

mufs die Höhe auf den Rauminhalt desselben ausüben? — 7. Wie würde sich eine mit Stickstoff gefüllte Seifenblase a. in einer Wasserstoff-, b. in einer Kohlensäure-Atm. verhalten? — 8. Was wird eintreten, wenn 2 Gefäße, von denen das eine mit Wasserstoff, das andere mit Kohlensäure gefüllt ist, längere Zeit offen stehen? (Kohlensäure in Kellern und Brunnenschächten; Dunsthöhlen.) — 9. Der Glasballon (Fig. 305) sei 100 ccm, die Metallkugel 1 ccm groß. Um wv. ist das Gew. des Ballons im luftleeren Recipienten gröfser als das der Metallkugel? — 10. Wv. Liter von den oben genannten Gasen haben mit 1 Liter atm. Luft gleiches Gew.? — 11. Gew. der Luft, welche ein Ballon von 500 ccm Rauminhalt am Boden verdrängt? (1 Liter Luft wiege 1,3 g.) — 12. Wie groß ist das Gew. des Ballons, wenn $\frac{1}{10}$ seines ganzen Rauminhaltes mit Leuchtgas gefüllt ist und die Hülle des Ballons 100 kg wiegt? Mit welcher Kr. wird ein solcher Ballon aufsteigen?

III. Abschnitt.

Die Lehre vom Schalle.

(A k u s t i k.)

(I. Lehrstufe, §§ 22—24.)

§ 89 a. Wellenbewegung flüssiger und fester (elastischer) Körper. Ein Schall entsteht, wenn durch Schwingungen eines elastischen Körpers in den umgebenden Luftschichten abwechselnd Verdünnungen und Verdichtungen erzeugt werden; indem sich diese auf die folgenden Luftschichten übertragen und so schliesslich auf unser Ohr einwirken, wird der Schall fortgepflanzt. *Die Schallfortpflanzung beruht somit auf einer Wellenbewegung der Luft, d. h. der Mitteilung einer schwingenden Bewegung von Teilchen zu Teilchen, wobei die in der Fortpflanzungsrichtung aufeinander folgenden Teilchen nacheinander dieselbe Schwingung machen.* Zum Verständnis dieses Vorganges ist zunächst ein genaueres Eingehen auf die Wellenbewegung flüssiger und elastischer (fester) Körper erforderlich.

a. Wasserwellen. Wirft man einen Stein auf eine ruhende Wasseroberfläche, so wird das Gleichgewicht der Wasserteilchen gestört; von dem Erschütterungsmittelpunkte ausgehend breiten sich kreisförmige Wellen aus, welche rasch fortschreiten und den Eindruck machen, als befände sich die ganze Wasseroberfläche in einer fließenden Bewegung. Ein leichter Körper indes, der auf dem Wasser schwimmt, wird von den Wellen, die unter ihm hinwegziehen, nur gehoben und gesenkt ohne wesentliche seitliche Fortbewegung; demnach ist auch die Wassermasse als Ganzes nicht in fortschreitender Bewegung, sondern es tritt nur eine abwechselnde Hebung und Senkung der einzelnen Wasserteilchen ein, welche dabei kleine Kreisbahnen beschreiben, also immer wieder an ihren Ausgangspunkt zurückkommen.

Zur Erläuterung dieses Vorganges betrachtet man die Bewegung einer Anzahl aufeinander folgender Wasserteilchen in der Richtung eines *Wellenstrahles*, d. h. einer Geraden, die vom Mittelpunkte der Welle nach der Peripherie derselben gezogen wird.

Fig. 308.

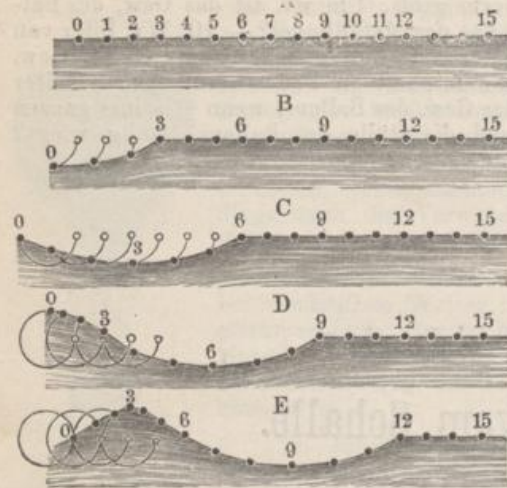
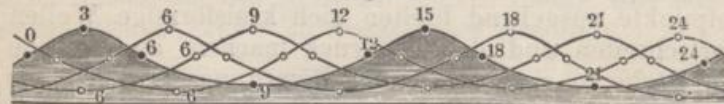


Fig. 308 A stellt die Wasseroberfläche im Ruhezustande mit den Wasserteilchen 0 bis 15 dar; B bis E erläutert die Lage derselben Teilchen in den aufeinander folgenden Bewegungszuständen bis zur Ausbildung einer vollständigen Welle. Die Abstände der Wasserteilchen sind so gewählt, daß jedes folgende seine Bewegung beginnt, wenn das vorhergehende $\frac{1}{2}$ seiner kreisförmigen Bahn zurückgelegt hat. Während nun A den vollkommenen Ruhezustand darstellt, haben bei B die Teilchen 0, 1 und 2 bereits $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ und $\frac{1}{4}$ ihrer Bahn durchlaufen; das Teilchen 3 ist noch in seiner Ruhelage. In C hat das Teilchen 0 die Hälfte seiner Bahn zurückgelegt, die folgenden bis zum 6. welches seine Bewegung soeben beginnt, je $\frac{1}{2}$ weniger, also $\frac{5}{2}$, $\frac{4}{2}$ u. s. w. In D hat das Teilchen 0 von seiner Bahn $\frac{3}{4}$ vollendet und ist auf dem höchsten Punkte derselben, dem Gipfel des *Wellenberges* angekommen, während 6 die tiefste Stelle des *Wellenthales* einnimmt und $\frac{1}{4}$ der Bahn zurückgelegt hat. In E endlich ist 0 wieder in seine Ruhelage zurückgekehrt, der Wellenberg ist bis 3 und das Wellenthal bis 9 fortgeschritten, während 12 seine Bewegung erst beginnt. Der Eindruck des Fortschreitens von Wellenberg und Wellenthal wird also dadurch hervorgebracht, daß jedes Wasserteilchen dem folgenden seine Bewegung mitteilt und demnach alle in der Richtung eines Wellenradius aufeinander folgenden Teilchen nach einander die gleiche Bewegung machen. Die Entfernung von einem Teilchen bis zum nächsten, welches sich im gleichen Schwingungszustande befindet, heißt eine *Wellenlänge*; in E stellt der Abstand von 0 bis 12 eine solche dar, welche einen Wellenberg (0 bis 6) und ein Wellenthal (6 bis 12) umfaßt. Hiernach ergibt sich zugleich das erste Gesetz der Wellenbewegung, daß nämlich die Bewegung um eine Wellenlänge fortschreitet, während ein einzelnes Teilchen einen ganzen Umlauf (eine Schwingung) vollendet hat.

Die Wellenlänge ist gleich dem während der Dauer einer vollständigen Schwingung zurückgelegten Wege.

Solange die Ursache der Wellenbewegung fort dauert, setzen auch die Wasserteilchen ihre Bewegung fort, sodafs Wellenberg und Wellenthal gleichmäßig sich verdrängen. Der schraffierte Teil von Fig. 309 stellt zwei vollständige Wellenlängen dar, bei 3 und 15 liegen die Berge, bei 9 und 21 die Täler. Nach weiterem Umlauf von je $\frac{1}{4}$ der Schwingungsdauer sind Berge und Täler entsprechend fortgerückt, sodafs die Welle nacheinander die durch die Kurven angedeutete Lage erhält. Erfolgen nun in 1 Sekunde n Schwingungen, so entstehen auch n Wellen in derselben Zeit, und der von der Wellenbewegung zurückgelegte Weg wird, wenn λ die Wellenlänge bezeichnet, durch das Produkt $n \cdot \lambda$ ausgedrückt. Der in 1 Sekunde zurückgelegte Weg entspricht aber der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, sodafs sich als das zweite Gesetz der Wellenbewegung ergibt:

Fig. 309.



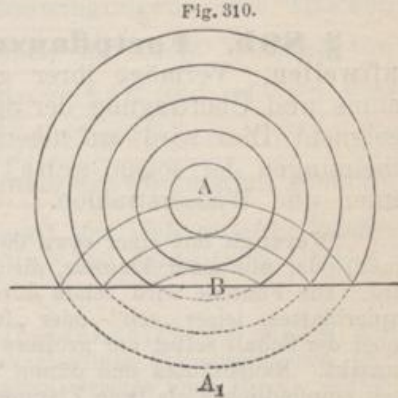
dar, bei 3 und 15 liegen die Berge, bei 9 und 21 die Täler. Nach weiterem Umlauf von je $\frac{1}{4}$ der Schwingungsdauer sind Berge und Täler entsprechend fortgerückt, sodafs die Welle nacheinander die durch die Kurven angedeutete Lage erhält. Erfolgen nun in 1 Sekunde n Schwingungen, so entstehen auch n Wellen in derselben Zeit, und der von der Wellenbewegung zurückgelegte Weg wird, wenn λ die Wellenlänge bezeichnet, durch das Produkt $n \cdot \lambda$ ausgedrückt. Der in 1 Sekunde zurückgelegte Weg entspricht aber der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, sodafs sich als das zweite Gesetz der Wellenbewegung ergibt:

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist gleich dem Produkt aus Schwingungszahl und Wellenlänge.

In Zeichen: $c = n \cdot \lambda$

Zurückwerfung der Wellen. Die von A, Fig. 310, ausgehenden Wellen würden sich, wenn die Wand B nicht vorhanden wäre, als vollständige Kreise weiter fortsetzen. Dies wird durch die Wand dadurch verhindert, daß sie die Wellen zurückwirft. Die Zurückwerfung erfolgt nach einem bestimmten Gesetze:

Werden kreisförmige Wellen von einer geraden, festen Wand zurückgeworfen, so scheinen sie von einem Punkte her zu kommen, welcher ebensoweit hinter der Wand liegt, als ihr wirklicher Ausgangspunkt vor derselben.



