Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

IX. Wellen und Schall.

IX. Wellen und Schall.

A. Wellenbewegung.

284. **Wellenbewegung.** Eine Wellenbewegung entsteht, wenn sich längs einer Reihe von Punkten oder in irgend einem Mittel eine schwingende Bewegung mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortpflanzt, wobei jedes in der Fortpflanzungsrichtung folgende Teilchen, entsprechend seinem Abstand von dem zuerst in Bewegung gesetzten Teilchen, seine Schwingung etwas später beginnt als das vorhergehende. Ein anschauliches Bild von den Vorgängen bei der Wellenbewegung bietet ein wogendes Ährenfeld. Jede Ähre wird von dem Wind hinabgebogen, richtet sich aber vermöge der Elastizität des Halmes wieder empor, biegt sich wieder hinab usw. und vollführt in dieser Weise regelmäßig sich wiederholende Schwingungen. Die folgenden Ähren werden durch den Windstoß, der die erste zu schwingen zwang, um so später in Schwingungen versetzt, je weiter sie in der Reihe der Ähren von der ersten entfernt sind. Vermöge der regelmäßigen Aufeinanderfolge von niedergebogenen und wieder aufgerichteten Ährenreihen zeigt die Oberfläche des Feldes in jedem Augenblick die Formen von abwechselnden Vertiefungen und Erhöhungen; diese Wellenform sehen wir mit der Geschwindigkeit des Windes das Feld entlang eilen, während jede Ähre, an ihrem Ort festgewurzelt, nur in beschränktem Bereiche hin und her schwingt.

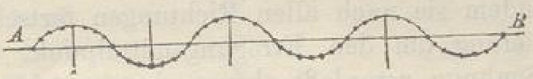

Fig. 263.
Wellenstrahl.

Durch Wellenmaschinen kann man die Wellenbewegung in anschaulicher Weise nachahmen. Bei der Machschen Wellenmaschine sind eine Reihe von Pendelkugeln längs einem Gestelle an je zwei Fäden so aufgehängt, daß jede nur senkrecht zu dieser Längsrichtung schwingen kann. Schiebt man alle Kugeln mittels einer Holzleiste gleichweit aus der Vertikalebene seitwärts heraus, und zieht die Leiste in der Längsrichtung (*AB* Fig. 263) mit gleichförmiger Geschwindigkeit weg, so wird eine Kugel nach der anderen losgelassen, und indem jede senkrecht zu *AB* hin- und herschwingt, bietet ihre Gesamtheit von oben gesehen in irgend einem Moment den Anblick der Fig. 263, mit Ausbiegungen nach der einen und der anderen Seite, welche längs der Reihe der Kugeln gleichmäßig fortschreiten.

Bei dem wogenden Ährenfeld und bei der Pendelreihe ist es ein äußerer Anlaß, welcher die Bewegung von jedem Teilchen auf das folgende überträgt. In einem Mittel, dessen Teilchen durch zwischen ihnen tätige Kraft in Wechselwirkung stehen, wird die Übertragung durch diese Kräfte selbst vermittelt. Ein Beispiel hierfür bieten die durch die Schwerkraft fortgepflanzten Flüssigkeitswellen.

Wirft man einen Stein in ein ruhig stehendes Gewässer, so wird das an dieser Stelle hinabgedrückte Wasser durch den Druck des umgebenden Wassers wieder emporzusteigen genötigt, kommt aber, nachdem es den ursprünglichen Wasserspiegel erreicht hat, hier nicht plötzlich zur Ruhe, sondern setzt seine Bewegung nach aufwärts fort, bis die entgegenwirkende Schwerkraft es wieder zum Herabsinken zwingt; so vollführt das durch den Stein zuerst aus seiner Ruhelage gebrachte Wasserteilchen eine Reihe auf- und abwärtsgehender Schwingungen. Es kann aber das Gleichgewicht des Wasserspiegels nicht an einer Stelle gestört werden, ohne daß sich die Störung wegen der allseitigen Fortpflanzung des Wasserdrucks auch auf die ringsum benachbarten Wasserteilchen überträgt und diese veranlaßt, in gleichem Takt wie das zuerst gestörte Teilchen auf und ab zu schwingen, wobei jedes weiter entfernte Teilchen seine schwingende Bewegung etwas später beginnt als das ihm unmittelbar vorhergehende. Jede Hebung des zuerst gestörten Teilchens gibt zu einer Senkung der rings benachbarten Teilchen Anlaß, welche, indem sie nach allen Richtungen fortschreitet, eine ringförmige Vertiefung um den Erregungsmittelpunkt erzeugt; die darauf folgende Senkung veranlaßt ebenso ringsum eine wallartige Erhebung, welche als Wellenberg dem vorausgegangenen Wellental auf dem Fuße folgt. Während also das zuerst erregte Teilchen eine ganze aus Hebung und Senkung bestehende Schwingung vollendet, erzeugt es eine vollständige aus Wellenberg und Wellental gebildete Welle, und indem es fortfährt zu schwingen, scheinen aus ihm immer neue Wellenringe hervorzuwachsen, welche, sich erweiternd, nach außen hin fortschreiten. Es ist aber nur die Gestalt der Wasserfläche, welche fortschreitet, nicht das Wasser selbst; die Wasserteilchen verlassen dabei ebensowenig ihren Ort wie die Halme eines wogenden Ährenfeldes, sondern schwanken nur auf und ab, wie man an einem auf dem Wasser schwimmenden kleinen Holzstückchen, das diese schwingende Bewegung mitmacht, leicht beobachten kann. Die Gesamtheit aller von demselben Erregungspunkt ausgehenden Wellenringe bildet ein Wellensystem. Jede vom Mittelpunkt des Wellensystems auf der wagrecht gedachten Wasserfläche gezogene Gerade heißt ein Wellenstrahl. Alle Wasserteilchen, welche im Ruhezustand auf dieser Geraden lagen, befinden sich während der Wellenbewegung teils darüber, teils darunter, je nachdem sie augenblicklich einem Wellenberg oder einem Wellental angehören, und bilden daher in ihrer Aufeinanderfolge eine auf und ab gewundene **Wellenlinie**. Eine Strecke auf dem Strahl, welche von einer vollständigen Welle, nämlich einem Wellenberg und einem Wellental, eingenommen wird, nennt man eine **Wellenlänge**.

