



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

296. Pfeifen

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-83789)

wird in der Regel der sog. Kammerton (das eingestrichene a) gewählt, welches durch eine Normalstimmgabel angegeben wird. Während früher für diesen Kammerton in den verschiedenen Ländern verschiedene Schwingungszahlen gebräuchlich waren, ist seit 1885 durch internationale Vereinbarung die Schwingungszahl für das temperierte a zu 435 festgesetzt worden. Für die Rechnung sehr bequem ist die physikalische Stimmung, welche das eingestrichene c zu 256, das temperierte a sonach zu 430,5 Schwingungen annimmt. Hiernach ergeben sich für die in der folgenden kleinen Tabelle näher bezeichneten Grundtöne der in der Musik benutzten Oktaven die beigefügten absoluten Schwingungszahlen:

Oktavlage	Inter- nationale Stimmung	Physi- kalische Stimmung
Subkontra- C c_{-3}	16,2	16
Kontra- C c_{-2}	32,3	32
Großes C c_{-1}	64,7	64
Kleines C c_0	129,3	128
Eingestrichenes C c_1	258,7	256
Zweigestrichenes C . . . c_2	517,3	512
Dreigestrichenes C . . . c_3	1034,6	1024

Das Subkontra- C von 16 Schwingungen bildet die untere Grenze der Wahrnehmbarkeit für das menschliche Ohr; die obere Grenze liegt zwischen c_7 und c_8 (bei 17—20 000 Schwingungen). Das menschliche Gehör umfaßt sonach 10 Oktaven. Die in der Musik gut brauchbaren Töne liegen zwischen 40 und 4000 Schwingungen, was einem Intervall von etwa 7 Oktaven entspricht.

295. **Wellenlänge.** Wenn die Schwingungszahl eines Tones bekannt ist, läßt sich auch sehr leicht seine Wellenlänge in Luft angeben. Alle Töne, hohe und tiefe, pflanzen sich nämlich in der Luft mit der gleichen Geschwindigkeit von 340 m in einer Sekunde fort; denn, wenn etwa die hohen Töne den tiefen voraneilen oder umgekehrt, so müßte ein aus einiger Entfernung angehörtes Musikstück als unerträgliches Durcheinander erscheinen, weil die zu demselben Taktschlag gehörigen hohen und tiefen Töne nicht gleichzeitig das Ohr des Hörers erreichen würden. Da nun jede ganze Schwingung auch eine ganze Welle erzeugt, so müssen auf die Strecke von 340 m so viele Wellen gehen, als in einer Sekunde Schwingungen stattfinden. Die Länge einer Welle findet man daher, indem man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles durch die Schwingungszahl dividiert. Für den Ton a_1 von 435 Schwingungen z. B. ergibt sich die Wellenlänge $= 340/435 = 0,782 \text{ m} = 782 \text{ mm}$.

296. **Pfeifen.** Eine schwingende Stimmgabel, frei in die Luft gehalten, gibt nur einen sehr schwachen kaum hörbaren Ton. Der Ton wird aber kräftig gehört, wenn man die Stimmgabel vor die