Interferenz. Werden auf einer Wasserfläche gleichzeitig zwei Wellenzüge erregt, so durchkreuzen sich (interferieren) die Wellen, ohne sich jedoch in ihrer Fortbewegung weiter zu stören. Überall, wo zwei Wellenberge zusammenreffen, entsteht eine größere Erhebung, wie umgekehrt da eine tiefere Senkung eintritt, wo zwei Wellenthäler zusammenfallen. Wo Berg und Thal sich kreuzen, gleichen sich beide mehr oder weniger aus. *Diese Erscheinungen, welche durch das Zusammenwirken zweier Wellenbewegungen eintreten, werden Interferenzen genannt.*

b. Seilwellen. Wird gegen ein schlaff gespanntes Seil, einen Kautschukschlauch oder eine elastische Spirale von Messingdraht nahe dem einen Ende ein Schlag geführt, so entstehen Ausbiegungen, welche sich längs des Seiles fortpflanzen und zwar in der Weise, daß auf die erste Ausbiegung eine zweite in entgegengesetzter Richtung folgt, dann eine dritte, mit der ersten gleichgerichtete u. s. w. Man kann diese Ausbuchtungen als Wellenberge und Wellenthäler ansehen; zwei aufeinander folgende bilden dann eine Welle. Vergleichen wir diese Wellen mit den Wasserwellen, so finden wir den Unterschied beider darin, daß die Wasserteilchen sich in Kreisen bewegen, während die Seilteilchen in geraden Linien senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle schwingen. Da jedoch auch bei Wasserwellen die kreisförmige Bahn in eine schmal elliptische übergehen kann, so ist der Zusammenhang zwischen beiden Bewegungsformen leicht zu erkennen.

Die bei den Seilwellen auftretenden Schwingungen werden als Quer- oder Transversalschwingungen bezeichnet.)*

Auch in festen Körpern findet eine Zurückwerfung der Wellen statt. Die Seilwelle z. B. wird reflektiert, sobald sie an dem Ende des Seiles angekommen ist und kann so die ganze Länge desselben mehrmals durchlaufen.

*) Auch die Ätherwellen, welche das Licht fortpflanzen, sind Transversalwellen (vgl. § 146).

Bem. Die Vorgänge bei allen anderen Wellenbewegungen sind ähnlicher Art, wie die an dem anschaulichen Beispiel der Wasserwellen und Seilwellen entwickelten. Ein sehr anschauliches Bild einer Wellenbewegung bietet auch ein wogendes Ährenfeld. Indem die einzelnen Ähren, vom Winde bewegt, sich senken und wieder heben, vollführen sie regelmäßige Schwingungen, welche mit dem Windstofs über das Feld hingleiten und die dunklen und hellen Streifen (Wellenberge und Wellenthäler) veranlassen.

§ 89b. Fortpflanzung des Schalles in der Luft.
Luftwellen. Vermöge ihrer grossen Elasticität ist die Luft zur Aufnahme und Übertragung der Schwingungen schallerregender Körper sehr geeignet. Dies wird auf überraschende Weise bestätigt durch die Erscheinungen der sogen. schallempfindlichen Flammen, Rauchsäulen und Wasserstrahlen.

*Versuch mit einer etwa 60 cm hohen, flackernden Flamme (bei hohem Gasdruck) oder mit einer Flamme, die über einem Drahtnetz (nach Fig. 116) entzündet wird. Die Flamme wird schon durch einen sehr schwachen Schall (Knistern eines Papierblattes, leiser „sch“- oder „fs“-Laut) zum Zucken oder Erlöschen gebracht, wobei der Schall selbst auf gröfsere Entfernungen hin augenblicklich auf die Flamme einwirkt. Rauchsäulen und dünne Wasserstrahlen sind unter günstigen Umständen noch empfindlicher als freie Flammen.

Wie das Fortschreiten einer Welle auf der Wasseroberfläche von dem Fortfliessen des Wassers verschieden ist, so beruht auch die Schallfortpflanzung in der Luft nicht auf einer Fortbewegung der Luft.

Bestätigung durch *Versuche mit dem Luftstofsapparat, einem cylindrischen Blechgefäfs, welches auf einer Seite durch eine elastische Haut (Pergamentpapier), auf der anderen Seite durch einen mit einem Loch versehenen Blechdeckel geschlossen ist. Füllt man das Gefäfs mit Rauch und schlägt gegen das Trommelfell, so treten Rauchringe aus der Öffnung im Deckel, welche sich merklich langsamer fortbewegen als der Schall. Die Einwirkung der Rauchringe auf eine in einigen Metern Entfernung befindliche Kerzenflamme zeigt den Stofs der fortbewegten Luft an.

Zur Veranschaulichung des bei der Schallfortpflanzung durch die Luft stattfindenden Vorganges kann Fig. 311 dienen. Man denke sich die einzelnen Luftteilchen als elastische Kugeln, welche sich durch Druck zusammenpressen lassen.



Wenn eine elastische Kugel gegen eine Reihe von elastischen Kugeln stösst (Glaskugeln in einer wagerechten Rinne), so bleiben die mittleren in Ruhe, und nur die letzte rollt fort. Wie die elastischen Kugeln, so werden auch die Luftteilchen durch den Stofs zusammengedrückt und dehnen sich wieder aus, wobei sie den Druck auf die benachbarten übertragen.

Indem der vom Schallerreger auf die Luftteilchen ausgeübte Stofs sich auf die nächstfolgende Luftschicht fortpflanzt, entsteht eine Luftverdichtung (x in der Reihe a₁). Während nun die Teilchen der verdichteten Luftschicht ihre vorwärts gerichtete Bewegung auf die folgenden Teilchen übertragen, beginnen die zuerst gestossenen ihre Rückbewegung, wodurch eine Luftverdünnung (y in der Reihe a₂) entsteht. — Erfolgte nun kein zweiter Stofs, so würden die Teilchen der ersten Luftschicht nacheinander ihre ursprüngliche Lage wieder einnehmen und in Ruhe bleiben, während die Bewegung selbst von einer Luftschicht zur anderen fort-

schreiten würde. In allen Luftschichten würde nacheinander wie in der ersten Schicht Verdichtung und Verdünnung abwechseln (w in den Reihen a_2 , a_4 und a_6) und dann Ruhe eintreten. Erfolgen jedoch neue Stöße, so entstehen auch von neuem ebenso viele Luftverdichtungen und Luftverdünnungen, welche unmittelbar hinter den zuerst entstandenen hergehen, wenn die Stöße unmittelbar aufeinander folgen (v in den Reihen a_4 und a_6).

Die Luft pflanzt den Schall durch Schwingungen ihrer Teilchen fort. Die schwingenden Bewegungen bestehen in einem Wechsel von Luftverdichtungen und Luftverdünnungen und erfolgen vom Schallerreger aus in der Richtung der Schallstrahlen. Sie werden daher Längsschwingungen (longitudinale Schwingungen) genannt.

Eine einzelne verdichtete Luftschicht mit der sich anschließenden verdünnten Luftschicht bildet eine Schallwelle. Die Dicke beider Schichten zusammen ergibt die Wellenlänge.

Da die Luftwellen wie die Wasserwellen fortschreitende Wellen sind (die Bewegung schreitet während der Dauer einer einzelnen Schwingung um eine Wellenlänge fort), so gelten die in § 89 a entwickelten Gesetze auch für die Schallfortpflanzung in der Luft. Dagegen ist die Art der Bewegung der einzelnen Teilchen bei den Wasserwellen und bei den Schallwellen eine verschiedene, denn während die Wasserteilchen Kreise beschreiben, gehen die Luftteilchen geradlinig hin und her und zwar in der Fortpflanzungsrichtung, wodurch sich die Luftwellen auch wieder von den Seilwellen unterscheiden. Die Wasserwelle vereinigt gewissermaßen die Schwingungszustände der Seilwelle und die der Luftwelle.

Könnte man die Luft sichtbar machen, so würden die verdichteten und verdünnten Luftschichten als schnell sich vergrößernde Hohlkugeln erscheinen, deren Mittelpunkt der Schallerreger ist. In

Fig. 312.



einer durch den Schallerreger gelegten Ebene würden die Luftschichten konzentrische Ringe bilden (Fig. 312). Je schneller der Schallerreger schwingt, um so mehr Ringe würden in derselben Zeit entstehen, um so schmaler würde daher jeder einzelne Ring sein müssen. Erfolgt in 1 Sek. etwa 340 Hin- und Herbewegungen, so würde jeder aus einer verdichteten und verdünnten Luftschicht bestehende Ring 1 m breit sein.

Übungsstoff. 1. Vgl. die Bewegung der den Schall fortpflanzenden Luft mit derjenigen des Schallerregers. — 2. Die Wellenbewegung des W. beruht auf der Schwere; auf welcher Eigenschaft der Luft beruht die Fortpflanzung des Schalles? — 3. Wv. Schallwellen entstehen in 5 Sek. durch eine tönende Stimmgabel, wenn diese in 1 Sek. 440 Schwingungen macht, und wie lang ist eine solche Welle? — 4. Vgl. die Schallwellen mit den Wasserwellen. — 5. Ein auf einer Wasserwelle schaukelnder K. wird vom Wellenberge eine kleine Strecke nach vorwärts, vom Wellenthale ebensoviel nach rückwärts bewegt. Welcher Schlufs läßt sich daraus ziehen hinsichtlich der Form der Bewegung? — 6. Vgl. die Schwingungsrichtung der Luftteilchen mit der Richtung, in welcher Luftwellen fortschreiten, indem sie den Schall fortpflanzen, und beide mit den entsprechenden Bewegungsrichtungen von Wasserwellen.

§ 90. Geschwindigkeit und Stärke des Schalles.

1. Geschwindigkeit des Schalles. Die Geschwindigkeit des Schalles in der atm. Luft ist durch zahlreiche Versuche möglichst genau bestimmt worden (§ 23), z. B. von Humboldt und Arago 1822 in der Nähe von Paris. — Zur Messung der Geschwindigkeit des Schalles im Wasser wurden 1827 am Genfer See Versuche angestellt; es wurde eine Glocke unter Wasser angeschlagen und an einem weit entfernten Punkte mittelst eines in den See getauchten langen Hörrohres beobachtet, wann der Schall ankam. Dabei ergab sich, daß das Wasser den Schall mit einer Geschwindigkeit von 1435 m fortpflanzt. — Um die Geschwindigkeit des Schalles im Eisen zu bestimmen, wurde an dem einen Ende einer gegen 1000 m langen eisernen Wasserleitungsröhre ein Schufs abgefeuert. Der Knall wurde dabei am anderen Ende zweimal gehört, und zwar ging dem durch die Luft in der Röhre fortgepflanzten Schalle der im Eisen fortgeleitete vorher, welcher denselben Weg in $\frac{1}{15}$ der Zeit zurückgelegt hatte.

Die Geschwindigkeit des Schalles in verschiedenen Gasen und festen Körpern hat man auf indirektem Wege (durch Rechnung) bestimmt, da wegen der erforderlichen Länge des Schallweges eine direkte Bestimmung bei diesen Stoffen ausgeschlossen ist. In welcher Weise die Rechnung auszuführen ist, ergibt sich aus den Gesetzen über tönende Luftsäulen und schwingende Stäbe (§ 94).

