

Versuch A 6: Schallgeschwindigkeit in Gasen und Festkörpern

1. Literatur: Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. I: Mechanik
Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
Pohl, Einführung in die Physik, 1. Bd.: Mechanik
IIberg, Gesche (Hrsg.), Physikalisches Praktikum

Stichworte: Schallwellen, Schallwechseldruck, Schallgeschwindigkeit, Kompressions- u. Elastizitätsmodul, Adiabatenkoeffizient,

2. Grundlagen

2.1 Schallwellen

Als Schallwelle wird eine in elastischen Medien wie Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern sich ausbreitende räumlich und zeitlich periodische Schwingung von Molekülen oder Atomen bezeichnet. Der Frequenzbereich einer Schallschwingung reicht vom Infraschall ($f < 16$ Hz) über den Schall des Hörbereichs ($16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$), den Ultraschall ($20 \text{ kHz} < f < 20 \text{ GHz}$) bis zum Hyperschall ($f > 20 \text{ GHz}$).

Hörbarer Schall kann z.B. durch einen Lautsprecher erzeugt werden. Durch die Bewegung der Membran wird die unmittelbar angrenzende Luftschicht zeitlich periodisch komprimiert bzw. expandiert. Es entsteht in der Luftschicht eine periodische Druckschwankung, wobei sich dem statischen Druck p_0 der Luft der sog. *Schallwechseldruck* p_s überlagert. Infolge der resultierenden Bewegung der Luftmoleküle breitet sich - eindimensional betrachtet - längs einer Luftsäule vor der Membran (in der x-Richtung) diese Druckschwankung wellenförmig aus:

$$p_s(x, t) = p_{s0} \sin\left(\omega\left(\frac{x}{c} - t\right)\right) \quad (1)$$

Hier ist p_{s0} die Schalldruckamplitude, $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz, f die Frequenz, c die Schallgeschwindigkeit, $c/f = \lambda$ die Wellenlänge der Schallwelle. Die Schallgeschwindigkeit c hängt von den elastischen Eigenschaften des Mediums ab.

In Gasen und Flüssigkeiten sind Schallwellen reine Longitudinalwellen; die Moleküle bewegen sich nur in Ausbreitungsrichtung der Welle, da Scherkräfte nicht auftreten. In Festkörpern breitet sich der Schall jedoch durch Longitudinal- und Transversalwellen aus.

2.2 Schallgeschwindigkeit in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern

Für Gase und Flüssigkeiten gilt bei nicht zu großen Schalldruckamplituden $p_{s0} \ll p_0$ die Beziehung:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

Hier ist K der Kompressionsmodul und ρ die Dichte des Ausbreitungsmediums.

In Gasen ist K vom Adiabatenkoeffizienten $\kappa = c_p/c_v$ abhängig, da die für die Ausbreitung der Schallwelle wesentliche Gaskompression adiabatisch verläuft. Mit $k = 1/K$, der Kompressibilität des Gases folgt aus der Adiabatengleichung $pV^\kappa = \text{const.}$:

$$k = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{p\kappa} \quad (3)$$

und daraus mit Gl. (2)

$$c = \sqrt{\frac{p\kappa}{\rho}} \quad (4)$$

Bei konstantem Druck $p = p_0$ (Normaldruck) ist in Gasen die Dichte ρ stark von der Temperatur abhängig. Aus der Zustandsgleichung des idealen Gases $pV = RT$ mit V dem Molvolumen, R der Gaskonstanten und T der Kelvin-Temperatur folgt:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M} = \frac{p_0}{\rho_0} \frac{T}{T_0} = \frac{p_0}{\rho_0} (1 + \alpha T') \quad (5)$$

Hier ist M die molare Masse und ρ_0 die Dichte des Gases bei der Temperatur T_0 . Für $T_0 = 273 \text{ K}$ (0°C) ist $\alpha = (1/273) \text{ K}^{-1}$ und $T' = T - T_0$ die Celsius-Temperatur. Hieraus folgt für die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit eines Gases bei konstantem Druck p_0 :

$$c = \sqrt{\frac{p_0 \kappa}{\rho_0} (1 + \alpha T')} = c_0 \sqrt{1 + \alpha T'} \quad (6)$$

Im Temperaturintervall $0^{\circ}\text{C} < T' < 100^{\circ}\text{C}$ gilt näherungsweise

$$c \approx c_0 \left(1 + \frac{\alpha}{2} T' \right) \quad (7)$$

In Luft beträgt die Schallgeschwindigkeit: $c_L = (331,5 + 0,6 T'/^{\circ}\text{C}) \text{ m/s}$.