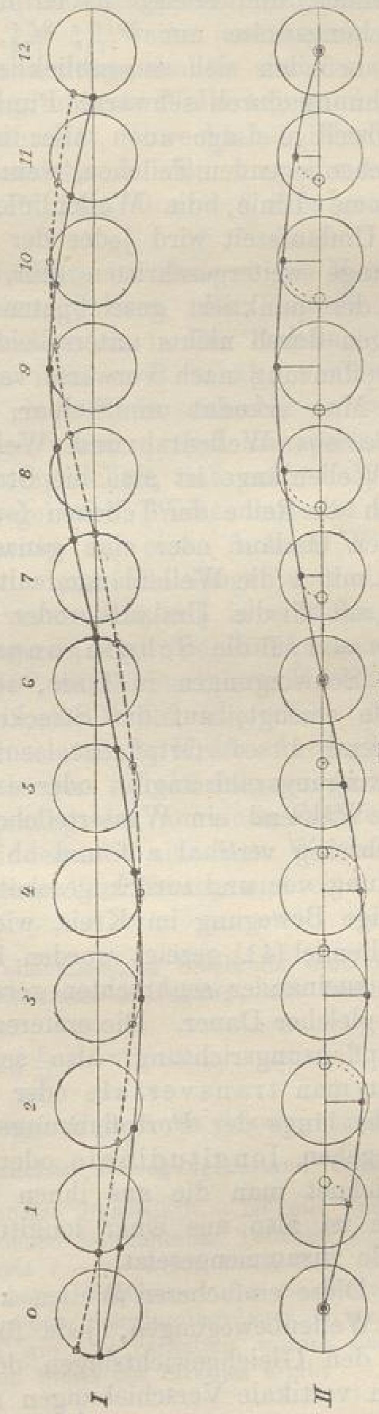

Fig. 264.
Entstehung fortschreitender Wellen.

Zur Beobachtung der Bewegung der Wasserteilchen während der Fortpflanzung einer Welle bedienten sich die Brüder E. H. und W. Weber (1825) der Wellenrinne, eines langen, schmalen Troges mit Seitenwänden aus Glasplatten. Dem Wasser wurde ein Pulver von gleichem spezifischen Gewicht (Bernstein) beigemischt, dessen Teilchen die Bewegungen der Wasserteilchen, an welchen sie teilnehmen, sichtbar machen. Es ergab sich, daß die Wasserteilchen in der durch die Fortpflanzungsrichtung gelegten Vertikalebene krummlinige Bahnen beschreiben, die an der Oberfläche Kreise, nach der Tiefe zu Ellipsen mit immer kleinerem vertikalen Durchmesser sind.

In Fig. 264 *I* mögen die Kreise 0 bis 12 die Bahnen von 13 Wasserteilchen vorstellen, welche im Ruhezustand gleichweit voneinander entfernt im horizontalen Wasserspiegel liegen. Wir betrachten die Lagen sämtlicher Teilchen in dem Augenblick, in welchem das Teilchen bei 0, nachdem es einen ganzen Umlauf vollendet hat und im Niveau wieder angekommen ist, sich gerade anschickt, einen zweiten Umlauf zu beginnen. Hat sich während der Dauer des ersten Umlaufs die Bewegung bis zum Teilchen 12 fortgepflanzt, so ist dieses gerade im Begriff, seinen ersten Umlauf anzutreten, d. h. es ist um einen ganzen Umlauf hinter der Bewegung des Teilchens 0 zurück. Das Teilchen 1 ist alsdann, weil sein Abstand von 0 zwölfmal kleiner ist, auch nur um $^1/_{12}$ Umlauf gegen das Teilchen 0 zurückgeblieben, hat also $^{11}/_{12}$ seines Umlaufs vollendet, und ebenso haben die Teilchen 2, 3, 4 ... gleichzeitig, beziehungsweise nur $^{10}/_{12}$, $^9/_{12}$, $^8/_{12}$ ... ihres Umlaufs ausgeführt, und befinden sich augenblicklich in den Stellungen, welche in der Zeichnung durch schwarze Punkte angegeben sind. Wir finden die gleichzeitige Lage auch aller in der Zeichnung nicht angegebenen zwischenliegenden Teilchen, wenn wir diese Punkte durch eine stetige krumme Linie, die Wellenlinie, verbinden. Nach einem Zwölftel der Umlaufszeit wird jeder der Punkte um ein Zwölftel des Kreisumfangs weitergeschritten sein, und sämtliche Punkte liegen jetzt auf der punktiert gezeichneten Wellenlinie, welche sich von der vorigen durch nichts unterscheidet, als daß sie in der Richtung der Fortpflanzung nach vorwärts verschoben ist.