Im Eisen ist die Geschwindigkeit des Schalles ungefähr 15 mal, in Kupfer und Zink 11-, in Platin und Silber 8-, in Gold 6-, in Blei 4-, in Hölzern 10—18 mal, in Glas 17-, in Wasser $4\frac{1}{2}$ mal so groß als in der Luft. In der Luft pflanzt sich der Schall in 1 Sek. bei 0° 332 mal, bei höheren Temperaturen ungefähr $\frac{1}{2}$ m für 1° C Temperaturzunahme schneller fort und zwar unabhängig vom Barometerstande, bei gleicher Temperatur also auf hohen Bergen ebenso schnell, als in Meereshöhe.

Daß sich verschiedene Schalle in der Luft mit der gleichen Geschwindigkeit fortpflanzen, geht schon daraus hervor, daß ein Musikstück aus einiger Entfernung ohne Störung der Harmonie gehört wird. *Starke und schwache Schalle, hohe und tiefe Töne haben im allgemeinen dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit.*

2. Stärke des Schalles. Ein Schall muß um so stärker gehört werden, je kräftiger die schwingende Luft auf unser Ohr einwirkt. Dies ist sowohl von der Wucht, mit welcher der Schallerreger die Luft erschüttert, als auch von der Dichtigkeit der Luft abhängig. Denn je größer die Masse des Schallerregers ist und je kräftiger die Ausschläge desselben sind, desto größer ist auch die Luftmasse, auf welche der Schallerreger unmittelbar einwirkt, und die Kraft, mit der sich die Schwingungen in der Luft fortpflanzen. Der Ton einer Turmglocke z. B. ist weit kräftiger als der einer ebenso tief klingenden Basssaite; bei beiden ist der Ton anfangs am stärksten und wird bis zum gänzlichen Verklängen allmählich schwächer. Glocke wie Saite klingen um so stärker, je kräftiger der Schlag ist, welcher auf sie ausgeübt wird. Mit der Dichtigkeit der Luft aber wächst die Zahl der schwingenden Luftteilchen. In einer tief im Wasser hinabgelassenen Taucherglocke klingt jeder Schall verstärkt, in den höheren Luftschichten (Luftballon) geschwächt.



Fig. 313.

Versuch. Verdünnt man in einem Glasballon (Fig. 313) die Luft möglichst stark, so ist der Ton einer kleinen Glocke

im Ballon kaum noch hörbar; beim Eindringen von Luft wird derselbe wieder deutlicher.

Der Schall ist in der Luft um so stärker, 1) je größer die Masse und je schneller die schwingende Bewegung des Schallerregers, 2) je dichter die Luft ist, welche den Schall fortpflanzt. — Im luftleeren Raume kann der Schall sich nicht fortpflanzen.

In lockeren Körpern werden die Schallwellen mehr oder weniger geschwächt. Solche Körper pflanzen daher den Schall schlecht fort (§ 23). Dies erklärt sich daraus, daß bei jedem Übergange der Schallbewegung aus einem Mittel in ein solches von anderer Dichtigkeit zugleich eine Reflexion eintritt. Je öfter sich dies wiederholt, desto schwächer muß offenbar der Schall werden. — In der Luft pflanzt sich der Schall am stärksten fort, wenn die einzelnen Schichten derselben gleichmäßige Beschaffenheit haben; ungleiche Erwärmung verschiedener Luftschichten, wie sie am Tage durch die Sonnenstrahlen bewirkt wird, hat eine Schwächung des Schalles zur Folge, der sich daher im allgemeinen in der Nacht besser fortpflanzt, als am Tage.

Der Einfluß der Entfernung auf die Stärke des Schalles erklärt sich daraus, daß die Zahl der gleichzeitig zum Schwingen angeregten Teilchen in demselben Verhältnis wächst, in welchem die Oberflächen der Schallwellen an Größe zunehmen. Da nun die fortschreitenden Schallwellen immer größer werdende Hohlkugeln bilden, deren Halbmesser der Entfernung von der Schallquelle entsprechen, so kann der Schall z. B. in der doppelten Entfernung von der Schallquelle nur noch $\frac{1}{4}$, in der 3fachen nur $\frac{1}{9}$, in der 4fachen nur $\frac{1}{16}$ so stark sein als in der einfachen Entfernung.

In der freien Luft nimmt die Stärke des Schalles ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt.

Um bei der Fortpflanzung des Schalles in der Luft eine derartige Abschwächung zu verhüten, hindert man die Schallwellen, sich gleichmäßig auszubreiten, indem man sie durch Röhren leitet (Schall- und Hörrohr, § 24).

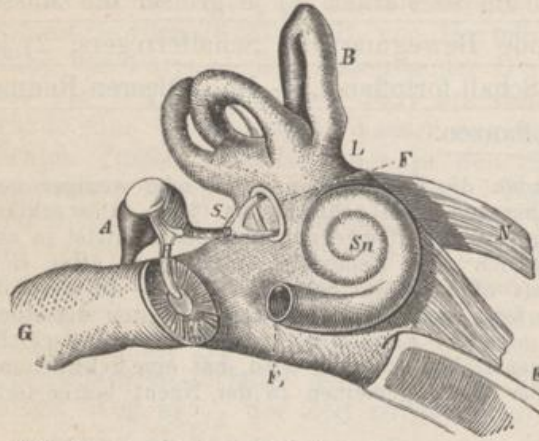
Übungsstoff. 1. Auf das eine Ende einer Gasleitungsröhre von 1000 m Länge werde ein kräftiger Schlag ausgeübt; a. wievielmals wird man den Schlag am anderen Ende hören, b. wv. Zeit wird zwischen beiden Schallen verstreichen? — 2. In Stubenuhren werden statt der Glocken vielfach gewundene Streifen von Stahl angewandt, deren Ton sehr tief ist. Wie verhält sich bei gleicher Tiefe die Stärke eines solchen Tones zu dem Tone einer Glocke? — 3. Wie läßt sich mit einer Stimmgabel nachweisen, daß die Schwingungsweite einen wesentlichen Einfluß auf die Stärke des Schalles ausübt? — 4. Pistolenschüsse knallen auf hohen Bergen nicht so laut, als auf dem Meere; w.? — 5. Ein vom Fusse eines Berges ausgehender Schall klingt auf dem Gipfel des Berges stärker, als ein Schall, welcher oben entsteht und unten gehört wird. Wie mag sich dies erklären? — 6. Welche Stoffe eignen sich zur Füllung der Doppelwände von Fernsprechkzellen? (§ 23.) — 7. Durch lange Wasserleitungsröhren kann man, wenn sie leer sind, sich flüsternd unterhalten. Erkläre dies. — 8. In Sälen klingen die Worte des Redners über geheizte Öfen hinweg leicht unverständlich. Erkl.! — 9. In den Äquatorgegenden steigt die Luft infolge der starken Erwärmung am Tage senkrecht auf; nachts findet diese Luftströmung nicht statt. Welchen Einfluß muß dies auf die Deutlichkeit der Schallfortpflanzung am Tage und in der Nacht ausüben?

§ 91. Das Gehörorgan des Menschen. Phonograph.

Das menschliche Ohr (Fig. 314) besteht aus drei Hauptteilen: dem *äußeren Ohre*,

Fig. 314.

der *Paukenhöhle* und dem *Labyrinth*.*)



Das *äußere Ohr* wird durch die *Ohrmuschel* (links von G, in der Figur nicht mit angegeben) und den *Gehörgang* (G) gebildet; es dient zum Auffangen des Schalles. Der Gehörgang ist an seinem inneren Ende durch eine dünne elastische Haut (T), das *Trommelfell*, gegen den mittleren Teil des Ohres, die *Paukenhöhle*, abgeschlossen.

Von der *Paukenhöhle* führt ein Kanal (E), die sogen. *Eustachische Röhre*, in die *Schlundhöhle*, sodafs die in dieser enthaltene Luft ebenso wie die des *äußeren Gehörganges* mit der atm. Luft in Verbindung

steht. In der *Paukenhöhle* befindet sich ein kleiner Hebelapparat, welcher aus vier beweglich miteinander verbundenen Knöchelchen besteht, die ihrer Gestalt wegen als *Hammer* (H), *Ambos* (A), *Linsenkörperchen* und *Steigbügel* (S) bezeichnet werden. Der Hammer ist mit seinem Stiele dem *Trommelfelle* angewachsen und ruht mit seinem verdickten Ende auf dem *Ambos*; dieser ist durch das *Linsenkörperchen* mit dem *Steigbügel* verbunden, welcher wiederum einer zarten Haut, die das sogen. *ovale Fenster* (F) verschließt, dicht aufliegt. Letzteres ist eine Öffnung in der Wand des *Labyrinthes*, der dritten Höhlung des Ohres. Neben dieser Öffnung befindet sich eine zweite, die ebenfalls durch eine zarte Haut überspannt ist, das *runde Fenster* (F₁).

Das *Labyrinth* enthält sehr verschieden gestaltete Hohlräume, welche mit einer wässrigen Flüssigkeit angefüllt sind und *Vorhof* (Raum zwischen S und L der Figur), *Schnecke* (Sn) und *halbkreisförmige Kanäle* (B) genannt werden. Der *Vorhof* ist der mittlere dieser drei Teile; in seiner Wand befindet sich das *ovale Fenster*, während das *runde Fenster* den Eingang in die *Schnecke* bildet. Diese selbst ist ein gewundener Gang und wird ihrer ganzen Länge nach von einer *Scheidewand* durchzogen, auf der *äußerst feine Nervenfasern* zu mehreren Tausenden wie *Klaviersaiten* nebeneinander ausgespannt liegen. Diese sogen. *Cortischen Fasern* werden als die *eigentlichen Organe zur Aufnahme der Schallreize* angesehen.

Die *Übertragung des Schalles* auf die *Fasern der Gehörnerven* findet in folgender Weise statt:

Die *Luftwellen*, welche durch die *Schwingungen tönender Körper* hervorgerufen werden, dringen in den *äußeren Gehörgang* ein und stoßen auf das *Trommelfell*. Dieses nimmt die *Schwingungen* auf und überträgt sie durch den *Hammer* auf die *Kette der Gehörknöchelchen* und teilweise auch auf die *Luft* in der *Paukenhöhle*, welche ihrerseits wieder auf die *Haut des runden Fensters* einwirkt. Da der *Steigbügel* an der *Haut des ovalen Fensters* befestigt ist, so muß jede *Schwingung* desselben sich dem *Labyrinthwasser* im *Vorhof* mitteilen, indem jeder *Stoß* des ovalen Fensters nach innen durch einen entsprechenden *Stoß* des runden Fensters nach außen sich ausgleicht. Die auf diese Weise übertragenen *Schwingungen* pflanzen sich im *Labyrinthwasser* bis in die *Bogengänge* und in die *Schnecke* fort und wirken als *Reize* auf die *Ausbreitungen der Gehörnerven*, wodurch die *Schallempfindungen* zustande kommen.