Mündung einer Röhre von geeigneter Länge, z. B. über ein zylindrisches Glasgefäß hält, in welchem man durch Eingießen von Wasser die Luftsäule so lange verkürzt, bis ein kräftiges Mitklingen derselben eintritt. Für die a -Stimmgabel z. B. findet man, daß zu diesem Behuf die Luftsäule 195 mm lang sein muß, d. h. gleich dem vierten Teil der Wellenlänge 782 mm. So ergibt sich überhaupt, daß die Länge der kürzesten Luftsäule, welche durch einen schwingenden Körper zum Mitklingen erregt wird, gleich einem Viertel der Länge der Schallwelle sein muß, die von dem schwingenden Körper ausgeht. Die eintretende Luftwelle wird nämlich am geschlossenen Ende der Röhre zurückgeworfen; durch das Zusammenwirken (Interferenz) der zurückgeworfenen mit den neu einfallenden Wellen wird in der Röhre jener eigentümliche Schwingungszustand hervorgerufen, den wir als stehende Longitudinalwelle bereits kennen gelernt haben. Am geschlossenen Ende der Röhre wird die Welle, in welcher die zur Achse der Röhre senkrechten Luftschichten nach deren Längsrichtung hin- und herschwingen, mit entgegengesetzter Schwingungsrichtung zurückgeworfen (vgl. 286), und sonach die Bewegung der einfallenden Welle durch die der zurückgeworfenen stets aufgehoben. Die dem geschlossenen Ende der Röhre anliegende Luftschicht bleibt also immer in Ruhe und bildet einen Knoten. Solche ruhig stehenbleibenden Luftschichten oder Knoten bilden sich auch an den Stellen, welche um $\frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}, \frac{4}{2} \dots$ Wellenlängen vom Boden der Röhren entfernt sind. In den Punkten dagegen, welche um $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4}, \frac{7}{4} \dots$ Wellenlängen vom Boden der Röhre abstehen, begegnen sich einfallende und zurückgeworfene Wellen immer mit gleicher Schwingungsrichtung. An diesen Stellen, welche Bäuche genannt werden, findet also stets ein lebhaftes Hin- und Herschwingen der Luftschichten statt. Die an den Knoten gelegenen Luftschichten erfahren, indem die benachbarten Luftschichten entweder gleichzeitig gegen sie hin, oder gleichzeitig von ihnen weg schwingen, abwechselnd Verdichtung und Verdünnung, und zwar so, daß zwei benachbarte Knoten sich immer in entgegengesetzten Zuständen befinden. In den Bäuchen dagegen findet während des ganzen Verlaufes der Bewegung niemals Verdichtung und Verdünnung statt, wohl aber die lebhafteste Hin- und Herbewegung der Luftschichten. Dabei gehen alle schwingenden Teilchen gleichzeitig durch ihre Gleichgewichtslage, und erreichen gleichzeitig ihre weiteste Entfernung (Schwingungsweite) von derselben, die von den Bäuchen aus, wo sie am größten ist, gegen die benachbarten Knoten hin, wo sie Null ist, stetig abnimmt. Eine in solche stehende Wellenbewegung versetzte Luftmasse wird dadurch zu einem selbsttönenden Körper oder zu einer Schallquelle. Da das offene Ende der Röhre mit der äußeren Luft in Verbindung steht, so kann hier weder Verdichtung noch Verdünnung statthaben; es muß sich daselbst notwendig ein Bauch bilden. Soll daher die in einer Röhre enthaltene Luft durch einen schwingenden Körper zum Mitklingen gebracht,

d. h. in stehende Wellenbewegung versetzt werden, so muß ihre Länge $\frac{1}{4}$ oder $\frac{3}{4}$ oder $\frac{5}{4}$ usf. von der Wellenlänge des erregenden Tones betragen. Man kann sich in der Tat leicht überzeugen, daß durch die nämliche Stimmgabel auch eine 3 oder 5 mal so lange Luftsäule zum Erklängen gebracht wird, eine 2 oder 4 mal so lange aber nicht. Ein und dieselbe Röhre wird ansprechen auf diejenigen Töne, deren Viertelwelle einmal oder dreimal oder fünfmal usw. in ihrer Länge enthalten ist, deren Schwingungszahlen sich demnach verhalten wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 . . . ; die Luftsäule teilt sich dann, indem sie die entsprechenden Töne hören läßt, durch Knoten in so viele schwingende Abteilungen, wie in Fig. 268 angedeutet ist, wo die Pfeile die abwechselnden Schwingungsrichtungen in den Bäuchen angeben. Der

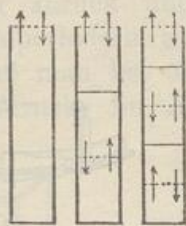


Fig. 268.

Schwingungsformen einer einseitig geschlossenen Röhre.

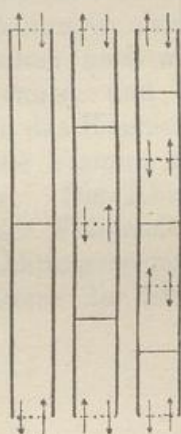


Fig. 269.

Schwingungsformen einer beiderseits offenen Röhre.

tiefste dieser Töne heißt der Grundton der Röhre, die folgenden die Obertöne.

Auch in einer beiderseits offenen Röhre kann die Luft in stehende Wellenbewegungen versetzt werden; denn auch am offenen Ende der Röhre findet eine Art Reflexion der durch das andere Ende eintretenden Welle statt, da die äußere Luft, deren Teilchen nach allen Seiten hin frei beweglich sind, als ein dünneres Mittel angesehen werden kann als die eingeschlossene Luft, deren Beweglichkeit auf die Längsrichtung der Röhre beschränkt ist. Da diese Reflexion am dünneren Mittel erfolgt, so sind hier die Schwingungen der einfallenden und der zurückgeworfenen Welle stets gleichgerichtet, und verstärken sich zu lebhafterer Bewegung. Es müssen daher an beiden offenen Enden der Röhre Bäuche entstehen, und die Länge der Röhre beträgt $\frac{1}{2}$ oder $\frac{2}{2}$ oder $\frac{3}{2}$ usf. von der Wellenlänge des anregenden Tones, und die Schwingungszahlen der Tonreihe, deren sie fähig ist, verhalten sich wie 1, 2, 3, 4, 5 . . .