Flüssigkeiten sind viel weniger kompressibel als Gase. In ihnen ist die Schallgeschwindigkeit entsprechend größer und beträgt etwa 1100 bis 2000 m/s. In Wasser bei 20°C ist $c = 1480 \text{ m/s}$.

In Festkörperstäben gilt für die Schallgeschwindigkeit die Gleichung

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

E ist der Elastizitätsmodul des Festkörpers (s. auch Versuch A9: Bestimmung des Elastizitäts- und Schubmoduls). Für Metalle liegt c im Bereich zwischen 1200 m/s und 6000 m/s. So ist z.B. für Stahl: $c \approx 5000 \text{ m/s}$.

3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Laufzeit eines Schallimpulses in Luft bei Raumtemperatur für verschiedene Weglängen. Berechnen Sie daraus die Schallgeschwindigkeit.
- 2. Aufgabe:** Bestimmen Sie aus der Messung der Laufzeit eines Schallimpulses in Luft für eine feste Weglänge bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 80°C die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft.
- 3. Aufgabe:** Bestimmen Sie analog zur ersten Aufgabe die Schallgeschwindigkeit von Kohlendioxid, Neon oder Helium bei Raumtemperatur.
- 4. Aufgabe:** Bestimmen Sie aus der Laufzeitmessung eines Schallimpulses in Metallstäben die Schallgeschwindigkeiten in Kupfer, Messing, Aluminium und Stahl bei Raumtemperatur.

4. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

4.1 Schallgeschwindigkeit in Gasen

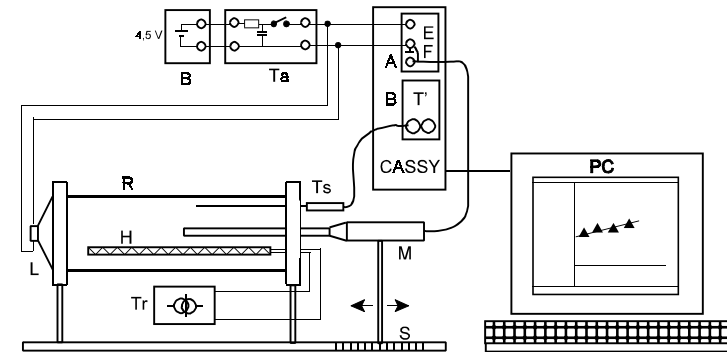


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gasen.

Abb.1 zeigt den Versuchsaufbau schematisch. Ein Plexiglasrohr R wird an einem Ende durch die Membran eines Lautsprechers L abgeschlossen, am anderen Ende durch einen Flansch. Durch diesen Flansch werden ein Mikrophon M , ein Temperatursensor T_s und die elektrische Zuleitung zu einem Heizstab H in das Rohrlinnere geführt. Zusätzlich können über zwei am Flansch angebrachte Rohrstutzen verschiedene Gase in das Rohr geleitet werden (ohne Abb.).

Der Heizstab wird über einen Transformator Tr mit Spannungen $2 - 12 \text{ V}$ betrieben. Das sich in der Röhre befindene Gas (Luft) kann auf diese Weise bis auf ca. 90°C erwärmt werden. Die Spannung des Temperatursensors (NiCr/Ni-Thermoelement) wird über die Temperaturmessbox T' am Eingang B des Interface Cassy einem PC zugeführt. Das Mikrophon ist auf einer Schiene S mit der Längenskala s_1 verschiebbar. Auf diese Weise kann die gesamte Wegstrecke des Schalls $s = s_0 + s_1$ zwischen Lautsprecher und Mikrophon verändert werden.