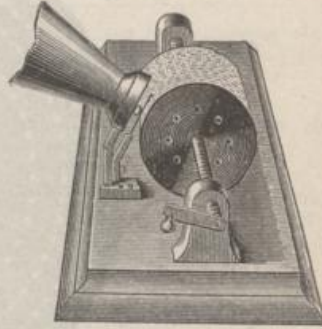
Grenzen der Gehörsempfindung. Die *Fähigkeit des menschlichen Ohres*, *Schwingungen als Schall* zu empfinden, liegt innerhalb

*) In Fig. 314 sind die Teile der *Paukenhöhle* und des *Labyrinthes* der Deutlichkeit wegen unverhältnismäßig groß dargestellt.

gewisser Grenzen, welche bei verschiedenen Menschen nicht übereinstimmen. Man hat gefunden, daß im allgemeinen kein Ton mehr hörbar ist, wenn die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde weniger als 16 oder mehr als 40 000 beträgt. Die Schwingungszahlen der musikalisch gut brauchbaren Töne liegen zwischen 40 und 4000.

Der Phonograph¹⁾ oder Lautschreiber (Fig. 315) ist eine Vorrichtung, welche die Laute der menschlichen Stimme und die Töne musikalischer Instrumente so aufzeichnet, daß sie annähernd genau wieder hervorgerufen werden können. Ein trichterförmiger Schallbecher ist an einem Ende durch eine Membran verschlossen und mit diesem Ende quer gegen eine drehbare Walze gerichtet. Die Walze ist mit einer wachsartigen Masse überzogen, in welche durch einen kleinen Stift, der alle Schwingungen der Membran mitmacht, sehr feine Eindrücke gezeichnet werden. Sobald Schallschwingungen aufgenommen werden sollen, wird die Walze gleichförmig gedreht, wobei sie sich zugleich in der Richtung ihrer Achse vor dem Stifte verschiebt. Bringt man dann die Walze in die anfängliche Stellung und läßt sie in gleicher Weise wie zuvor vor der Membran des Schallbeckers umlaufen, so wird der Stift, indem er über die vorher gemachten Eindrücke hinweggleitet, auch wieder in dieselben Schwingungen versetzt, welche er nun der Membran mitteilt. Durch die Membran wird die Luft zu Schwingungen veranlaßt und so werden die ursprünglichen Laute wieder erzeugt.

Fig. 315.



Der Phonograph wurde 1878 von Edison erfunden. Ursprünglich diente ein um eine Walze gewickeltes Stanniolblatt zur Aufnahme der Schallschwingungen; die Walze wurde mit der Hand gedreht. Bei dem vervollkommenen Apparate wird des gleichmäßigeren Ganges wegen zum Drehen der Walze ein elektrischer Motor angewandt.

Übungstoff. 1. Inwiefern ist die Elasticität der betreffenden Teile des Ohres für die Übertragung des Schalles wichtig? — 2. Aggregatzustände der in den Höhlungen des Ohres mitwirkenden Teile? (Reihenfolge!) — 3. Das Trommelfell ist schräg gegen den Gehörgang gerichtet. Bei dieser Stellung kann eine größere Anzahl von der Wand des Gehörganges reflektierter Schallstrahlen rechtwinklig gegen das Trommelfell treffen. Inwiefern ist dies vorteilhaft? — 4. Der Stiel des Hammers ist genau in der Mitte des Trommelfelles angewachsen. Mech. V.? — 5. Welche Einrichtung bewirkt, daß die Paukenhöhle stets mit Luft von der Spannung der äußeren Luft gefüllt ist? — 6. Welchen Zweck hat es, wenn Kanoniere beim Abfeuern der Geschütze den Mund öffnen? — 7. Wenn das runde Fenster des Labyrinthes nicht vorhanden wäre, so würde eine Bewegung der darin enthaltenen Flüssigkeit nicht erfolgen können. Wie läßt sich dies aus einer Eigenschaft der Flgkn. schliessen? — 8. Suche zu erklären, warum das Zerreißen des Trommelfelles noch nicht völlige Taubheit zur Folge hat. — 9. Vergl. die Vorgänge beim Hören mit der Wirkungsweise des Phonographen.

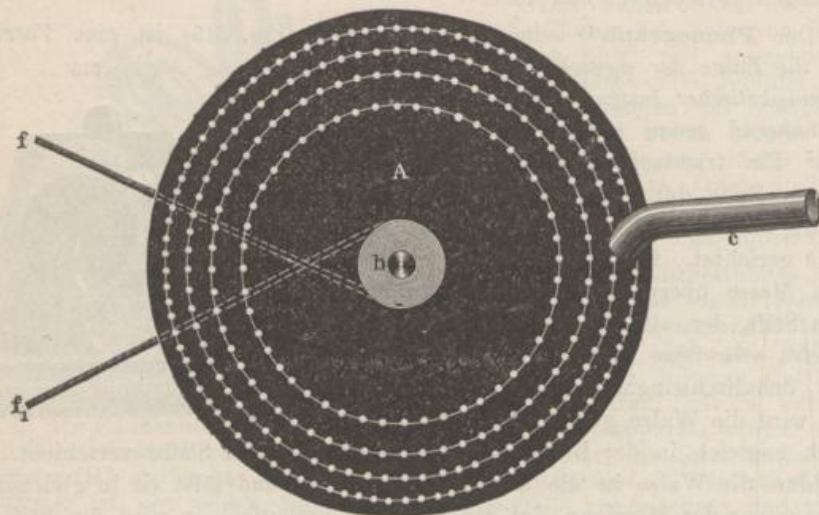
Von den Tönen und den wichtigsten Tonerregern.

§ 92. **Töne und Intervalle.** Um die Schwingungszahlen der Töne zu bestimmen, bedient man sich der sogen. Sirene, einer kreis-

¹⁾ φῶνος (phōnos), Schall; γράφειν (graphein), schreiben.

runden Scheibe (Fig. 316), welche in mehreren konzentrischen Reihen eine Anzahl gleichweit voneinander entfernter Löcher (z. B. 48, 60, 72 und

Fig. 316.

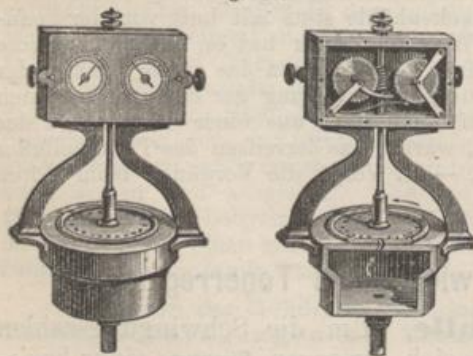


96 oder 48, 54, 60, 64, 72, 80, 90 und 96) enthält und um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse schnell gedreht werden kann.

Versuch. Während der Umdrehung wird gegen eine der Löcherreihen ein Luftstrom gerichtet. Dadurch entsteht ein Ton. Wird die Sirene mit wachsender Geschwindigkeit gedreht, so nimmt die Höhe des beim Anblasen einer Reihe entstehenden Tones zu. Bläst man alle Reihen von innen nach außen bei unveränderter Geschwindigkeit der Drehung an, so entstehen bestimmte Tonfolgen. Sämtliche Töne sind um so stärker, je kräftiger man bläst.

Erklärung: Dadurch, daß der Luftstrom mit kurzen Unterbrechungen durch die Löcher der Scheibe hindurchgeht, erhält die Luft unter der Scheibe rasch aufeinander folgende Stöße, sodaß sie in Schwingungen gerät. Dreht sich nun die Scheibe mit unveränderter Geschwindigkeit, so müssen diese Luftstöße in gleichen Unterbrechungen, also regelmäßig aufeinander folgen.

Fig. 317.



Je kräftiger der Luftstrom ist, desto stärker werden die Luftteilchen fortgestoßen, um so größer ist demnach ihre Schwingungswerte und um so stärker der Ton.

Zur genauen Bestimmung der Schwingungszahlen sind mit Zählwerk versehene Sirenen ganz besonders geeignet (Fig. 317). Die schieflöchernte Scheibe derselben wird durch den in einer Windlade erzeugten Luftstrom in Umdrehung versetzt und die Zahl der Umdrehungen auf einem Zifferblatte angezeigt. — Statt der Lochsirenen lassen sich

(für hohe Töne) auch Zahnradsirenen anwenden, deren Zähne man gegen den Rand eines elastischen Kartenblattes schlagen läßt.

Da sich nachweisen läßt, daß die Höhe der Töne von der Natur und sonstigen Beschaffenheit der Schallerreger völlig unabhängig und nur durch die Anzahl der in einer Zeiteinheit entstehenden Schwingungen bedingt ist, so gilt der Satz:

Die Töne entstehen durch regelmäßige Schwingungen. Die Höhe eines Tones nimmt mit der Anzahl der Schwingungen zu.

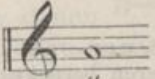
Bem. Während man bei der Pendelbewegung (§ 77) unter Schwingung stets eine einfache Schwingung versteht, pflegt man beim Schall eine Doppelschwingung (Hin- und Hergang) als Schwingung zu bezeichnen.

Das Verhältnis der Schwingungszahlen zweier Töne heißt in der Musik Intervall, der tiefere der beiden Töne Grundton.

Ordnet man die Töne nach den Schwingungszahlen, indem man dem Grundton die Schwingungszahl n giebt, so erhält man die diatonische Tonleiter. Dividiert man die zugehörigen Verhältniszahlen durcheinander, so ergeben sich die Intervalle von je zwei aufeinander folgenden Tönen.

Prime	Sekunde	Terz	Quarte	Quinte	Sexte	Septime	Oktave
c	d	e	f	g	a	h	c'
n	$\frac{9}{8}n$	$\frac{4}{3}n$	$\frac{4}{3}n$	$\frac{3}{2}n$	$\frac{5}{3}n$	$\frac{7}{4}n$	$2n$
$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{15}{13}$	$\frac{8}{7}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{8}{7}$	$\frac{16}{15}$	

Die Zusammenstellung zeigt, daß in der diatonischen Tonleiter nur drei Arten von Intervallen vorkommen; die Intervalle $\frac{9}{8}$ und $\frac{10}{9}$ heißen ganze Töne (großer und kleiner Ganzton), das Intervall $\frac{4}{3}$ wird halber Ton genannt. Die Töne haben in allen Oktaven dieselben Namen, deshalb werden die Oktaven durch einen Zusatz unterschieden; mit der tiefsten beginnend ist die Bezeichnung folgende: Subkontra- und Kontra-Oktave, große, kleine, eingestrichene, zweigestrichene Oktave u. s. w.

Für das eingestrichene  (= a oder a') der Stimmgabel beträgt

die Schwingungszahl nach der Pariser Stimmung 435. Dieser Ton (sogen. Kammerton) wird jetzt allgemein beim Stimmen musikalischer Instrumente zu Grunde gelegt und durch genaue Stimmgabeln bestimmt. Für physikalische Rechnungen werden die Schwingungszahlen häufig abgerundet.

