

Versuch M01: Messung der Schallgeschwindigkeit in Gasen mit dem Quincke'schen Interferenzrohr

23. Februar 2023

I. Einleitung

Schallwellen breiten sich in Gasen als elastische Longitudinalwellen aus. Für ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit c hat Pierre-Simon de LAPLACE 1816 die Beziehung

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} \quad (\text{LAPLACE'sche Formel}) \quad (1)$$

abgeleitet, wobei p den Druck, ρ die Dichte und κ den Adiabatenexponenten bedeuten, der sich aus den spezifischen Wärmen bei konstantem Druck c_p und bei konstantem Volumen c_V gemäß

$$\kappa = \frac{c_p}{c_V} \quad (2)$$

berechnet. LAPLACE ging dabei von der damals neuartigen Vorstellung aus, dass die schnell aufeinander folgenden Kompressionen und Dilatationen in den elastischen Schallwellen **adiabatisch** erfolgen und daher zu entsprechenden Erwärmungen bzw. Abkühlungen des Mediums führen. Damit war die Ursache für die erheblichen Diskrepanzen zwischen zahlreichen experimentellen Ergebnissen und den nach der von Isaac NEWTON 1710 angegebenen Formel

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \quad (\text{NEWTON'sche Formel}) \quad (3)$$

berechneten Werten gefunden. NEWTON war bei seiner Ableitung von **isothermen** Vorgängen in der Schallwelle ausgegangen.

II. Messapparatur

Kernstück der Apparatur, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist, bildet das von Georg QUINCKE 1866 zur Untersuchung **akustischer Interferenzen** entworfene QUINCKE'sche Interferenzrohr. Es besteht aus zwei Rohrbögen, von denen der eine **posau-**
nenartig ausgezogen werden kann.

Der Generator **G** erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung der Frequenz f und betreibt den elektroakustischen Wandler **S** als Schallsender. Die von ihm ausgehende Druckwelle spaltet sich am Reflektor **R**₁ in zwei Teilwellen auf. Sie durchlaufen die

beiden verschiedenen Wege s_1 und s_2 und überlagern sich nach Spiegelung an R_2 vor dem Schallempfänger E .

Dieser wandelt die Summe der beiden Teildrucke in eine ihr proportionale Spannung um, die nach Passieren des Verstärkers V schließlich am Instrument J abgelesen werden kann.

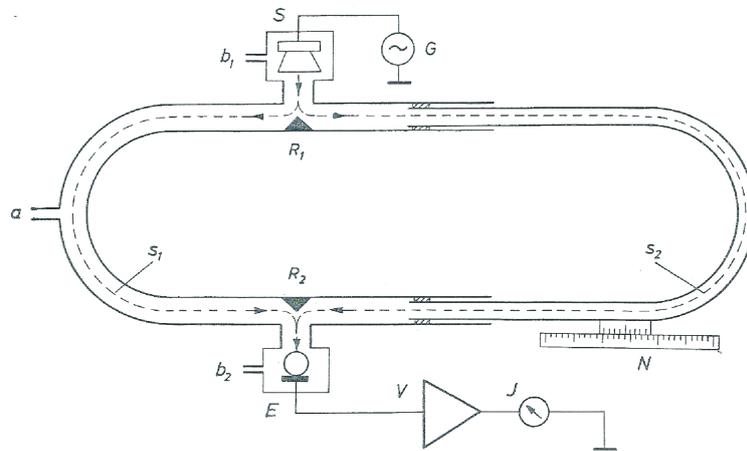


Abbildung 1: Schema des Versuchsaufbaus mit dem QUINCKE'schen Interferenzrohr.

Der Gangunterschied der am Empfänger interferierenden Teilwellen kann durch Verändern von s_2 variiert werden. An der Skala N wird diese Veränderung gemessen. Besonders gut lassen sich die Interferenzminima auswerten. Aus der Messung ihrer Abstände gemäß

$$s_2 - s_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ mit } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

kann zunächst die Schallwellenlänge λ ermittelt und dann nach

$$c = \lambda \cdot f \quad (5)$$

die Schallgeschwindigkeit c berechnet werden.

III. Aufgaben

Die Frequenz des Schallsenders ist für alle Messungen konstant und beträgt

$$f = (8000,0 \pm 0,8) \text{ Hz} \quad (6)$$

III.1. Schallgeschwindigkeitsbestimmungen

Man ermittle die Schallgeschwindigkeiten c_0 unter Normalbedingungen (0°C , Atmosphärendruck) für die ein-, zwei- und dreiatomigen Gase **Helium**, **Luft**, **Kohlendioxid**.

Dazu bestimme man bei den jeweils bestehenden Raumtemperaturen T (in Grad Celsius) zunächst die Schallgeschwindigkeit c mit Hilfe der Formeln (4) und (5) wobei man den **maximal möglichen Hub** des posaunenartigen Auszugs ausnutze. Zu den Werten für Normalbedingungen gelangt man dann über die Beziehung

$$c_0 = \frac{c}{\sqrt{1 + \alpha T}} \quad , \quad \alpha = \frac{1}{273,15 \text{ °C}} \quad (7)$$

$$(8)$$

III.2. Ermittlung der Adiabatenexponenten

Mit den eben ermittelten Schallgeschwindigkeiten berechne man aus der Gleichung 1 für die drei Gase den Adiabatenexponenten κ . Dazu lässt sich (1) mit Hilfe der Zustandsgleichung für ideale Gase zu

$$\kappa = c^2 \frac{M}{RT} \quad (9)$$

umformen, mit

M molare Masse

R universelle Gaskonstante

T absolute Temperatur in Kelvin

III.3. Vergleich mit κ -Werten der gaskinetischen Theorie

Man stelle für die drei Gase die Resultate für c_0 und κ tabellarisch zusammen und füge zu Vergleichszwecken noch die nach der gaskinetischen Theorie unter Berücksichtigung des **Gleichverteilungsgesetzes** zu erwartenden Werte für κ hinzu.