Wird die Taste auf der Tasterbox Ta gedrückt, entlädt sich der zuvor mit einer Batterie B geladene Kondensator über den Lautsprecher. Es entsteht ein Schallpuls, der im Rohr auf das Mikrophon zuläuft. Gleichzeitig startet die pos. Flanke der Kondensatorspannung am Eingang E der Timerbox (Interface-Eingang A) die Zeitmessung. Trifft der Schallimpuls auf das Mikrophon (Einstellung: Trigger, Rechteck-Symbol) stoppt die pos. Flanke des in ihm erzeugten

Spannungspulses am Eingang F der Timerbox die Zeitmessung. Aus der gemessenen Änderung der Laufzeit Δt durch Ändern der Wegstrecke s_1 kann die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden.

Die Aufnahme und Auswertung der Messdaten wird mit dem allgemeinen Messprogramm *CASSY Lab* durchgeführt. Es ist menügesteuert und gestattet neben der Messwertaufnahme und -anzeige in Tabellen und Graphen die unmittelbare Berechnung bzw. Auswertung von Daten auf dem Bildschirm. Darüber hinaus können die Daten in Graphen oder Tabellen ausgedruckt bzw. gespeichert werden.

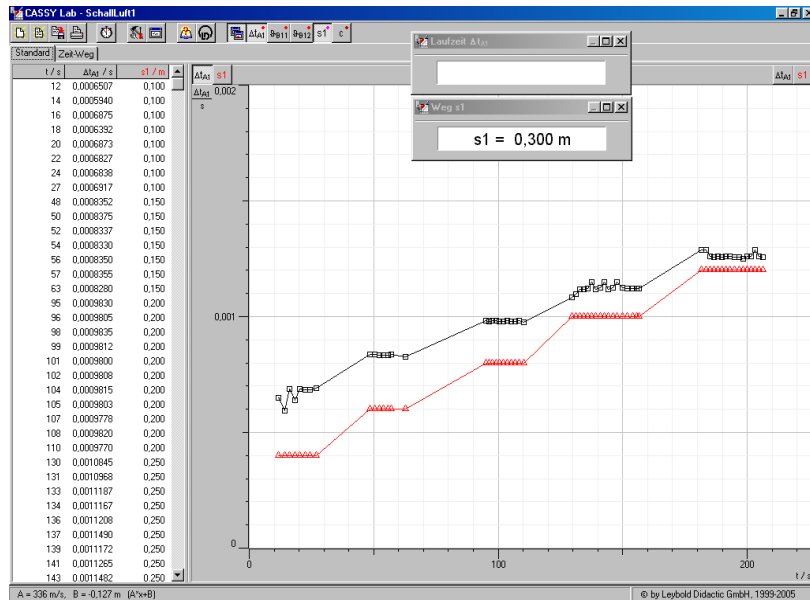


Abb. 2: Menüfenster des Cassy-Programms *Schall 1* mit Standardtabelle und -graphen nach Messung der Schall-Laufzeit Δt_{A1} für verschiedene Wegstrecken s_1 .

Öffnen Sie nach Einschalten des Computers im Ordner *D:\Eigene Dateien\Schall* die Datei *Schall1*. In der Kopfzeile zeigt der Bildschirm (s. Abb. 2) per Maus anklickbare Befehle wie *Neue Datei* (*geladene Datei löschen*), *Datei laden*, *speichern*, *drucken* an. Mit dem Stoppuhrsymbol wird die Messung gestartet und kann vor Ablauf einer eingestellten Messzeit gestoppt werden. Nach Anklicken des Werkzeugsymbols werden die Messprogramm-Einstellungen angezeigt.

Der unter der Kopfzeile liegende Bereich des Bildschirms zeigt links 2 per Maus anklickbare Messwerttabellen an: *Standard* und *Zeit-Weg*. In der Tabelle *Standard* (s. Abb. 2), ist die Zeit t , die gemessene Schalllaufzeit $\Delta t_{A1}(t)$ sowie die als Parameter einstellbare Strecke $s_1(t)$ aufgetragen. Der Graph rechts zeigt $\Delta t_{A1}(t)$ und $s_1(t)$. Zusätzlich können mit Panelmetern die aktuellen Werte für Laufzeit, Weg s_1 , etc. angezeigt werden.