Beim ersten dieser Töne, dem Grundton, schwingt die Luftsäule mit einem Knoten in der Mitte, und ihre Länge ist die halbe Wellenlänge dieses Tones. Für die Obertöne teilt sie sich durch 2, 3, 4 . . . Knoten so ab, wie in Fig. 269 angedeutet ist. Der Grundton einer offenen Röhre ist die Oktave des Grundtones einer gleichlangen geschlossenen; damit eine offene Röhre denselben Grundton gebe wie eine geschlossene, muß sie demnach doppelt so lang sein wie diese (Daniel Bernoulli, 1762).

Statt durch einen schwingenden Körper kann die stehende Wellenbewegung in einer Röhre auch durch Anblasen hervorgerufen

werden; eine hierzu eingerichtete Röhre heißt eine Pfeife (Lippenpfeife). Fig. 270 stellt den Durchschnitt einer offenen hölzernen Orgelpfeife dar; die in den Fuß eingeblasene Luft strömt aus dem Behälter *K*

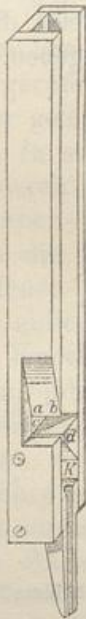


Fig. 270.
Orgelpfeife.



Fig. 271.
Pfeife mit manometrischen
Flammen.

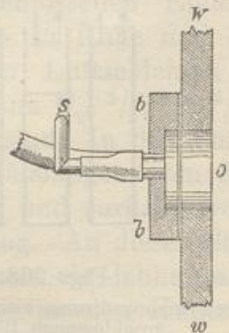


Fig. 272.
Manometrische Kapsel.

durch den Schlitz *cd* gegen die scharfkantige Lippe *ab* des Mundes *abcd*. Die hier entstehenden wirbelartigen Luftbewegungen erzeugen Störungen, die als Luftverdichtungen oder -verdünnungen sich durch das Röhreninnere hindurch fortpflanzen, am oberen Ende zum Teil zurückgeworfen werden und nach der Zeit, die zum Durchlaufen der doppelten Röhrenlänge erforderlich ist, die Lippe wieder erreichen. Hier beeinflussen sie die Bewegung des Luftstromes in dem Sinne, daß eine neue gleiche Störung entsteht, die wieder in demselben Tempo hin- und zurückläuft. So kommt binnen kurzem die Luft in der Röhre in die der Röhrenlänge entsprechenden regelmäßigen Schwingungen, die dadurch dauernd erhalten werden, daß der aus dem Schlitz tretende Luftstrom die Bewegungen der Luft im Pfeifenmunde mitmacht und dadurch an der Lippe abwechselnd nach innen und nach außen bläst. Wenn eine offene Pfeife ihren Grundton gibt, bildet sich ein Schwingungs-

knoten in ihrer Mitte. Das Vorhandensein dieses Knotens läßt sich sehr sinnreich mittels Rud. Königs manometrischer Flammen nachweisen. In eine Seitenwand einer offenen Pfeife (Fig. 271) sind drei Löcher gebohrt, eines in der Mitte, die beiden anderen je um ein Viertel der Pfeifenlänge von den Enden der Pfeife abstehend; auf diese Löcher sind drei „manometrische Kapseln“ *a*, *b*, *c* geschraubt, deren Einrichtung aus Fig. 272 ersichtlich ist. Das Loch *o* in der Pfeifenwand *ww* ist durch ein dünnes Kautschukhäutchen von dem Innenraum der Kapsel *bb* getrennt; in diesen aber wird durch das Kautschukröhrchen *d* aus dem Kästchen *ee* (Fig. 271) Leuchtgas geleitet, das nach *ee* durch den Kautschukschlauch *f* gelangt. Aus der Kapsel *bb* strömt das Leuchtgas durch das Röhrchen *s* aus und gibt angezündet eine kleine spitze Flamme. Gibt nun die Pfeife ihren Grundton, so bildet sich ein Knoten in ihrer Mitte, es finden hier abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen der Luft statt; bei jeder Verdichtung biegt sich das Häutchen nach außen, treibt das Leuchtgas aus der Kapsel in den Brenner, und die Flamme brennt hoch; bei jeder Verdünnung zieht sich das Kautschukhäutchen nach einwärts, das Leuchtgas folgt ihm, die Flamme zieht sich in den Brenner zurück und wird ganz klein. Die Abwechselungen zwischen Emporlodern und Zurücksinken des Flämmchens erfolgen so rasch, daß man bei unmittelbarer Beobachtung wegen der Dauer des Lichteindrucks im Auge nur ein Erzittern der Flamme wahr-