IV. Hinweise zur Aufgabenstellung

Zu 3.2: Zur Berechnung des Molekulargewichts der Luft berücksichtige man eine Volumenzusammensetzung von 79% N₂ und 21% O₂.

Zu 3.3: Für die Differenz der molaren spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und konstantem Volumen gilt $c_p - c_V = R$.

Pro Freiheitsgrad gibt es einen Beitrag von $1/2 R$ zur molaren spezifischen Wärme c_V . Abbildung 2 gibt eine Modellvorstellung über ein-, zwei- und dreiatomige Gase wieder zur Veranschaulichung der drei Freiheitsgrade der Translation (1,2,3) und der zwei bzw. drei zusätzlichen Freiheitsgrade der Rotation (4,5 bzw. 4,5,6). Das gewinkelte Molekül in Abbildung 2 mit insgesamt 6 Freiheitsgraden gilt z.B. für das H₂O-Molekül. **Das CO₂-Molekül ist jedoch gestreckt!** Bei ihm kommen zu den 3 Freiheitsgraden der Translation und den 2 Freiheitsgraden der Rotation noch **2 Schwingungsfreiheitsgrade** hinzu, so dass insgesamt also 7 Freiheitsgrade zu berücksichtigen sind.

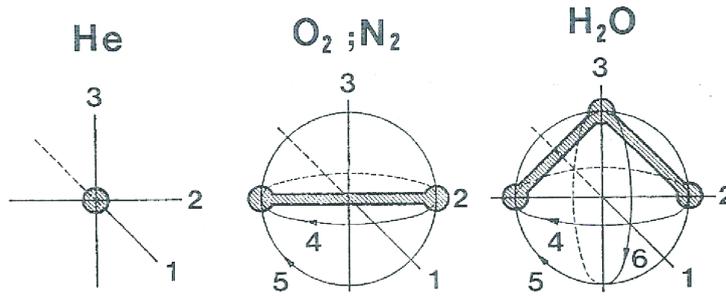


Abbildung 2: Zur Veranschaulichung der Freiheitsgrade.

V. Hinweise zur Versuchsdurchführung

Zu 3.1: Zur genauen und schnellen Wellenlängenbestimmung ist es am günstigsten, die genauen Lagen der beiden Schallintensitätsminima nahe bei maximal und minimal möglichem Posaunenauszug mit höchstmöglicher Präzision einzustellen und auf der Skala abzulesen, sowie sämtliche auf dieser Strecke liegenden Minima nur zu zählen. Der Abstand dieser beiden Extremlagen sei die Verschiebung δ . Die Anzahl **sämtlicher Minima** auf dieser Verschiebung sei m . Dann ist $\delta = (m - 1)\frac{\lambda}{2}$ und somit die gesuchte Wellenlänge

$$\lambda = 2\delta/(m - 1) \text{ mit } m = 2, 3, 4 \dots \quad (10)$$

Es ist zweckmässig, zuerst mit der reichlich vorhandenen Pressluft zu beginnen, um sich mit den praktischen Details des Experiments vertraut zu machen und um sich zu trainieren, höchste Präzision zu erreichen. Danach messe man mit CO₂ und schließlich mit He. Beim Gaswechsel achte man auf sorgfältigen Austausch der Füllgase, so dass stabile Messungen der Minima möglich sind. Für jedes Gas führe man zügig hintereinander 3 höchstpräzise Verschiebungsmessungen aus, mittele über die je drei oben erläuterten Endlagenwerte und bestimme daraus die Wellenlänge. Da in aller Regel die Raumtemperatur leicht ansteigt, messe man unmittelbar vor Beginn und nach Beendigung der Verschiebungsmessreihe möglichst genau die Anfangs- und Endtemperatur. Mit dem Mittelwert dieser Temperaturen berechne man die Schallgeschwindigkeit c_0 bei Normalbedingungen.

Vorsicht!

Um bei der Verschiebungsmessung immer eine vollständige Füllung des Interferenzrohres mit dem gewählten reinen Gas sicherzustellen, soll stets eine leichte, die Schallgeschwindigkeit nicht störende Gasströmung bestehen. Das Gas tritt ein bei a und tritt aus bei b₁, b₂, b₃ (siehe Abbildung 1). Bei den Verschiebungsmessungen achte man darauf, das Vergrößern des Posaunenauszuges so langsam vorzunehmen, dass unter keinen Umständen Luft durch die kleinen Gasaustrittsöffnungen b₁, b₂, b₃ des Interferenzrohres angesaugt wird! Die jeweiligen Gasventile **sehr vorsichtig** öffnen und nach dem Versuch sorgfältig wieder verschließen!