Man erkennt unmittelbar, daß während der Umlaufszeit eine ganze aus Wellental und Wellenberg bestehende Welle entsteht; die Wellenlänge ist also die Strecke, um welche sich die Bewegung durch die Reihe der Teilchen fortpflanzt, während ein Teilchen einen ganzen Umlauf oder eine ganze Schwingung vollendet. Bezeichnet man mit λ die Wellenlänge, mit V die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und mit T die Umlaufs- oder Schwingungsdauer, so ist $\lambda = VT$. Ist $n = 1/T$ die Schwingungszahl, d. h. die Anzahl der Umläufe oder Schwingungen in 1 sec, so müssen, da jede Schwingung eine Welle erzeugt, auf die Strecke V, um welche sich die Bewegung während 1 sec fortpflanzt, soviele Wellenlängen gehen, als die Schwingungszahl angibt, oder es ist $V = n\lambda$.

Während ein Wasserteilchen seinen Kreis beschreibt, wird es gleichzeitig vertikal auf und ab und horizontal in der Fortpflanzungsrichtung vor und zurück geschoben. Man kann in der Tat die gleichförmige Bewegung im Kreis, wie schon beim kreisförmig schwingenden Pendel (41) gezeigt worden ist, als zusammengesetzt ansehen aus zwei zueinander senkrechten geradlinigen pendelartigen Schwingungen von gleicher Dauer. Die ersteren Schwingungen, welche senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, also senkrecht zum Wellenstrahl erfolgen, nennt man transversale oder Querschwingungen, die letzteren, welche längs der Fortpflanzungsrichtung, also im Strahle selbst, vor sich gehen, longitudinale oder Längsschwingungen, und ebenso bezeichnet man die aus ihnen bestehenden Wellen. Eine Wasserwelle ist also aus einer longitudinalen und aus einer transversalen Welle zusammengesetzt.

Diese einfacheren Wellen können aber auch, bei anderen Arten von Wellenbewegungen, jede für sich allein auftreten. Trägt man von den Gleichgewichtslagen der Teilchen in Fig. 264 *II* aus bloß deren vertikale Verschiebungen nach ab- und aufwärts auf, so erhält man das Bild einer transversalen Welle, und behält man bloß die Verschiebungen in horizontaler Richtung bei, dasjenige einer longitudinalen Welle. Da bei letzterer kein Teilchen aus der Richtung des Strahles heraustritt, so gibt es bei den longitudinalen Wellen keine Wellenform, keine Berge und Täler; man bemerkt aber leicht, daß die in Fig. 264 *II* durch Ringelchen angedeuteten Teilchen von 0 bis 3 und von 9 bis 12 weiter auseinander gerückt, zwischen 3 und 9 enger zusammengeschoben sind, als sie es im Ruhezustande waren. Eine longitudinale Welle bringt also in dem Mittel, durch welches sie fortschreitet, abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen hervor, welche in den um eine halbe Wellenlänge voneinander entfernten Punkten 0 und 6 ihre größten Werte erreichen.

Die Machsche Wellenmaschine brachte bei dem obigen Versuch eine transversale Welle zur Anschauung; denn alle Pendelkugeln schwingen senkrecht zu der Linie, welche sie in der Ruhelage einnehmen. Auch die Seilwellen, die man z. B. erhält, wenn man einen langen Kautschukschlauch am einen Ende senkrecht zu seiner Länge mit der Hand in Schwingungen versetzt, sind transversal. — Der Machsche Wellenapparat ist so eingerichtet, daß man, nachdem die Schwingungen in der dort angegebenen Weise angeregt sind, sämtliche Schwingungsebenen gleichzeitig um einen rechten Winkel drehen kann; die Kugeln schwingen dann alle längs jener Linie, und die vorher transversale Welle verwandelt sich in eine longitudinale mit abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen. In Fig. 264 *II* ist diese Drehung um 90° durch punktierte Kreisbogen angedeutet. Eine wirklich longitudinale Welle, die nicht durch äußere Veranstaltung, sondern durch elastische Kräfte fortgepflanzt wird, erhält man, wenn man einem langen spiralförmig gewundenen Draht, der an Fäden horizontal aufgehängt ist, am einen Ende einen Stoß in der Längsrichtung erteilt; indem die einzelnen Windungen hin- und herschwingen, sieht man eine Verdichtung und eine Verdünnung die Spirale entlang laufen.