Stellen Sie den Stativfuß des Mikrofons mit seiner linken Kante auf die Position $s_1 = 0,1$ m der Wegskala. Tragen Sie den eingestellten Weg s_1 nach Drücken der rechten Maustaste auf dem Panel im geöffneten Fenster *Einstellungen / Eigenschaften / Parameter* ein. Verbinden Sie die Batterie mit der Tasterbox, schalten Sie das Mikrophon mit der roten Taste ein und starten Sie das Messprogramm **probeweise** durch Drücken des Stoppuhrsymbols. Beim Drücken der Taste auf der Box sollte ein Knackton des Lautsprechers zu hören und nachfolgend ein Messsymbol bei Messwerten Δt_{A1} zwischen etwa 0,5 u. 1 ms zu sehen sein. Nach einer Fehlmessung kann mit der rechten Maustaste auf der Tabelle mit dem Befehl *letzte Tabellenzeile löschen* jeweils der letzte Messwert gelöscht werden. Gegebenenfalls ist dieser Befehl mehrmals zu wiederholen. Führen Sie im Zeitabstand > 1 s die Messung mehrmals durch. Das Messergebnis sollte mit Abweichungen $< 10\%$ reproduzierbar sein.

Stellen Sie danach das Mikrophon auf die Position $s_1 = 0,15$ m und tragen Sie im Feld *Einstellungen/Parameter* den neu eingestellten Wert ein. Führen Sie darauf die Messung mit dem neu eingestellten Weg s_1 fort. Durch erneutes Drücken des Stoppuhrsymbols kann die Probemessung beendet werden.

4.1.1 1. Aufgabe

Starten Sie die Messung erneut und führen Sie mindestens jeweils 5 Laufzeitmessungen bei Wegstrecken $s_1 = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$ und $0,3$ m durch. Eliminieren Sie Fehlmessungen jeweils **sofort** durch den Rechte-Maus Befehl *letzte Tabellenzeile löschen* auf dem Tabellenfeld. Beenden Sie die Messung durch erneutes Drücken des Stoppuhrsymbols.

Schalten Sie im Tabellenfeld auf die Zeit-Weg-Darstellung um. In der Tabelle sind wieder Δt_{A1} und s_1 zeitlicher Reihenfolge (t) dargestellt, im Graphen die Messsymbole s_1 über Δt_{A1} . Drücken Sie auf dem Graphen mit der rechten Mausraste *Anpassung vornehmen/Ausgleichsgerade* und ziehen Sie die Maus mit gedrückter rechter Taste über die Messsymbole (Δt_{A1}), so dass möglichst alle invertiert d.h. erfasst werden. Nach Loslassen der gedrückten Maus wird automatisch die Ausgleichsgerade $y = Ax + B$ berechnet. Auch jetzt kann nach Ausführung des Rechte-Maus-Befehls *Letzte Auswertung löschen* auf der

Graphikfläche die Anpassung gegebenenfalls wiederholt werden. Mit dem Rechte-Maustaste-Befehl *Markierung setzen/Text* werden die Geradenparameter A und B der Geradengleichung $s_1(\Delta t_{A1})$ (nach möglicher Editierung) in den Graphen an geeigneter Stelle plaziert. In der Ausgleichsgeraden

$$s_1 = A \Delta t_{A1} + B = c \Delta t_{A1} - s_0 \quad (9)$$

ist A die bei Raumtemperatur bestimmte Schallgeschwindigkeit, $B = -s_0$. Nach der Bestimmung von s_0 kann somit bei nachfolgenden Messungen $\Delta t_{A1}(t)$, $s_1(t)$ die gesamte Wegstrecke $s = s_0 + s_1$ unmittelbar ermittelt und damit die Schallgeschwindigkeit $c = (s_0 + s_1)/\Delta t_{A1}$ direkt aus Messungen $\Delta t_{A1}(t)$, bei einer festen Wegstrecke $s_1(t)$ berechnet werden.