Ist für einen beliebigen Ton die Schwingungszahl bekannt, so läßt sich berechnen: 1. Die Schwingungszahl eines jeden anderen Tones (siehe die Tabelle). Entsteht z. B. der Ton a' durch 435 Schwingungen, so entsteht c' durch $435 \cdot \frac{8}{9} = 261$ Schwingungen u. s. w. 2. Die Wellenlänge für die Fortpflanzung des Tones in der Luft. Bezeichnet n die Schwingungszahl, so ist (nach der Formel $c = n \cdot \lambda$) die Wellenlänge des Tones $\lambda = \frac{340}{n}$ m.

Übungstoff. 1. Wie schnell muß die Sirene (Fig. 316) gedreht werden, damit durch Anblasen der innersten Löcherreihe nahezu der Stimmgabelton entsteht? — 2. Wie lassen sich mit Hilfe von Zahnrädern die Schwingungszahlen der Töne bestimmen? — 3. Wenn sich ein Beobachter dem Orte der Entstehung eines Tones oder umgekehrt die Schallquelle dem Beobachter schnell nähert, so nimmt die Höhe des Tones etwas zu, im entgegengesetzten Falle etwas ab (Pfeif einer sehr schnell an dem Beobachter vorbeifahrenden Lokomotive). Wie läßt sich dies erklären?*) — 4. Durch wieviele Schwingungen entsteht die erste, zweite und dritte

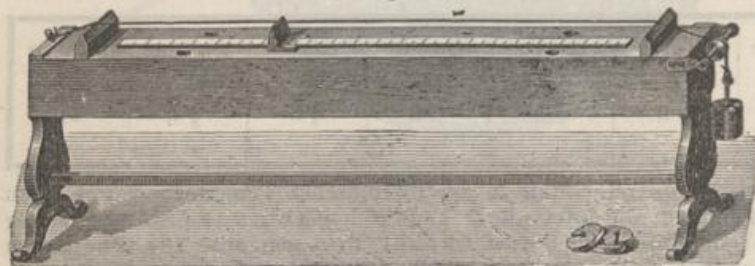
*) Dopplersches Princip. Über eine wichtige Anwendung desselben in der Lehre vom Lichte vergl. § 112.

über dem Stimmgabelton liegende Oktave? — 5. Durch wieviele Schwingungen entstehen dagegen die entsprechenden tiefer liegenden Oktaven? — 6. Länge der fortschreitenden Wellen dieser Töne? — 7. Wie groß ist die Wellenlänge des tiefsten und höchsten hörbaren Tones? — 8. Wie groß ist die Schwingungszahl der Terz, Quarte, Quinte und Sexte des Stimmgabeltones?

§ 93. Tönende Saiten. Obertöne. Schwingungen der Stäbe und Platten. Klaviere, Harfen, Geigen und andere Instrumente erzeugen die Töne durch das Schwingen von Saiten. Bei einzelnen dieser Instrumente, wie beim Klavier, sind die tiefer klingenden Saiten bedeutend länger und dicker und mit Metalldraht umspinnen; der Ton wird dadurch erhöht, daß man die Saiten stärker anspannt. Hiernach übt sowohl die Länge und Dicke, als auch die Spannung der Saiten einen Einfluss auf die Tonhöhe aus.

Zu genauen Untersuchungen über Saitenschwingungen dient ein

Fig. 318.



Monochord,¹⁾ d. h. ein dünnwandiger Kasten (Fig. 318), der mit einer Saite bespannt ist, deren schwingendem Teile durch einen verschiebbaren

Steg eine beliebige Länge und durch *Gewichte* eine genau meßbare Spannung gegeben werden kann.

Bem. Saiten können sowohl Quer- als Längsschwingungen ausführen; in folgendem sind nur die ersteren berücksichtigt. Die Schwingungen einer tönenden Saite dürfen mit den Querschwingungen einer Seilwelle nicht verwechselt werden, denn während bei den letzteren jedes folgende Teilchen seine Bewegung später beginnt (*fortschreitende Welle*), befinden sich bei den Saitenschwingungen alle Teilchen gleichzeitig in demselben Bewegungszustande. Schwingungen dieser Art werden **stehende Schwingungen** genannt. Alle tönenden Körper befinden sich in diesem Schwingungszustande.

Versuch a. 1) Läßt man die Saite eines Monochords zunächst als Ganzes und darauf bei unveränderter Spannung in Bruchteilen schwingen und zwar etwa in $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ und $\frac{1}{3}$ ihrer ganzen Länge, so erhält man außer dem Grundtone noch Töne, deren Schwingungszahlen $\frac{3}{2}$, $\frac{3}{1}$ und 2 mal so groß sind als die Schwingungszahl des Grundtones, nämlich die Terz, Quinte und Oktave desselben. — 2) Dieselben Töne erhält man auch, wenn man bei unveränderter Länge der Saite die Spannung derselben nach den Quadraten der Zahlen $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und 2 vergrößert. — 3) Läßt man darauf zwei Saiten von ungleicher Stärke, aber von derselben Länge und demselben Stoffe bei gleicher Spannung schwingen, so giebt die dickere einen tieferen Ton. — 4) Ist der Stoff der Saiten unter sonst gleichen Bedingungen verschieden (Stahl- oder

¹⁾ *μόνος* (*mónos*), allein und *χορδή* (*chordē*), Saite.

Darmseite), so ist bei der aus dichterem Stoffe bestehenden Saite der Ton ebenfalls tiefer.

Die Zahl der Schwingungen einer Saite wächst bei unveränderter Spannung in demselben Verhältnis, in welchem man die Saite verkürzt, und bei unveränderter Länge im Verhältnis zur Quadratwurzel der Spannung. — Je dicker und dichter eine Saite ist, desto kleiner ist ihre Schwingungszahl, um so tiefer demnach auch ihr Ton.

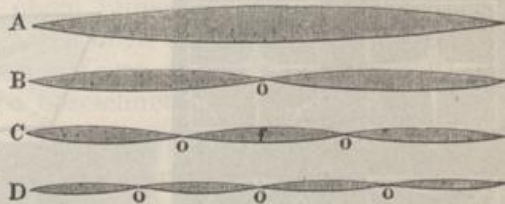
Genauere Untersuchungen lehren, daß die Schwingungszahlen (n und n_1) zweier Saiten sich gerade so verhalten, wie die Quadratwurzeln aus den spannenden Kräften (P und P_1) und umgekehrt wie die Längen (L und L_1), die Dicken (D und D_1) und die Quadratwurzeln aus den spec. Gewichten (S und S_1) der Saiten.

$$\text{In Zeichen: } n : n_1 = \frac{\sqrt{P}}{LD\sqrt{S}} : \frac{\sqrt{P_1}}{L_1 D_1 \sqrt{S_1}}$$

Wenn eine Saite als Ganzes schwingt, so giebt sie ihren tiefsten Ton, den Grundton, an.

Versuch b. Man lasse eine Saite abermals in Teilen schwingen (B, C, D, Fig. 319), indem man sie mit dem Finger oder einem Federbart nur leise berührt (in $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ oder $\frac{1}{4}$ ihrer Länge). Streicht man dann das abgegrenzte Stück der Saite an, so schwingt der andere Teil mit und zwar bei Berührung der Mitte der Saite als Ganzes, in den anderen Fällen in zwei oder drei Teilen, von denen jeder so lang ist wie der angestrichene Teil. (Nachweis durch Papierreiterchen). Je zwei benachbarte Teile bewegen sich in entgegengesetztem Sinne, der eine nach oben und der andere nach unten.

Fig. 319.



Die durch das Schwingen einer Saite in Teilen entstehenden weichen Töne heißen **Neben- oder Obertöne**, und zwar **harmonische Obertöne**, wenn ihre Schwingungszahlen ganze Vielfache von der Schwingungszahl des Grundtones sind.

Die Punkte, welche zwischen den schwingenden Teilen in Ruhe bleiben, werden **Knotenpunkte**, die Punkte größter Schwingungsweite **Schwingungsbäuche** genannt.

Eine Saite giebt nie ihren Grundton allein, sondern stets mit diesem zugleich eine Reihe von Obertönen an, wie sich durch sogen. Resonatoren nachweisen läßt (§ 95). Welche Obertöne mitklingen können, hängt davon ab, an welcher Stelle die Saite gestrichen oder angeschlagen wird. Man hört die Obertöne, welche den Ton voller (als Klang, § 95) erscheinen lassen, am leichtesten beim Ausklingen der Saite.

Musiker machen von den Obertönen der Streichinstrumente (Flageolet-tönen) bisweilen Gebrauch, um sehr hohe Töne hervorzurufen. Auf der Entstehung solcher Töne beruht auch die Musik der Äolsharfe, eines dünnwandigen Kastens, über welchen mehrere Saiten von ganz gleicher Stimmung gespannt sind. Im Luftzuge werden diese Saiten in Schwingungen versetzt. Jede Saite schwingt dabei als Ganzes und auch in Teilen. In derselben Weise kommt auch das Tönen von Telegraphendrähten zustande.

Elastische Stäbe können in Querschwingungen, Längsschwingungen und drehende Schwingungen versetzt werden. Die Tonhöhe hängt von dem Material, von der Länge und Dicke, der Art der Befestigung und Schwingung ab (Glasharmonika, Spieldose u. s. w.). Eine besonders wichtige Anwendung von den Transversalschwingungen elastischer Stäbe macht man bei der *Stimmgabel*. Beide Schenkel derselben schwingen gleichzeitig nach innen oder nach außen; die Knotenpunkte liegen in der Nähe der Biegung (Fig. 332), wie man durch Anlegen eines Fingers nachweisen kann. Außer ihrem Grundton giebt die Stimmgabel in der Regel noch hohe, unharmonische Obertöne an.

Zur Verstärkung des Tones wird die Stimmgabel häufig auf einem Resonanzkasten befestigt (Fig. 331). Indem man an einer Zinke ein Stückchen Federbart befestigt und die tönende Gabel über eine berufste Glasscheibe zieht, lassen sich ihre Schwingungen in Form einer Wellenlinie darstellen.

Bei tönenden Platten läßt sich die Art der Schwingung leicht durch die sogen. Chladnischen Klangfiguren (Fig. 320) nachweisen. Dieselben entstehen,

Fig. 320.

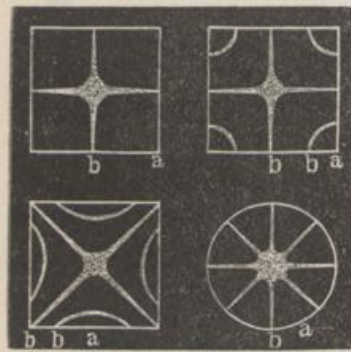


Fig. 321.



wenn man Scheiben von Metall oder Glas mit feinem Sande bestreut und darauf am Rande mit einem Geigenbogen (Fig. 321) kräftig anstreicht. Von den am stärksten schwingenden Stellen

bewegt sich dabei der Sand nach solchen, welche in Ruhe bleiben. Je tiefer der Ton ist, desto einfacher, je höher er ist, desto zusammengesetzter sind die Figuren.