Jedes Pendelchen der Machschen Wellenmaschine beschreibt eine Sinusschwingung um seine Ruhelage (20), also eine Bewegung, die durch die Formel

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

darstellbar ist. Darin bedeutet a die Amplitude, T die Schwingungsdauer; den Ausdruck $\frac{2\pi t}{T}$, der den augenblicklichen Bewegungszustand bestimmt, nennt man die Phase und t die zugehörige Phasenzeit. Ist ein Teilchen in der Richtung des Strahles von dem soeben betrachteten Teilchen um die Strecke x entfernt, so ist seine Phasenzeit $t - \tau$, wenn τ die Zeit ist, in welcher sich die schwingende Bewegung um x fortpflanzt. Da die Bewegung durch die Reihe der Teilchen während einer Schwingungsdauer T um die Wellenlänge λ fortschreitet, muß sich $\tau : T$ wie $x : \lambda$ verhalten, woraus sich für die Ausweichung an der durch x gegebenen Stelle des Strahles ergibt

$$y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right).$$

Diese Gleichung gibt für jeden bestimmten Wert von x die im Laufe der Zeit erfolgenden Ausweichungen des daselbst liegenden Teilchens und für jeden bestimmten Wert von t die in diesem Augenblick stattfindende Lage aller längs des Strahles aufeinander folgenden Teilchen, also die Gestalt der transversalen Welle (Sinusoide); man nennt sie daher geradezu die Gleichung eines Wellenstrahles. Sie gilt übrigens ebensogut für eine longitudinale Welle, da diese aus der transversalen durch bloße Drehung der Schwingungsrichtung um 90^0 ohne Änderung der Ausweichung hervorgeht (vgl. Fig. 263 *II*). Die Ausweichung y ist sowohl in bezug auf t als in bezug auf x periodisch; läßt man bei unverändertem x die Zeit t um T, oder bei unverändertem t die Strecke x um λ zunehmen, so durchläuft y die ganze Periode seiner zwischen $-a$ und $+a$ liegenden Werte.

Betrachten wir die beiden Teilchen, welche augenblicklich die Gipfel zweier aufeinander folgenden Wellenberge einnehmen, so finden wir beide gerade im Begriff, aus dieser ihrer höchsten Lage nach abwärts zu gehen; diese beiden Teilchen, welche offenbar um eine Wellenlänge voneinander abstehen, befinden sich also in dem nämlichen Schwingungszustand (in der nämlichen Phase). Dasselbe gilt überhaupt von je zwei Teilchen, welche um eine oder mehrere ganze Wellenlängen voneinander entfernt sind; ihre Bewegungen erfolgen in völliger Übereinstimmung. Nehmen wir dagegen zwei Teilchen, welche um eine halbe Wellenlänge voneinander abstehen, von denen z. B. das eine auf dem Gipfel eines Wellenbergs, das andere in der Tiefe des benachbarten Wellentals liegt, so sind diese in gerade entgegengesetzten Schwingungszuständen. Während nämlich das erste aus seiner höchsten Lage nach abwärts zu gehen beginnt, ist das zweite im Begriff, aus seiner tiefsten Lage nach aufwärts zu gehen. Überhaupt sieht man ein, daß die Bewegungen zweier Teilchen, deren Abstand voneinander eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt, zueinander in vollkommenem Gegensatz stehen.

285. **Interferenz.** Wirft man zwei Steine in einiger Entfernung voneinander in ruhiges Wasser, so entstehen zwei gleiche Wellensysteme, welche bei ihrer weiteren Ausbreitung sich durchkreuzen; wo dies geschieht, sehen wir die Oberfläche von einem zierlichen Netzwerk kleiner Erhöhungen und Vertiefungen bedeckt, welche durch das Zusammenwirken oder durch die Interferenz der beiden Wellensysteme entstehen. An allen Stellen nämlich, wo zwei Wellenberge zusammentreffen, erhebt sich das Wasser zu doppelter Höhe, und wo zwei Wellentäler sich durchkreuzen, senkt es sich zu doppelter Tiefe. An jenen Stellen dagegen, wo ein Wellenberg mit einem Wellental zusammentrifft, wird das Wasser auf seine ursprüngliche Höhe, die es im Ruhezustand einnimmt, zurückgeführt, d. h. hier heben sich die beiden Wellenbewegungen gegenseitig auf. Überhaupt erleidet in einem Mittel, welches von zwei oder beliebig vielen gleichen oder ungleichen Wellensystemen mit kleinen Ausweichungen bewegt wird, jedes Teilchen eine Verschiebung, welche die Summe aus allen ihm durch die einzelnen Wellensysteme in dem nämlichen Augenblick mitgeteilten Verschiebungen ist. Um diese Summe zu bilden, muß man alle Hebungen zusammenzählen,