Vor Beginn der nächsten Messung werden die Daten im Ordner *D:\Eigene Dateien\Schall* abgespeichert. Wählen Sie als Dateinamen die Form [Gruppennummer]_Schall1, also z.B. für die Gruppe 123 *123_Schall 1*.

4.1.2 2. Aufgabe

Laden Sie aus dem Ordner *D:\Eigene Dateien\Schall* die Datei *Schall 2*. Stellen Sie das Mikrofon auf die Position $s_1 = 0,30$ m (also aus dem Rohr herausgezogen), addieren Sie zu s_1 den in der ersten Aufgabe ermittelten Wert s_0 und tragen Sie den Summenwert s nach Drücken der rechten Maustaste auf dem Panel *Weg s* in das Feld *Eigenschaften/Konstante* ein.

In der Standard-Tabelle wird die Celsius-Temperatur T' ($= \vartheta_{B11}$) angezeigt, ebenso die Laufzeit Δt_{A1} und die Schallgeschwindigkeit $c = s/\Delta t_{A1}$. Im Graphen werden beide Größen Δt_{A1} und c über der Temperatur aufgetragen. Starten Sie die Laufzeitmessung wie zuvor. Schließen Sie den Heizstab an den Transformator an. Für Temperaturen $RT - 35^\circ C$ sollte 4V, für $35^\circ C - 50^\circ C$ 6V, für $50^\circ C - 65^\circ C$ 8V und für $65^\circ C - 80^\circ C$ 10V gewählt werden. Während der Messung sollte die Temperatur nicht zu schnell steigen, da andernfalls eine zu starke Luftkonvektion im Rohr die Messung verfälscht.

Führen Sie die Messungen in Temperaturintervallen von jeweils etwa $1^\circ C$ durch und machen Sie, wenn nötig, **sofort** Gebrauch vom Löschbefehl *letzte Tabellenzeile löschen*. Benachbarte Messwerte sollten sich im Laufzeit- bzw. c-Wert möglichst nicht viel mehr als etwa der dreifachen Messsymbolgröße entsprechend unterscheiden.

Nach Erreichen der Maximaltemperatur $80^\circ C$ ist die Stromversorgung des Heizstabs vom Transformator abzutrennen und die Messreihe durch Drücken der

Stoppuhrstaste zu beenden. Schalten Sie auf die Tabelle c (Temperatur) um und zeichnen Sie die Ausgleichsgerade

$$y = Ax + B \quad \text{bzw.} \quad c(T') = c_0 + c_1 T' \quad (10)$$

mit den berechneten Parametern $B = c(0) = c_0$, $A = c_1$. Speichern Sie die Messung im Ordner *D:\ Eigene Dateien \ Schall* unter dem Dateinamen [Gruppennummer]_Schall2 ab und drucken Sie den Graphen aus. Vergleichen Sie in der weiteren Auswertung das Ergebnis, Gl. (10) mit den Literaturwerten und der Theorie, Gl. (7). Diskutieren Sie insbesondere möglich systematische Messfehler.

4.1.3 3. Aufgabe

Laden Sie aus dem Ordner *D:\Eigene Dateien\Schall* die Datei *Schall 3*. Die Programmanzeige ist die gleiche wie in *Schall 1*. Stellen Sie das Mikrofon wie in Aufgabe 2 auf die Position $s_1 = 0,30$ m und tragen s_1 nach Drücken der rechten Maustaste auf dem Panel *Weg s_1* in das Feld *Eigenschaften/Parameter* ein.

Starten Sie wie bei der ersten Aufgabe die Messung in Luft. Die Messwertanzeige sollte mit der zuvor erzielten übereinstimmen.

