Wellenzahl, der Wellenlänge und der Frequenz einer harmonischen Welle? Wie hängen sie zusammen? Wovon hängt die Schallgeschwindigkeit ab?
7. Wie unterscheiden sich Longitudinal- und Transversalwellen? Wovon hängen die Phasengeschwindigkeiten akustischer Longitudinal- und Transversalwellen ab?
8. Was ist ein adiabatischer Prozess? Was versteht man unter dem Adiabatenexponent?
9. Wie unterscheiden sich Schallgeschwindigkeit und Schallschnelle?
10. Nennen Sie Methoden zur Bestimmung der Phasengeschwindigkeit von Wellen.
11. Beschreiben Sie die Reflexion einer Seilwelle und einer Schallwelle an einer festen Wand.
12. Nennen sie Indikatoren für den Schallwechseldruck und den Schallausschlag.
13. Beschreiben Sie die Methode zur Bestimmung von c nach Quincke.
14. Beschreiben Sie die Methode zur Bestimmung von c nach Kundt.
15. Man bestätige die Gl. (1b).

Autorenschaft

Diese Versuchsanleitung wurde in ihrer ursprünglichen Form von L. Jahn (1998) erstellt und von M. Kreller, J. Kelling, F. Lemke, S. Majewsky bearbeitet. Aktuelle Änderungen werden von der Praktikumsleitung durchgeführt.

Literatur

- [1] W. Ilberg (Hrsg.), M. Krötzsch (Hrsg.) et. al., *Physikalisches Praktikum für Anfänger*, Teubner-Verlag, Leipzig (1994).
- [2] C. Gerthsen, H. Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1995).
- [3] F. Kohlrausch, *Praktische Physik*, Band 2, Teubner-Verlag, Stuttgart (1996).
- [4] H. J. Paus, *Physik in Experimenten und Beispielen*, Verlag C.-Hanser, München (1995).
- [5] W. Walcher, *Praktikum der Physik*, Teubner-Verlag, Stuttgart (1989).