alle Senkungen abziehen; die wirklich stattfindende Bewegung des Teilchens ist sozusagen die Bilanz aus allen auf dasselbe einwirkenden Teilbewegungen. Man nennt diesen Satz das **Prinzip der Übereinanderlagerung** (Superposition) der Schwingungen, weil es in der Tat nichts anderes aussagt, als daß jedes Wellensystem sich genau so über eine bereits von Wellen bewegte Oberfläche legt, wie es sich, wenn es allein vorhanden wäre, über die ruhende Oberfläche gelegt haben würde. Jedes Wellensystem bildet sich aus, als ob die anderen gar nicht vorhanden wären, behauptet sein besonderes Dasein im Durcheinanderwogen mit den anderen und schreitet, nachdem es diese durchkreuzt und mit ihnen zusammengewirkt (interferiert) hat, auf der noch ruhigen Wasserfläche weiter, als ob es nie eine Störung erlitten hätte. Wir sehen z. B. die von den fallenden Regentropfen erregten zarten Wellenringe auf den großen durch ein Dampfboot aufgewühlten Wogen ebensogut zustande kommen wie im ruhigen See; wir sehen, wie diese Wogen, wenn sie eine vom

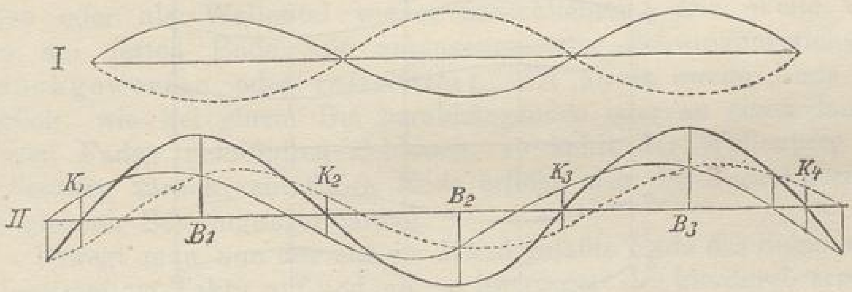

Fig. 265.
Interferenz entgegenkommender Wellen.

Wind gekräuselte Stelle durchsetzen, die kleinen Kräuselwellen auf ihren Rücken nehmen, jenseits aber, die gekräuselte Fläche gleichsam unberührt zurücklassend, in ihrer ursprünglichen Gestalt weiterschreiten.

286. **Stehende Wellen.** Besonders bemerkenswert ist die Interferenz zweier Wellen von gleicher Wellenlänge und Schwingungsweite, welche sich in entgegengesetzter Richtung fortpflanzen. Haben die beiden Wellen in einem Augenblick die Lage Fig. 265 *I*, so daß durchweg Wellenberg und Wellental zusammenfallen, so sind die Verschiebungen überall gleich und entgegengesetzt und sämtliche Teilchen befinden sich momentan in der Gleichgewichtslage. Gelangen nun die beiden Wellen, die schwach ausgezogene und die punktierte, indem sie in entgegengesetztem Sinne fortschreiten, z. B. in die Lage Fig. 265 *II*, so entsteht aus ihrem Zusammenwirken die stark ausgezogene Welle von gleicher Länge und Schwingungsdauer. In den Durchschnittspunkten bei B_1, B_2, B_3, . . . , zu welchen die zwei Wellen bei ihrem Gegenlaufe stets symmetrisch bleiben, sind die Verschiebungen gleich und gleichgerichtet, und summieren sich:

an diesen Stellen, welche je um eine halbe Wellenlänge voneinander abstehen, sind also die Teilchen um den doppelten Betrag abwechselnd nach oben und nach unten verschoben. In den Punkten K_1, K_2, K_3, ... dagegen, welche zwischen den Punkten B_1, B_2, B_3, ... gerade in der Mitte liegen, also gleichfalls unter sich je um eine halbe Wellenlänge abstehen, sind die Verschiebungen gleich und entgegengesetzt und heben sich auf. Schreiten die beiden Wellen gegeneinander weiter fort, so erkennt man, daß in den Punkten K_1, K_2, K_3, ... die Verschiebungen immer gleich und entgegen-

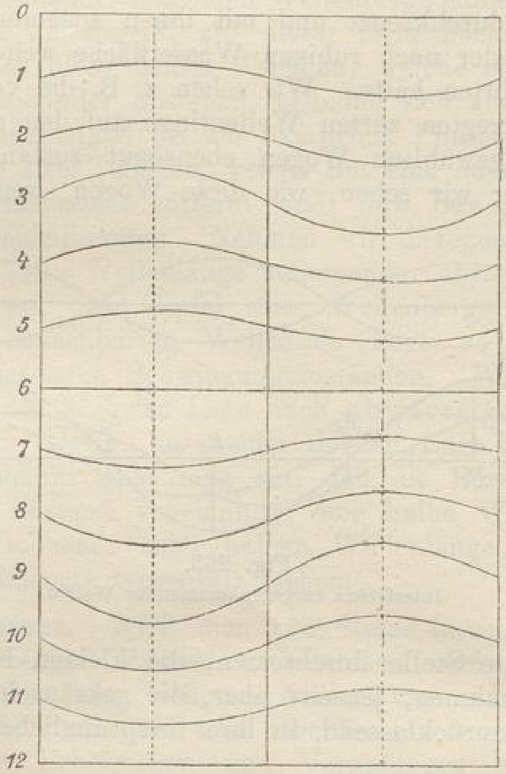

Fig. 266.
Stehende Wellen.