Das zu untersuchende Gas Helium, Neon oder Kohlendioxid wird nun **unter Aufsicht des stud. Betreuers** in das Rohr eingelassen. Um unkontrollierten Gasausfluss zu vermeiden, sollte vor dem Aufschrauben des Ventils V_1 (s. Abb. 3)

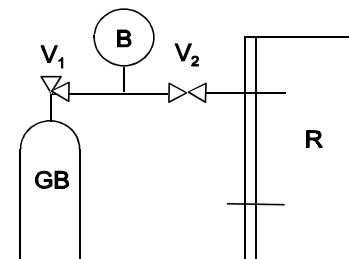


Abb. 3:

Skizze zur Verbindung zwischen Gasbehälter GB und Rohrvolumen R mit B Gasballon, V_1 Gasbehälterventil, V_2 Ballonventil

auf den entsprechenden *minican* - Gasbehälter das Ventilhandrad an den rechten Anschlag gedreht (geschlossen) sein. Aus Kostengründen sollte nicht mehr Gas als nötig verbraucht werden. Um beim Gaseinlass die sich im Rohr befindene Luft möglichst vollständig zu verdrängen, wird das leichtere Gas (He, Ne) in den im Rohr nach oben führenden Stutzen, das schwerere Gas (CO_2) entsprechend in den

nach unten führenden Stutzen **langsam** eingeleitet.

Öffnen Sie zum Gaseinlass in das Rohr bei geschlossenem Ventil V_2 das Ventil V_1 und füllen Sie zunächst den Ballon. Schließen Sie danach V_1 und öffnen Sie das Ventil V_2 , um das Ballonvolumen in das Rohr einzuleiten. Benutzen Sie gegebenenfalls eine Schlauchklemme im Verbindungsschlauch zum Rohr oder halten Sie den Schlauch zusammengedrückt, um die Gasströmung zu reduzieren. Führen Sie während oder nach dem Gaseinlass weitere Laufzeitmessungen durch. Wiederholen Sie den Füllvorgang nach Schließen von V_2 und messen Sie erneut. Die Schalllaufzeit sollte nach mehrmaligem Füllvorgang einem Sättigungswert zustreben (der hoffentlich erreicht wird, bevor der Gasbehälter leer ist!) Verschließen Sie danach den Luftauslass mit einem Stopfen und führen Sie zügig einige Laufzeitmessungen mit der Wegstrecke $s_1 = 0,2$ m und $0,1$ m durch. Bedenken Sie, dass infolge von Diffusion das Gasvolumen von der umgebenden Luft zunehmend durchmischt wird, d.h. die Schalllaufzeit sich mit der Zeit der von Luft annähern wird.

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit kann das Weg-Zeit-Diagramm wie in der ersten Aufgabe ausgewertet werden. Um die Auswahl der hierfür relevanten Messwerte zu erleichtern, können zuvor für die Auswertung nicht relevante Messwertbereiche (außerhalb des Zeitfensters der für die Messung relevanten Messwerte) in der Standardeinstellung nach dem Befehl mit der rechten Maustaste *Bereich löschen* durch Ziehen mit gedrückter linker Maustaste über die Messsymbole gelöscht werden. Zur Sicherung der Daten sollte jedoch dann vorher die Datei mit dem Namen [Gruppennummer]_Schall 3 gespeichert werden. Die Daten sind gegebenenfalls später mit dem Namen [Gruppennummer]_Schall 3a zu speichern.

Alternativ kann im Standard-Graphen für jede Messstrecke s_1 mit der rechten Maustaste der Befehl *Mittelwert einzeichnen* aktuiert und danach durch Ziehen der gedrückten linken Maustaste der gewünschte Bereich der Zeiten Δt_{A1} invertiert d.h. markiert werden. Nach Loslassen der Maus wird die horizontale Mittelwertgerade gezeichnet. Der Wert wird nach dem rechten Maus-Befehl *Markierung setzen, Text* an die Gerade gesetzt. Nach Einzeichnen aller Mittelwerte und entsprechender Textmarkierung können die Daten nach Ausdrucken des Graphen zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ausgewertet werden.

Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit im betreffenden Medium und diskutieren Sie nach Vergleich des ermittelten Wertes mit Literaturwerten für Helium, Neon, bzw. Kohlendioxid insbesondere mögliche systematische Fehler des Experiments. Vergleichen Sie Ihre Messergebnisse der Aufgaben 1 u. 2 auch hinsichtlich Gl. (4) mit Literaturdaten für den Adiabatenkoeffizienten und die Dichte der Gase.