Bem. In den Klangfiguren bezeichnet a die anzustreichende Stelle, b die mit dem Finger festzuhaltenden Stellen (Knotenlinien) der Scheiben.

Auch gekrümmte Scheiben (Glocken) schwingen beim Tönen stets in Teilen. Bringt man z. B. mit Wasser gefüllte Glasglocken durch einen Geigenbogen zum Tönen, so kräuselt sich das Wasser beim Grundton an vier, bei höheren Tönen an mehreren Stellen (Fig. 80). — Gespannte Membranen (Trommelfelle) schwingen ähnlich wie Platten. Zahlreiche Insekten besitzen Vorrichtungen, welche schwingenden Saiten oder Platten gleichen und durch Reiben zum Tönen gebracht werden (Heimchen und Heuschrecken z. B. erzeugen Töne durch Reiben der Flügeldecken und Hinterschenkel); viele Insekten bringen auch Flugtöne hervor, während andere Insektentöne so hoch liegen, daß sie sich der Wahrnehmung durch das menschliche Ohr entziehen. — Die Erzeugung von Tönen durch schnelle Bewegung (Brummkreisel, Gewehrkgeln) oder durch ungleichmäßige Erwärmung eines Metallstabes (Trevellyans Wackler) und noch andere Ursachen ist leicht zu beobachten.

Übungsstoff. 1. Warum sind manche Darmsaiten mit dünnem Metalldraht umspinnen? — 2. Warum ändert sich die Stimmung der mit Darmsaiten

bespannten Instrumente, wenn der Feuchtigkeitsgehalt der Luft zunimmt? — 3. In welcher Weise muß die Stimmung eines mit Stahlsaiten bespannten Instrumentes sich mit der Temp. ändern? — 4. Angenommen, eine Stahlsaite sei 30 cm lang und gebe den Ton c; wie lang muß dann die andere sein, wenn sie das folgende g geben soll? (§ 92.) — 5. Wievielmals so lang müßte die eine gespannt sein als die andere, wenn sie bei gleicher Länge die erste Oktave der anderen geben sollte? — 6. Die Spannungen zweier ganz gleichen Saiten verhalten sich wie 36:81; wie verhalten sich dann ihre Schwingungszahlen zu einander? — 7. Welchen Ton der Tonleiter giebt bei jenen Spannungen die stärker gespannte Saite an, wenn die schwächer gespannte den Ton c giebt? — 8. Wie müßten sich die Spannungen zu einander verhalten, wenn die stärker gespannte den Ton a geben sollte?

§ 94. Tönende Luftsäulen. Flöten, Trompeten, Orgeln und andere Instrumente geben Töne, wenn sie mit dem Munde oder mittelst eines Blasebalges angeblasen werden. Alle *Blasinstrumente* lassen sich auf die beiden Hauptformen der *Lippen-* und *Zungenpfeifen* zurückführen.

1. **Lippenpfeifen**, d. h. Röhren, die zum Anblasen mit einem sogen. Fulse (P) versehen sind, über welchem eine Querspalte liegt (Fig. 322 und 323). Letztere wird der Mund, die beiden ihn begrenzenden Platten (o und b) werden die Lippen der Pfeife genannt. Die obere Lippe ist zugeschärft. Je nachdem die Pfeife oben offen oder geschlossen (gedeckt) ist, wird sie als offene oder gedeckte (auch gedackte) Pfeife bezeichnet.

Versuch a. Wird in einer offenen Lippenpfeife nahe dem oberen Rande eine kleine Flamme angebracht (Fig. 325), so verkürzt und verlängert diese sich sehr schnell, während die Pfeife tönt. In einem um eine senkrechte Achse sich drehenden Spiegel (Fig. 324; a entspricht einem höheren, b einem tieferen Tone)

erscheint die Flamme als ein regelmäfsig gezackter Lichtstreifen. An dieser Erscheinung ändert sich auch nichts, wenn man die Pfeife mit der Hand umfaßt. — Hieraus geht hervor, daß die Luft in der Pfeife sich auf- und abbewegt. Genaueres lehrt folgender Versuch:

Versuch b. Ein rundes, mit einer dünnen Haut überspanntes Rähmchen wird, nachdem man die Haut mit feinem Sande bestreut hat, in eine tönende Lippenpfeife aus Glas hinabgelassen (Fig. 326); man nimmt eine wirbelnde Bewegung des Sandes

Fig. 322.

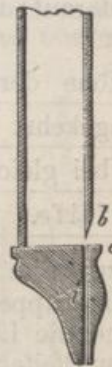


Fig. 323.

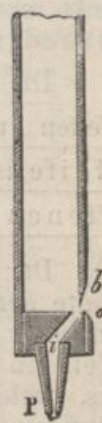


Fig. 324.

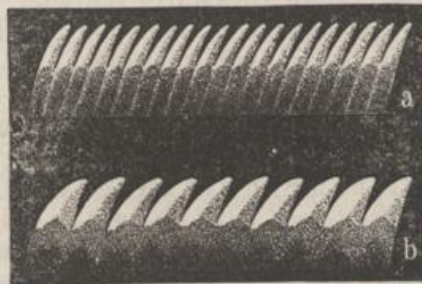


Fig. 325.

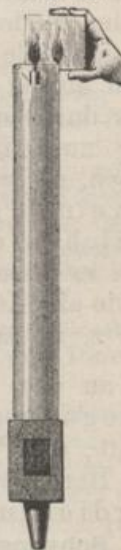


Fig. 326.



wahr, welche bei einer *offenen* Pfeife von oben bis etwa zur Mitte ab und von da bis zur Mundöffnung wieder zunimmt; bei einer *gedeckten* Pfeife dagegen nimmt die Bewegung von oben bis zur Mundöffnung zu, unter der Voraussetzung, daß die Pfeife ihren Grundton angiebt (durch stärkeres Anblasen entstehen leicht Obertöne.)

Der Ton einer Pfeife entsteht durch regelmässige Schwingungen der eingeschlossenen Luftsäule; letztere schwingt bei Angabe des Grundtones der Pfeife in der gedeckten Pfeife als Ganzes, in der offenen Pfeife in 2 Teilen.

Versuch c. Bläst man mehrere offene Lippenpfeifen, deren Längen sich wie $1 : \frac{2}{3} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}$ verhalten, schwach an, so giebt die zweite die Quinte, die dritte die nächst höhere Oktave, die vierte die darauf folgende Oktave des Grundtones der ersten. (längsten) Pfeife an. Bedeckt man darauf die Pfeifen, so wird jeder Ton um eine Oktave erniedrigt.

Die Höhe der Grundtöne von Lippenpfeifen ist der Länge der Pfeifen umgekehrt proportional. Der Grundton einer gedeckten Pfeife ist bei gleicher Pfeifenlänge um eine Oktave tiefer als der einer offenen Pfeife.

Der Luftstrom wird beim Anblasen der Pfeife durch die scharfe Kante der Oberlippe in 2 Teile geteilt, von denen einer in die Pfeife eindringt und die Luft darin verdichtet. Diese Verdichtung schreitet als Welle in der Pfeife fort und tritt an der Öffnung in die umgebende Luft aus, welche sich im Vergleich zu der eingeschlossenen Luft als ein dünneres Mittel ansehen läßt. Hinter der austretenden Welle aber wird eine Luftverdünnung entstehen, welche wie eine reflektierte Seilwelle vom offenen Ende der Röhre rückwärts schreitet und der wieder eine Verdichtungswelle folgt, indem in den mit verdünnter Luft erfüllten Raum von außen neue Luft zuströmt. Da nun diese die Pfeife rückwärts durchlaufenden Wellen mit den durch fortgesetztes Anblasen erzeugten zusammenkommen und beide Wellenzüge sich gegenseitig beeinflussen, so wird die in der Röhre eingeschlossene Luftsäule in einen solchen Schwingungszustand versetzt, daß alle Teilchen derselben gleichzeitig dieselbe Bewegung machen: es bilden sich **stehende Wellen**. Dadurch wird die Luftsäule (wie alle Körper, welche sich im Zustande stehender Schwingungen befinden, z. B. Saiten und Platten) ein selbsttönender Körper.

Da an den beiden Öffnungen der Pfeife die stärkste Hin- und Herbewegung der Luft stattfindet, so sind hier **Schwingungsbäuche**; in der Mitte der Pfeife (wenn dieselbe ihren Grundton giebt) kann keine Hin- und Herbewegung der Luft stattfinden, sondern nur ein Wechsel von Verdichtung und Verdünnung, diese Luftschicht bildet mithin einen **Schwingungsknoten**.

Da der Schwingungsknoten vom nächsten Schwingungsbauch um den vierten Teil einer ganzen Wellenlänge entfernt ist, wie sich am einfachsten aus der Betrachtung stehender Seilwellen ergibt, so entspricht die halbe Länge der offenen Pfeife dem vierten Teil einer Wellenlänge; die Wellenlänge selbst ist mithin gleich der doppelten Pfeifenlänge.

In Zeichen: $l = \frac{1}{2} \lambda$; $\lambda = 2l$.

Die Entstehung der Töne einer **gedeckten Pfeife** erklärt sich in derselben Weise nur mit dem Unterschiede, daß am geschlossenen Ende ein Schwingungsknoten liegen muß, da die Luftteilchen nicht entweichen können und demnach ein Schwingungsbauch sich hier nicht bilden kann. Ein solcher entsteht nur an der Mundöffnung der Pfeife und somit entspricht die Pfeifenlänge dem Abstand von Schwingungsbauch zu Schwingungsknoten oder einer Viertelwellenlänge.

Es ist demnach: $l = \frac{1}{4} \lambda$; $\lambda = 4l$.

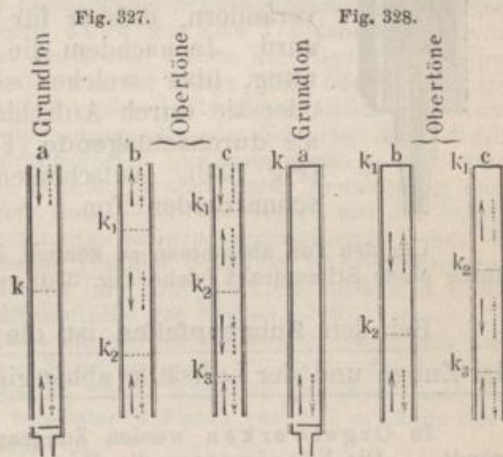
Fig. 327 und 328 stellt die Luftbewegung in Pfeifen dar und zwar sowohl für den Grundton, als auch für Obertöne. Bei Angabe von Obertönen entstehen

mehrere Knoten und zwar in der offenen Pfeife (Fig. 327) beim 1. Oberton in $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Länge, beim 2. Oberton in $\frac{1}{8}$, $\frac{3}{8}$ und $\frac{5}{8}$ der Länge; in der gedeckten Pfeife (Fig. 328) beim 1. Oberton in $\frac{1}{4}$ der Länge, beim 2. Oberton 2 Knoten in $\frac{1}{8}$ und $\frac{3}{8}$ der Länge. Zwischen den Knoten bewegt sich die Luft in der Richtung der Pfeife hin und her.