gesetzt, in den Punkten B_1, B_2, B_3, ... gleich und gleichgerichtet bleiben; die Teilchen K_1, K_2, K_3, ... verharren also in ihren Gleichgewichtslagen immer in Ruhe, während die Teilchen B_1, B_2 B_3 ... lebhaft abwechselnd auf- und abwärts schwingen, und ihre größten Ausweichungen erlangen, wenn die beiden Wellen von der Lage *I* aus jede um eine Viertelwellenlänge fortgeschritten sind, so daß jetzt überall Wellenberg mit Wellenberg und Wellental mit Wellental zusammenfällt. Die Gestalten, welche die resultierende Welle im Laufe einer ganzen Schwingungsdauer nach und nach annimmt, sind in Fig. 266 je nach $^1/_{12}$ Schwingungsdauer angegeben. Es ist ersichtlich, daß alle Teilchen gleichzeitig durch ihre Gleichgewichtslagen (bei 0, 6 und 12) hindurchgehen, gleichzeitig ihre größten Ausweichungen (bei 3 und 9) erreichen, und sich stets gleichzeitig in demselben Schwingungszustande befinden, wobei nur die Schwingungsweite von Stelle zu Stelle periodisch sich ändert. Die Form der Welle schreitet also nicht fort, weshalb man solche Wellen stehende nennt im Gegensatz zu den bisher betrachteten fortschreitenden Wellen, bei welchen jedes in der Fortpflanzungsrichtung folgende Teilchen später als das vorhergehende durch die Gleichgewichtslage geht. Die Punkte K_1, K_2, K_3 . . . , welche immer in Ruhe bleiben, heißen Knoten, die Punkte B_1, B_2, B_3 . . . , in welchen die lebhafteste Hin- und Herbewegung stattfindet, Bäuche.

Stehende Transversalwellen lassen sich leicht mittels eines Seiles oder eines langen schwach gespannten Kautschukschlauches hervorrufen. Ist der Schlauch an einem Ende festgeklemmt, und erteilt man dem anderen Ende durch einen plötzlichen Ruck mit der Hand eine Ausbiegung nach aufwärts, so sieht man diese als Wellenberg den Schlauch entlang laufen und von dort als Ausbiegung nach unten oder als Wellental wieder zurückkehren. Die Welle wird also am festen Ende mit entgegengesetzter Schwingungsrichtung zurückgeworfen oder reflektiert. Ist dieses zweite Ende beweglich, wie bei einem frei herabhängenden oder an einen langen dünnen Faden geknüpften Schlauch, so kehrt der Wellenberg als Wellenberg zurück; am freien Ende erfolgt also die Zurückwerfung mit gleicher Schwingungsrichtung.

Bewegt man nun das mit der Hand gefaßte Ende des Schlauches in bestimmtem Takte auf und ab, so interferiert der hierdurch erregte Wellenzug mit dem vom anderen Ende her zurückgeworfenen, und es bilden sich stehende Wellen mit Knoten und Bäuchen. Da sowohl am festen als an dem mit der Hand gehaltenen Ende ein Knoten liegen muß, und zwei benachbarte Knoten oder Bäuche immer um eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sind, so muß der Rhythmus der Bewegung so geregelt werden, daß eine ganze Anzahl halber Wellenlängen auf die Länge des Schlauches geht. Die Versuche gelingen leichter, wenn man mit der Hand kreisförmige Schwingungen ausführt, die ja als aus zwei zueinander senkrechten geradlinigen Schwingungen zusammengesetzt angesehen werden können; dann beschreiben alle bewegten Punkte des Schlauches Kreise, deren Ebenen auf der Längsrichtung des Schlauches senkrecht stehen (transversale kreisförmige Schwingungen). Sehr schön beobachtet man die stehenden Wellen an einem Zwirnfaden, den man an einer Zinke einer Stimmgabel oder an der schwingenden Feder eines magnetischen Hammers (249) befestigt; je mehr man die Spannung des Fadens und damit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit vermindert, desto größer wird die Anzahl der Knoten und Bäuche (Melde, 1889).