4.2 Schallgeschwindigkeit in Festkörpern

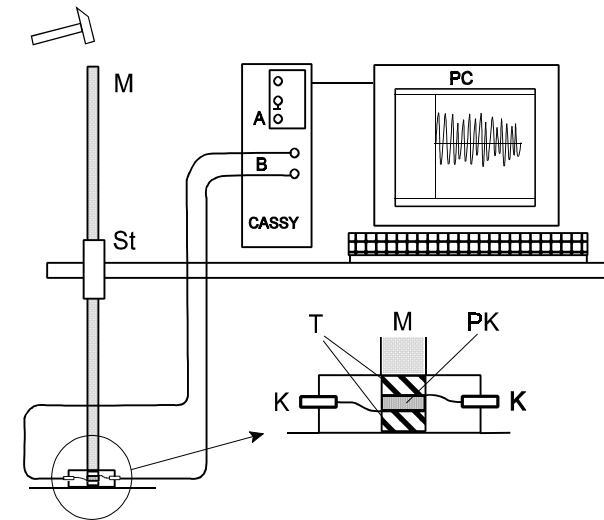


Abb. 4: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Metallstäben: M Metallstab, St Stativhalter, T Drucktransmitter, PK piezoelektrischer Kristall, K elektr. Kontaktbuchsen

Abb. 4 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Metallstäben M. Diese werden von einem Tischstativ St gehalten auf eine Plastikdose am Boden aufgesetzt. Mit einem leichten Hammerschlag auf das obere Ende des Metallstabes wird ein Schallimpuls erzeugt, der vom oberen Ende nach unten durch das Metall läuft. In der Plastikdose trifft die sich mit dem Schallimpuls ausbreitende Kompressionswelle über den Transmitter T (Plexiglas) auf einen Piezokristall PK. Dieser Kristall besitzt ein permanentes elektrisches Dipolmoment, d.h. (hier vertikal) in atomarem Abstand gegenüberliegend positive u. negative Ladungen. In einem äußeren elektrischen Feld ändern diese Ladungen ihren Abstand und damit der Kristall seine (vertikale) Länge. Umgekehrt wird aufgrund der infolge des Schalls durch den Kristall laufenden Kompressionswelle ein elektrisches Feld und an der Ober- und Unterseite des Kristalls eine entsprechende elektr. Spannung erzeugt, die mittels Metallelektroden über Kontaktbuchsen K dem Analogeingang B des Cassy Interface zugeführt werden.

Der Schallimpuls wird nach Durchlaufen des Metallstabs der Länge l am unteren und oberen Ende reflektiert, so dass am Piezokristall infolge mehrfacher Reflexionen eine Wechselspannung mit der Frequenz

$$f_0 = \frac{c}{2l} \quad (11)$$

auftritt. Die Messung der Länge des Metallstabes und der Frequenz f_0 der Spannung ermöglicht damit die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit c im Metall.

Bestimmen Sie zunächst die Längen der zu untersuchenden Stäbe. Entfernen Sie die Temperaturmessbox **vorsichtig** vom Eingang B des Cassy Interface. Verbinden Sie gemäß Abb. 4 nach Montage des ersten der vier Metallstäbe auf der Piezobox die Zuleitungen mit dem Analogeingang B und laden Sie aus dem Ordner *D:\Eigene Dateien\Schall* die Datei *Schall4*.

Starten Sie das Messprogramm durch Drücken des Stoppuhrsymbols und schlagen Sie danach **leicht** mit dem Hammer auf das obere Ende des Metallstabes. Die Aufzeichnung der Spannung $U_{B1}(t)$ wird durch ein Triggersignal $U_{B1} > 1V$ gestartet. In der Standardtabelle wird die Zeit im Intervall 0 - 20 ms und die Spannung U_{B1} des Piezokristalls im Intervall $\pm 10V$ aufgezeichnet.