Das Vorhandensein eines Schwingungsknotens läßt sich außer der in Versuch b beschriebenen Weise durch die manometrischen Flammen von König nachweisen: Die Wand einer Holzpfeife wird an den entsprechenden Stellen durchbohrt und jede Durchbohrung mit einer Kapsel überdeckt, deren Wand einen kleinen Gasbrenner enthält. Leitet man dann beim Tönen der Pfeife Leuchtgas in die Kapseln, so zuckt nur die am Schwingungsknoten befindliche Flamme heftig, was sich im rotierenden Spiegel durch ein gezacktes Flammenbild (siehe Fig. 324) zu erkennen giebt. Zu demselben Zwecke lassen sich auch die Kundtschen Staubfiguren verwenden. Eine ziemlich lange und an beiden Enden verschlossene Glasröhre wird durch kräftiges Reiben zum Tönen gebracht, nachdem man ein leichtes Pulver, etwa Bärlappsaamen, gleichmäßig darin verteilt hat. Beim Tönen ordnet sich der Staub durch das Schwingen der eingeschlossenen Luft so, daß man die Knoten und Bäuche deutlich daran erkennen kann. (Das Glas macht hierbei Längsschwingungen.)

Die Luftsäule in einer beiderseits offenen Röhre kann auch durch eine Gasflamme, die nahe der unteren Öffnung in der Röhre brennt, zum Tönen gebracht werden (singingende Flamme oder Gasharmonika).

Die Schwingungsgesetze tönender Luftsäulen ermöglichen eine einfache Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, indem man mittelst einer Sirene die Schwingungszahl des Grundtones einer gedeckten Pfeife ermittelt und die Formel $c = n\lambda$ (§ 89a) anwendet. Wird die Pfeife mit irgend einem Gase, z.B. mit Kohlensäure, angeblasen, so läßt sich auf dieselbe Weise die Schallgeschwindigkeit in diesem Gase finden. Auch zur Bestimmung der Schallgeschw. in flüssigen



und festen Körpern läßt sich dieses Verfahren anwenden, indem man Stäbe oder Flüssigkeitssäulen in Längsschwingungen versetzt und so zum Tönen bringt. Je nachdem man einen Metallstab z. B. in der Mitte oder am Ende festhält und mit einem beharzten Läppchen der Länge nach streicht, bildet sich in der Mitte oder am Ende ein Schwingungsknoten, der Stab verhält sich also wie die Luftsäule in einer offenen oder in einer gedeckten Pfeife und demnach finden die Formeln $\lambda = 2l$ oder $\lambda = 4l$ Anwendung.

Fig. 330.



Fig. 329.



2. Zungenpfeifen. Bei den Zungenpfeifen entstehen die Töne dadurch, daß ein Luftstrom durch eine Öffnung hindurchgeht und ähnlich wie bei der Sirene regelmäßig unterbrochen wird. Letzteres geschieht durch schwingende Platten oder *Zungen* (Fig. 329). Eine Zungenpfeife (Fig. 330) besteht aus einem *Fufse*, welcher die Zunge (z) enthält, und einem *Schallbecher*. Dieser dient zur Verstärkung des Tones, sowie dazu, den an Obertönen reichen und dadurch scharfen Ton des Zungenwerkes durch das Mitschwingen der eingeschlossenen Luftsäule so zu verändern, daß er für die Zwecke der Musik geeigneter wird. Je nachdem die Zunge einer Pfeife durch die Öffnung, über welcher sie angebracht ist, hindurchschlägt oder sie durch Aufschlagen verdeckt, bezeichnet man sie als *durchschlagende* (Fig. 329) oder *aufschlagende Zunge* (Fig. 330). Aufschlagende Zungen erzeugen einen rauhen, schnarrenden Ton.

Um den Ton abstimmen zu können, läßt sich der schwingende Teil der Zunge durch einen Stimmdraht (siehe Fig. 330) verkürzen und verlängern.

Bei den Zungenpfeifen ist die Tonhöhe von den Schwingungen der Zunge und der Luftsäule abhängig.

In Orgelwerken werden Zungenpfeifen neben den Lippenpfeifen angewandt. — Die Klarinette, die Oboe, das Fagott und die Schalmelie enthalten Zungen, welche aus Holz oder Rohr geschnitzt sind. Bei diesen Instrumenten hängt die Höhe des Tones jedoch nicht wie bei den Zungenpfeifen der Orgel wesentlich von der Zunge, sondern fast allein von der schwingenden Luftsäule ab, welche sich zur Erzeugung verschiedener Töne durch Öffnen und Schließen von Klappen oder Löchern verkürzen und verlängern läßt. Bei Waldhörnern, Trompeten und Posaunen werden die schwingenden Platten durch die in das Mundstück geprefsten Lippen der Bläser gebildet, die Höhe und Tiefe der Töne kann dabei durch die Stärke des Anblasens, durch zeitweiliges Verschließen der trichterförmigen Öffnung oder auch durch Verlängerung oder Verkürzung des Rohres bewirkt werden. Obgleich diese Instrumente (namentlich das Waldhorn) aus gewundenen Röhren bestehen, so geben sie doch dieselben Töne, welche gerade Röhren von der gleichen Länge geben würden.

Das Stimmorgan des Menschen ist eine Zungenpfeife mit zwei häutigen (membranösen) Zungen, den Stimmbändern. Dieselben sind zwischen den Knorpeln des Kehlkopfes am oberen Ende der Luftröhre ausgespannt und verschließen diese bis auf eine schmale Spalte, die Stimmritze.

Durch das Schwingen der Stimmbandränder entsteht ein Ton, dessen Höhe von der Beschaffenheit und Spannung der Stimmbänder, dessen Klang aber wesentlich von der Größe und Gestalt der Mundhöhle abhängt. Der Luftstrom, welcher die Stimmbänder in Schwingungen versetzt, entsteht dadurch, daß die Luft aus den beiden Lungen, welche sich ausdehnen und wieder zusammenziehen, durch Luftröhre und Kehlkopf geprefst wird. Die Lungen lassen sich daher mit zwei Blasebälgen vergleichen, während die Luftröhre den Fufs und der Mund den Schallbecher einer Zungenpfeife darstellen.

Der tiefste Ton, welchen Männerstimmen noch zu singen vermögen, hat 60, der höchste kaum 600 Schwingungen in 1 Sekunde; der höchste Ton einer Frauenstimme hat ungefähr 1600 Schwingungen.

Übungsstoff. 1. Welche musikalischen Instrumente (Kinderspielzeuge) sind Lippenpfeifen und welche sind Zungenpfeifen? Wie verändert man den Ton derselben? — 2. Für das tiefste sogen. Subkontra-C würde eine offene Pfeife 10 m, für das höchste sogen. 5-gestrichene d eine gedeckte Pfeife 2 cm lang sein müssen. Welche Länge müssen sie haben, wenn man erstere deckt und letztere öffnet? — 3. Wv. ganze und halbe Wellen können nach Fig. 327 und 328 a. in einer offenen, b. in einer geschlossenen Pfeife entstehen? — 4. Drücke alles in halben Wellen aus und vergleiche die Zahlen mit der Anzahl der halben Wellen des Grundtones beider Pfeifen. — 5. Bei welcher Pfeife bilden hiernach die Schwingungszahlen der Obertöne nur ungerade, bei welcher dagegen auch gerade Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones? (Letzteres ist der Grund, warum derartige Pfeifen einen volleren Klang haben.) — 6. Wie läßt sich aus der Länge einer offenen oder gedeckten Lippenpfeife die Länge der fortschreitenden Luftwelle desselben Tones und (mit Benutzung der Zahl für die Fortpflanzungsgeschw. des Schalles) die Schwingungszahl des Tones berechnen? (Erfahrungsgemäß nur dann genau genug, wenn die Pfeife nicht sehr weit ist und ihre Wände parallel sind. Erweiterung nach oben erhöht den Ton, Verengung vertieft ihn.) — 7. Wie ferner aus der Schallgeschw. und der durch eine Sirene bestimmten Schwingungszahl eines Tones die Länge der offenen Pfeife, für welche dieser Ton der Grundton ist? (Erfahrungsgemäß muß die Pfeife soviel kürzer sein, als ihre doppelte Tiefe beträgt, d. h. der doppelte Abstand des Mundes von der Hinterfläche der Pfeife.) — 8. Welchen Ton giebt eine 80 cm lange offene Orgelpfeife, wenn sie mit Wasserstoff angeblasen wird und die Schallgeschw. in diesem Gase 3,8mal so groß ist als in der Luft? — 9. Wie groß ist die Geschw. des Schalles im Stahl, wenn ein an einem Ende eingeklemmter und in Längsschwingungen versetzter Stahlstab von 2,75 m Länge einen Ton angiebt, welcher dem c" nahe kommt?

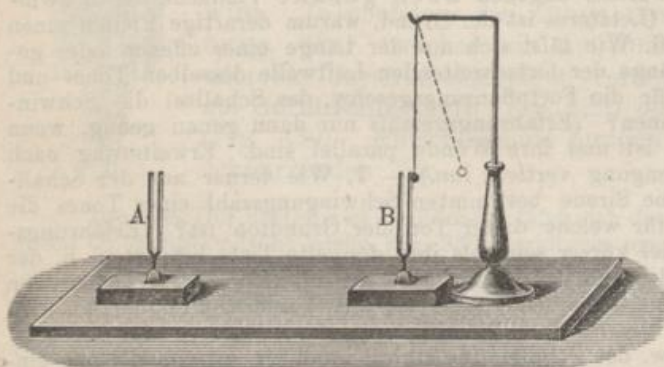
§ 95. Resonanz und Mittönen. Klangfarbe. Interferenz. Die Tonverstärkung, welche eintritt, wenn man eine tönende Stimmgabel mit ihrem Fufse auf eine Tischplatte stellt, hat ihre Ursache darin, daß die Platte die Schwingungen der Stimmgabel mitmacht, sodafs weit mehr Luftteilchen zugleich in schwingende Bewegung versetzt werden als durch die Stimmgabel allein. In gleicher Weise wirken die Resonanzböden der Klaviere, sowie die Resonanzkasten der Saiteninstrumente. Während die Saiten derselben die Luft durchschneiden, ohne sie stark zu erschüttern, wird durch das Mitschwingen der mit ihnen verbundenen Platten und der von dem Kasten eingeschlossenen Luft eine gröfsere Luftmasse in Bewegung gesetzt und dadurch dem Tone die erforderliche Kraft und Fülle gegeben. Ein selbständiges Tönen des mitschwingenden Körpers findet dabei nicht statt. Ohne eine solche Tonverstärkung würden feste Tonerreger von geringer Ausdehnung für die Zwecke der Musik unbrauchbar sein.