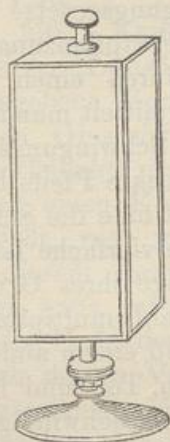


Fig. 273.

Rotierender Spiegel.

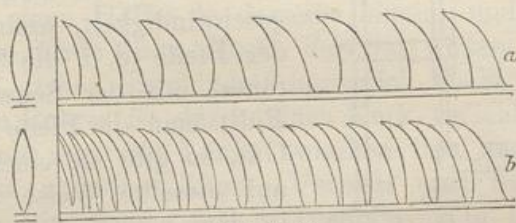


Fig. 274.

Flammenbilder im rotierenden Spiegel.

nimmt. Man bedient sich daher zur Beobachtung drehbarer Spiegel (Fig. 273); ein vierseitiger säulenförmiger Körper ist auf seinen Seitenflächen mit Spiegelplatten belegt und leicht und rasch um seine lotrechte Achse drehbar; ein ruhig brennendes Flämmchen erscheint in den rasch sich drehenden Spiegeln zu einem ununterbrochenen Lichtstreifen ausgedehnt; die beim Tönen der Pfeife abwechselnd emporschießende und niederduckende Flamme dagegen zeigt sich in einzelne durch dunkle Zwischenräume getrennte Flammenbilder

zerlegt (Fig. 274). Gibt die Pfeife ihren Grundton, so beweist die in ihrer Mitte angebrachte manometrische Flamme das Vorhandensein des Knotens, während die beiden anderen Flammen verhältnismäßig ruhig bleiben; bläst man aber stärker, so gibt die Pfeife die Oktave des Grundtones (den ersten Oberton), in ihrer Mitte befindet sich jetzt ein Bauch, während an den Stellen *b* und *c* (Fig. 271) Knoten auftreten; die mittlere Flamme brennt jetzt ziemlich ruhig, die beiden anderen aber zerlegen sich in Flammenbilder, welche bei der gleichen Drehungsgeschwindigkeit des Spiegels nur halb so weit voneinander absteigen wie die vorigen (Fig. 274b).

Eine beiderseits offene Röhre kann auch durch ein in ihrem Innern nahe ihrem unteren Ende brennendes Gasflämmchen (Fig. 275) zum Tönen gebracht werden (singende Flamme, Gasharmonika); dabei schwingt das Leuchtgas abwechselnd in den Brenner hinein und wieder heraus, die Flamme erlischt und entzündet sich wieder mit einer kleinen Verpuffung, und zwar in demjenigen Tempo, in welchem die stehenden Schwingungen der Luft in der Röhre erfolgen, nach denen die Flamme ihre Bewegungen zu regeln gezwungen ist; verlängert man die Röhre durch Hinaufziehen des Schiebers *s*, so wird der Ton tiefer. Eine Röhre, die dem Tönen nahe ist, erklingt, wenn man in einiger Entfernung ihren Ton angibt (gehorsame Flamme). Im Drehspiegel betrachtet, zeigt die singende Flamme ebenfalls eine Reihe getrennter Flammenbilder.

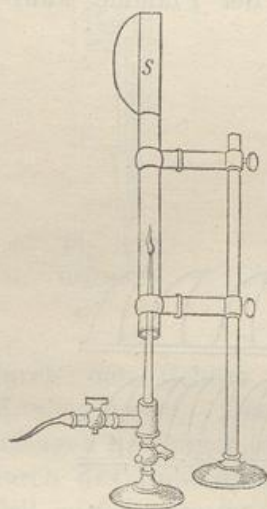


Fig. 275.
Singende Flamme.