Die Tabelle *Frequenzspektrum* zeigt das Fourier-Spektrum $f_1(f)$. Hier ist die Spannung $U_{B1}(t)$ in eine Summe von Sinus-Funktionen $U_f \sin(2\pi ft)$ zerlegt, wobei $f_1(f)$ den Amplitudenanteil $U_f(f)$ von allen in U_{B1} auftretenden Frequenzen darstellt (s. Versuch C3: Analyse elektrischer und akustischer Schwingungen). Das im Spektrum auftretende Hauptmaximum kennzeichnet die Frequenz f_0 gem. Gl. (11). Maxima bei Vielfachen von f_0 (sog. *Oberwellen*) sind auf die nicht harmonische (sinusförmige) Erzeugung der Schallwelle zurückzuführen, weitere Peaks neben den Maxima treten infolge von sog. *Schwebungen* auf (s. z. B. Versuch A4: Gekoppelte Pendel). Für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ist hier die Bestimmung der Grundfrequenz f_0 ausreichend. Notieren Sie diesen Wert. Benutzen Sie zu seiner Bestimmung mit der rechten Maustaste auf dem Graphen die Option *Koordinaten anzeigen* (die Anzeige erfolgt in der unteren linken Bildschirmecke). Ist der Peak an seiner Spitze nicht symmetrisch, so liegt der Maximalwert nicht bei f_0 . Wählen Sie die Mitte des Peaks. Es kann auch die Rechte-Maustasten-Option *Weitere Auswertungen / Peakschwerpunkt bestimmen* benutzt werden. Mit gedrückter linker Maustaste wird ein Datenfenster auf dem Graphen, welches den Peak in seiner Mitte einschließt, ausgewählt.

Loslassen der Maustaste erzeugt einen vertikalen Strich, den Peakschwerpunkt. Der Frequenzwert wird ebenfalls in der unteren linken Bildschirmecke angezeigt. Er wird nach dem rechten Maus-Befehl *Markierung setzen, Text* an den Peak gesetzt.

Wiederholen Sie die Messung zweimal und überprüfen Sie die Reproduzierbarkeit. Die neue Messreihe wird an die alte angefügt, das neue Spektrum dem alten überlagert und wie zuvor ausgewertet. Tragen Sie danach mit dem Befehl *Markierung setzen, Text* das Material des Stabes und seine Länge ein. Drucken Sie den Graphen aus und speichern Sie die Messdatei im Ordner *D:\Eigene Dateien\Schall* unter dem Dateinamen [Gruppennummer]_Schall 4_[Metall] ab, also z. B. mit *123_Schall4_Cu*. Führen Sie die Messungen mit den anderen Stäben analog aus.

Bestimmen Sie in der Auswertung jeweils den Mittelwert und die Standardabweichung der bestimmten Frequenzen f_0 . Berechnen Sie die Schallgeschwindigkeit in den Stäben gem. Gl. (11) und vergleichen Sie das Messergebnis mit Literaturwerten. Schätzen Sie den max. Fehler in der Bestimmung von c ab, der sich aus einem Längenmessfehler $\Delta l = 1\text{mm}$ und einem Fehler entsprechend der Standardabweichung für f_0 ergibt. Diskutieren Sie mögliche systematische Fehler der Messung.

5. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Was ist Schall, wie breitet er sich in welchen Medien aus?
- 2) In welche Frequenzbereiche werden Schallschwingungen eingeteilt, wie werden sie benannt?
- 3) Von welchen Materialeigenschaften hängt die Schallgeschwindigkeit in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern ab?
- 4) Nennen Sie typische Werte für die Schallgeschwindigkeit in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern wie z.B. in Luft, Wasser oder Stahl!
- 5) Wie hängen Geschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge des Schalls voneinander ab?
- 6) Gibt es eine minimale Wellenlänge bzw. maximale Frequenz des Schalls?
- 7) Was versteht man unter einer adiabatischen Zustandsänderung? In welcher Weise ist sie bei der Schallausbreitung in Gasen von Bedeutung?
- 8) Aufgrund welcher physikalischen Größe unterscheidet sich die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen hauptsächlich?