Mit der Machschen Wellenmaschine lassen sich die stehenden Wellen nachahmen, wenn man die Pendelkugel durch einen entsprechend gebogenen Draht in ihre größten Ausweichungen bringt, und sie dann gleichzeitig losläßt, indem man den Draht rasch zur Seite dreht. Dreht man alsdann die Schwingungsebenen um 90^0, so verwandelt sich die transversale in eine longitudinale stehende Welle; man sieht alsdann, daß an den Knoten, indem die beiderseits benachbarten Teilchen gleichzeitig gegen das ruhende Teilchen hin und von demselben wieder weg schwingen, abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen entstehen, während an den Bäuchen zwar die lebhafteste Hin- und Herbewegung, jedoch niemals Verdichtung und Verdünnung stattfindet. Auch an dem oben (S. 427) erwähnten spiralförmig gewundenen Draht kann man stehende Longitudinalwellen erzeugen; klemmt man das eine Ende fest und übt an dem anderen Ende einen Zug in der Längsrichtung, so schwingen die Windungen des sich wieder selbst überlassenen Drahtes hier lebhaft hin und her, während im Knotenpunkt am festgeklemmten Ende die Windungen abwechselnd enger zusammengeschoben und weiter auseinandergezogen werden. Zieht man die freien Enden des Schraubendrahtes auseinander, so bildet sich ein Schwingungsknoten in der Mitte. Die Bewegung der Teilchen in einer stehenden Longitudinalwelle kann auch durch die Zeichnung Fig. 266 veranschaulicht werden, wenn man sie unter einem mit der Linie 0—12 parallelen Schlitz von rechts nach links wegzieht. Man kann auch eine solche Zeichnung um eine Walze legen, so daß die Punkte 0—12 der Länge nach auf ihre Mantelfläche zu liegen kommen; wird die Walze hinter einem Schlitz um ihre damit paralelle Achse gedreht, so ahmen die durch den Schlitz sichtbaren Punkte der Kurven die Bewegung der Teilchen einer stehenden Längswelle nach, mit Knoten bei 0, 6 und 12, und Bäuchen bei 3 und 9.

Die Verschiebung, welche eine (transversale oder longitudinale) Welle in der Entfernung x von ihrem Ausgangspunkte hervorbringt, ist

$$y_1 = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} + \frac{l-x}{\lambda}\right);$$

an derselben Stelle (x) verursacht eine aus der Entfernung $2l$ ihr entgegenkommende Welle von gleicher Schwingungsweite und Wellenlänge die Ausweichung:

$$y_2 = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{2l-x}{\lambda}\right) = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} - \frac{l-x}{\lambda}\right).$$

Die aus der Interferenz beider Bewegungen hervorgehende Verschiebung im Punkte x ist demnach

$$Y = y_1 + y_2 = 2a \cos 2\pi \frac{l-x}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right).$$

In dieser Gleichung einer stehenden Welle stellt $2a \cos 2\pi \frac{l-x}{\lambda}$ die von Stelle zu Stelle periodisch sich ändernde Amplitude, $\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right)$ den allen Punkten gemeinsamen Schwingungszustand vor.

B. Schall.

(Akustik.)

287. **Schall** nennen wir jede Empfindung, welche uns durch das Gehör von außen her vermittelt wird. Bei jeder Schallempfindung können wir leicht den Körper bezeichnen, von dem der Schall ausgeht, und uns durch den Gesichts- und Gefühlssinn überzeugen, daß dieser Körper, die „Schallquelle“, sich in zitternder oder schwingender Bewegung befindet.

Bringt man ein sog. Weckerwerk, dessen Uhrwerk ein Hämmerchen gegen eine Metallglocke schlagen läßt, unter den Rezipienten der Luftpumpe, so hört man die Glockenschläge nicht mehr oder nur äußerst schwach, wenn man den Rezipienten möglichst luftleer gepumpt hat; sie werden aber nach und nach wieder ebensostark hörbar wie anfangs, wenn man die Luft allmählich wieder zutreten läßt. Im leeren Raum pflanzt sich der Schall nicht fort. Der Knall der heftigsten Explosion kann sich nicht über die Grenzen unserer Atmosphäre hinaus fortpflanzen, und ebensowenig könnten wir einen außerhalb der Atmosphäre erregten Schall vernehmen. In verdünnter Luft, z. B. auf hohen Bergen, ist die Stärke des Schalls viel geringer als in Luft von gewöhnlicher Dichte.

Nicht nur in der Luft und in den übrigen Gasarten, sondern auch in flüssigen und festen Körpern pflanzt sich der Schall fort. Ein Taucher hört, was am Ufer gesprochen wird, und die leisesten Schläge an das Ende eines langen Balkens sind einem ans andere Ende gelegten Ohr vernehmbar. Das Fadentelephon, ein bekanntes Kinderspielzeug, besteht aus zwei über Hohlzylinder gespannten Membranen, deren Mitten durch einen langen Faden verbunden sind. Gegen die eine Membran gesprochene Worte werden bei straff gespanntem Faden an der anderen deutlich gehört.