Ist ein Körper vielfacher Schwingungen fähig, so können durch ihn verschiedene an sich schwache Töne dadurch sehr verstärkt werden, daß der Tonerreger den Körper zum Mitschwingen anregt: **Resonanz.**¹⁾

Gewisse Erscheinungen (Klirren der Fenster beim Abfeuern großer Geschütze, bei heftigen Donnerschlägen u. s. w.) beweisen, daß auch durch die Wellenzüge, welche den Schall in der Luft fortpflanzen, Körper in schwingende Bewegung versetzt werden können. In gewissen Fällen kann auf diese Weise sogar ein selbständiges Tönen des mitschwingenden Körpers erfolgen, wie sich bei Saiteninstrumenten wahrnehmen läßt, wenn in ihrer Nähe starke Töne hervorgerufen werden. So hört man z. B. in einem geöffneten Klavier gewisse Saiten deutlich erklingen, wenn man einen Ton kräftig in das Instrument hineinsingt. Sehr auffällige Erscheinungen dieser Art zeigen folgende Versuche.

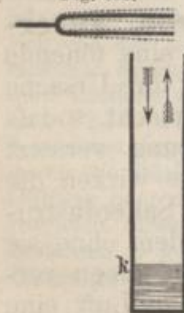
Versuch a. Werden 2 Stimmgabeln, welche auf kleinen, dünnwandigen Holzkästen (Fig. 331) von passender Größe befestigt sind und

Fig. 331.



genau denselben Ton angeben, so aufgestellt, daß die offenen Enden der Kästen einander zugewandt sind, so tönt die eine Stimmgabel nicht nur mit, wenn die andere zum kräftigen Tönen gebracht wird, sondern sie setzt das Tönen auch noch fort, wenn letztere zu tönen aufhört. Erniedrigt man darauf den

Fig. 332.



Ton einer der beiden Gabeln durch eine geringe Belastung eines Zinkens (Ankleben von Wachs), so tritt das Mitschwingen nicht ein.

Versuch b. Hält man eine tönende Stimmgabel über die Mündung eines ungefähr 25 cm hohen Glaszylinders (Fig. 332), so klingt der Ton bedeutend kräftiger, wenn man bis zu einer gewissen Höhe Wasser in den Cylinder gießt. Diese Erscheinung erklärt sich daraus, daß die im Cylinder enthaltene Luft in ebensolche Schwingungen versetzt wird, wie die Luftsäule in einer gedeckten Lippenpfeife, welche den Stimmgabelton als ihren Grundton angiebt.

Durch Rechnung ergibt sich für die zum Mitschwingen bei dem Stimmgabelton a' erforderliche Luftsäule eine Länge von $\frac{34000}{4.435}$ cm. Da stehende Wellen der Pfeifen

¹⁾ resonare, zurückschallen.

sich noch ein wenig über die Pfeife hinaus fortsetzen, so eignet sich für den Versuch besser eine etwas kürzere Luftsäule.

Durch die Schwingungen der den Schall fortpflanzenden Luft kann ein Körper, dessen Eigenton mit dem des Tonerregers übereinstimmt, zum selbständigen Tönen angeregt werden: **Mittönen**.

Bekanntlich klingt ein und derselbe Ton ganz verschieden, je nachdem er gesungen, auf einer Flöte oder einer Trompete geblasen, auf einer Geige angestrichen, auf einem Klavier angeschlagen wird u. s. w. Man nennt diesen von der Beschaffenheit des Tonerregers abhängigen Charakter des Tones **Klangfarbe**. Dieselbe erklärt sich nach sehr sorgfältigen Untersuchungen im wesentlichen daraus, daß die gewöhnlichen Tonerreger außer dem deutlich hörbaren Grundtone noch Neben- oder Obertöne erklingen lassen, welche je nach der Beschaffenheit der Tonerreger sehr verschieden sein können.

Die Klangfarbe der Töne ist durch die Zahl, Höhe und Stärke der dem Grundtone beigemischten Obertöne bestimmt.

Die Obertöne eines einfach erscheinenden Klanges lassen sich gesondert wahrnehmen, wenn man die von Helmholtz erfundenen Resonatoren zu Hilfe nimmt. Die Resonatoren sind Hohlkugeln (Fig. 333), oder cylindrische Röhren von Glas, Blech oder Pappe mit zwei einander gegenüberliegenden Öffnungen, von denen die eine (gewöhnlich mit einem kleinen Ansatzrohr versehene) an das Ohr gehalten wird. Jeder Resonator ist auf einen gewissen Ton abgestimmt; durch das Mitschwingen der im Resonator enthaltenen Luftsäule wird dieser Ton derart verstärkt, daß er aus einem Klange herausgehört werden kann. Zum Nachweis mehrerer Obertöne sind daher auch ebenso viele Resonatoren erforderlich.

Fig. 333.



Ein Ton klingt weich, wenn er einfach ist oder wenigstens keine höheren Obertöne enthält, z. B. der durch Mittönen einer Luftsäule verstärkte Stimmgabelton, der Laut U der menschlichen Stimme. Fast frei von Obertönen ist auch der Ton einer Flöte oder einer ziemlich weiten, gedeckten Lippenpfeife. Der Klang eines Tones ist scharf (z. B. der Trompetenton), wenn demselben zahlreiche hohe, unharmonische Obertöne beigemischt sind. Sind die Obertöne im Verhältnis zum Grundtone sehr schwach, so klingt der Ton hohl (z. B. Fagott oder Oboe) u. s. w. Auch die Verschiedenheiten im Klange der menschlichen Stimme haben in der Beimischung von Obertönen ihren Grund; letztere werden durch die Größe und Gestalt der Mundhöhle bedingt. Außer den jedem Menschen eigentümlichen Obertönen können durch besondere Mundstellungen einem jeden Tone noch gewisse Obertöne beigemischt sein. Hieraus erklärt sich die Entstehung der Vokalklänge, während die Konsonanten Geräusche verschiedener Art sind.

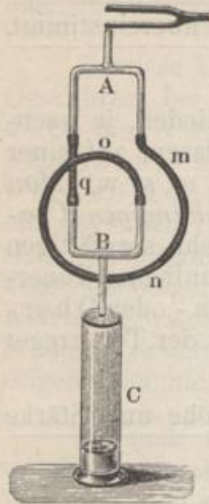
Die Entstehung der Klangfarbe wurde von Helmholtz (1858) zuerst nachgewiesen (Klanganalyse).

Interferenz der Schallwellen. Wie bei durcheinander laufenden Zügen kreisförmiger Wasserwellen Wellenberg und Wellenthal sowohl Verstärkungen als Abschwächungen erfahren können (§ 89), so können auch bei Luftwellenzügen, wenn sie sich kreuzen, die Verdichtungen und Verdünnungen sich sowohl verstärken als vernichten. Dies läßt sich durch folgenden Versuch nachweisen.

Versuch c. Zwei etwa 10 mm weite gabelförmige Glasröhren (A und B, Fig. 334, folg. Seite) verbinde man in der angegebenen Weise durch Gummischläuche

miteinander, von denen der eine (mno) nahezu 40 cm (halbe Länge der fortschreitenden Welle des gewöhnlichen Stimmgabeltones) länger ist als der andere. Die eine der beiden Ansatzröhren halte man in einen nach Fig. 332 auf denselben Ton abgestimmten Resonator. Hält man dann eine kräftig angeschlagene Stimmgabel mit dem äußersten Ende eines ihrer Zinken möglichst nahe vor die Mündung der anderen Ansatzröhre, so hört man den Ton nur dann deutlich, wenn man den längeren Verbindungsschlauch (mno) fest zusammendrückt.

Fig. 334.



Dies erklärt sich daraus, daß die Strecke AmnoB um eine halbe Wellenlänge des Stimmgabeltones größer ist als die Strecke AqB, sodafs die Luftschwingungen, wenn sie sich auf beiden Wegen fortpflanzen, bei B in entgegengesetzten Schwingungszuständen ankommen, d. h. so, daß Verdichtung und Verdünnung zusammentreffen.

Übungsstoff.

Fig. 335.



1. Wenn man die elastischen, aus Tierblase oder Kautschuk bestehenden Böden zweier zylindrischen Blechbüchsen durch eine lange Schnur verbindet (Fig. 335), so erhält man einen Apparat, durch welchen ein in die Höhlung des einen Cylinders gesprochenes Wort vor dem anderen Cylinder auf weite Entfernung hin deutlich hörbar ist. Erkl.!
2. Wie kann ein frei aufgehängter K. von ziemlich großem Gew. durch schwache Stöße in eine pendelartige Bewegung versetzt werden? Wende dies auf die Ersch. des Versuches a an.
3. Wie erklärt es sich, daß eine geringe Belastung der Stimmgabel das Mittönen verhindern kann?
4. Wie erklärt sich das Zurückhallen eines in ein Klavier gesungenen Tones und warum können dabei nicht alle Saiten erklingen?
5. Wodurch erhalten die Töne der Stimmbänder des Kehlkopfes erst ihren Klang? Vorteil der Veränderlichkeit dieses natürlichen Resonators!
6. Eingeschlossene dünne Luftsäulen erzeugen beim Schwingen leicht hohe Obertöne. Inwiefern liegt hierin der Grund dafür, daß man z. B. Trompeten aus Röhren anfertigt, die im Verhältnis zu ihrer Länge ziemlich dünn sind, bei Orgelpfeifen dagegen im allgemeinen entgegengesetzt verfährt?
7. Inwiefern ist der Längenunterschied der beiden Schläuche (Fig. 334) von der Wellenlänge des Stimmgabeltones abhängig?
8. Wv. Wellenzüge müssen in der Luft durch das Tönen einer Stimmgabel entstehen?
9. Wie erklärt sich somit die Ersch., daß der Ton einer senkrecht vor das Ohr gehaltenen Stimmgabel abwechselnd viermal stärker und viermal schwächer wird, wenn man die Gabel einmal um ihre Längsachse dreht?

IV. Abschnitt.

Die Lehre vom Lichte.

(O p t i k.)

(I. Lehrstufe, §§ 25—29.)

A. Geschwindigkeit und Stärke des Lichtes.

§ 96. Geschwindigkeit des Lichtes. Schon Galilei nahm an, daß das Licht eine bestimmte Zeit nötig habe, um sich durch