Auf Grund der Schwingungsgesetze von Luftsäulen läßt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles durch einen einfachen Versuch bestimmen. Ermittelt man nämlich mit Hilfe der Sirene die Schwingungszahl des Grundtones, den eine gedeckte Pfeife beim Anblasen hören läßt, so erhält man die Schallgeschwindigkeit, wenn man die vierfache Länge der Pfeife (d. i. die Wellenlänge ihres Grundtones) mit der Schwingungszahl multipliziert. Füllt man die Pfeife mit irgend einem anderen Gas, so gibt sie einen anderen Ton und lehrt auf dieselbe Weise die Schallgeschwindigkeit in dem betreffenden Gas kennen. Man findet so bestätigt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Gasen sich nahezu umgekehrt verhalten wie die Quadratwurzeln aus deren spezifischen Gewichten. Auch die

Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten kann durch Pfeifen bestimmt werden, die mit der Flüssigkeit gefüllt und durch einen Flüssigkeitsstrahl angeblasen werden.

Nimmt man die Schallgeschwindigkeit in der Luft als bekannt an, so kann man umgekehrt die Schwingungszahl z. B. einer Stimmgabel finden, indem man die Länge der Luftsäule in einer Röhre

durch hineingegossenes Wasser oder einen verschiebbaren Stempel so lange abändert, bis sie durch die Gabel möglichst kräftig zum Mit-tönen gebracht wird. Die Schallgeschwindigkeit (340 m) dividiert durch die vierfache Länge der Luftsäule gibt die gesuchte Schwingungszahl.

297. **Longitudinalschwingungen von Stäben.** Auch Flüssigkeitssäulen und Stäbe aus festem Material können nach denselben Gesetzen wie Luftsäulen in stehende Längsschwingungen versetzt werden. Ein Metallstab z. B. wird in dieser Weise zum Tönen gebracht, wenn man ihn in seiner Mitte oder am Ende festhält und am anderen Ende mit beharzten Fingern der Länge nach streicht; im ersteren Falle verhält er sich wie eine offene, im letzteren wie eine gedeckte Pfeife, indem seine einzelnen Querschichten in der Richtung der Länge des Stabes hin und her schwingen und an der festgehaltenen Stelle abwechselnd Verdichtung und Verdünnung hervorgerufen. Man kann die lebhaften Längsschwingungen des Stabes an seinem freien Ende durch ein aufgehängtes Elfenbeinkügelchen nachweisen, das die Stirnfläche jenes Endes berührt; es wird fortgeschleudert, wenn man den Stab zum Tönen bringt. Auch kann man ganz in derselben Weise wie bei den Pfeifen aus der Schwingungszahl des Tones und der Länge des Stabes die Schallgeschwindigkeit in der Substanz, aus welcher der Stab besteht, berechnen. Es ergibt sich z. B., daß sich der Schall in Silber 9-, in Kupfer 12-, in Eisen $16\frac{2}{3}$ -, in Tannenholz 18-mal so schnell fortpflanzt als in der Luft.

298. **Kundtsche Röhren.** Die Knoten und Bäuche in einer tönenden Luftsäule werden durch das folgende von Kundt (1866) angegebene Verfahren sichtbar gemacht. In einem horizontal gelegten Glasrohr wird eine geringe Menge eines leichten Pulvers (Korkfeilicht) ausgebreitet. Eine engere Glasröhre, in ihrer Mitte durch einen Kork festgehalten, der das Rohr am einen Ende verschließt, ragt mit ihrer einen Hälfte in dasselbe hinein, und trägt an diesem ihrem inneren Ende einen Kork, der das weitere Rohr nicht ganz ausfüllt und daher ungehindert beweglich bleibt. Das andere Ende des weiteren Rohres ist durch einen Kork verschlossen, durch dessen Verschiebung man die Länge zwischen ihm und dem vorgenannten Kork etwas abändern kann. Versetzt man nun die Glasröhre durch Reiben mit einem nassen Tuchlappen in Längsschwingungen, so bilden sich in dem Rohre stehende Wellen, die dadurch sichtbar werden, daß sich das Pulver an den Bäuchen in feinen Querlinien, an den Knoten in runden Häufchen sammelt. Da die Entfernung zweier Knoten oder zweier Bäuche voneinander eine halbe Wellenlänge beträgt, so ergibt sich durch Division der Schallgeschwindigkeit in der Luft (340 m) durch die so ermittelte Wellenlänge sofort die Schwingungszahl der Glasröhre und daraus wie vorhin die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Glas, oder in anderen festen Körpern, wenn man die Glasröhre durch Stäbe aus anderen Materialien ersetzt. Aus der Schallgeschwindigkeit V und