288. **Vorgang der Fortpflanzung.** Daß nicht etwa Teilchen des schallerregenden Körpers selbst oder die ihn umgebenden Luftteilchen bis zu unserem Ohre fortgeschleudert werden, ergibt sich schon aus der Tatsache, daß die Schläge des Weckers, nachdem er mit der Glasglocke bedeckt worden, zwar gedämpft aber noch deutlich genug gehört werden, denn Glas ist, wie wir wissen, für Luft- und andere Stoffteilchen undurchdringlich. Es ist vielmehr nur denkbar, daß der schallerregende Körper seine Erzitterungen auf die Luftteilchen im Innern der Glocke, diese sie sodann auf die Glasteilchen, und diese wieder auf die Teilchen der äußeren Luft nach und nach übertragen. Ein Bild von dieser Art der Fortpflanzung gibt uns eine Reihe gleicher elastischer Kugeln, die an Doppelfäden in einer Reihe nebeneinander aufgehängt sind (Perkussionsmaschine); läßt man die erste Kugel auf die zweite stoßen, so gibt sie an diese ihre Geschwindigkeit ab und kommt selbst zur Ruhe, die zweite überträgt ebenso ihre Bewegung an die dritte usf. bis zur

letzten und die ganze Reihe von Kugeln entlang läuft eine fortschreitende longitudinale Welle. Sind die Kugeln nicht alle gleich, folgt z. B. auf eine Reihe kleinerer unter sich gleicher Kugeln eine Reihe größerer ebenfalls unter sich gleicher Kugeln, so kommt an der Grenze beider Reihen die stoßende Kugel nicht zur Ruhe; es kehrt ein Teil der Welle in die zugehörige Reihe zurück, oder wird zurückgeworfen (reflektiert), während ein anderer Teil in die andere Reihe weitergeht. War die größere Kugel die stoßende, so behält sie die Richtung ihrer Bewegung bei, und erteilt der kleineren Kugel eine größere Geschwindigkeit; stößt dagegen die kleinere Kugel, so kehrt sie um, während die größere mit geringerer Geschwindigkeit vorwärtsgeht. In ähnlicher Weise pflanzen sich bei dem Versuche mit dem Weckerwerk die Erzitterungen der Metallglocke durch die Reihe der Luftteilchen als longitudinale Welle bis zur Glaswand fort; hier erfährt die Welle beim Übergang auf die größeren Massenteilchen des Glases eine teilweise Zurückwerfung; die im Glas weitergehende Welle wird beim Übergang aus dem Glas in die äußere Luft abermals teilweise zurückgeworfen und wird daher von außen nur gedämpft vernommen.

289. **Schwächung des Schalles durch Ausbreitung.** Von einem schwingenden Punkt breitet sich die Schallbewegung in Luft von gleichmäßiger Beschaffenheit kugelförmig aus, in Kugelschalen, welche sich abwechselnd im Zustand der Verdichtung und Verdünnung befinden; jeder Radius einer solchen kugelförmigen Welle heißt ein Schallstrahl, und die Schwingungen der Luftteilchen erfolgen in der Längsrichtung des Strahls.

Da die Oberflächen dieser Kugelschalen und demnach auch die in ihnen bei gleicher Dicke enthaltenen Massen im quadratischen Verhältnis ihrer Radien wachsen und sich demnach die von der Schallquelle ausgehende Bewegungsenergie auf immer größere Luftmassen verteilt, so muß die Stärke des Schalles pro Flächeneinheit mit wachsender Entfernung abnehmen, und zwar steht sie im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernung, d. h. in der zwei-, drei-, vier . . . fachen Entfernung von der Schallquelle ist die Stärke, mit welcher der Schall in unser Ohr dringt, nur noch $^1/_4$, $^1/_9$, $^1/_{16}$ . . . von derjenigen, welche wir in der Entfernung 1 vernommen hatten. Wird die allseitig freie Ausbreitung der Schallstrahlen verhindert, indem man z. B. den Schall in einer überall gleichweiten Röhre sich fortpflanzen läßt, so findet eine solche Schwächung nicht statt. Darauf beruht die Anwendung der Sprachrohre in Gasthöfen, Fabriken, auf Dampfboten usw.

290. **Fortpflanzungsgeschwindigkeit.** Zur Ermittelung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft wurden an zwei Stationen, deren Entfernung genau gemessen war, bei Nacht in vorher verabredeten Zeitpunkten Kanonen abgefeuert und an jeder Station die Zeit beobachtet, welche zwischen dem gesehenen

Lichtblitz und dem gehörten Knall verstrich (Kommission der Pariser Akademie unter A. v. Humboldt und Arago, 1822). Teilt man die gemesssene Entfernung durch den Mittelwert der Zeiten, welche der Schall brauchte, um sie hin und her zurückzulegen, so ergibt sich, unabhängig von der Windrichtung, sein Weg in einer Sekunde. Die Geschwindigkeit des Schalles wurde auf diese Weise gleich 340 m bei 16° C. gefunden; sie nimmt zu mit der Temperatur, ist aber vom Luftdruck unabhängig. In Flüssigkeiten und festen Körpern pflanzt sich der Schall mit ungleich größerer Geschwindigkeit fort, im Wasser z. B. legt er 1435 m in einer Sekunde zurück (Colladon und Sturm, 1827).

Ist V die Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen in irgend einem Mittel, so erzeugt eine Schwingung von der Dauer T eine Welle von der Länge $\lambda = VT$. Wird in einem anderen Mittel, dessen Fortpflanzungsgeschwindigkeit V' ist, eine Welle von derselben Länge λ durch eine Schwingung von der Dauer T' hervorgebracht, so ist hier $\lambda = V'T'$. Man hat daher $VT = V'T'$, oder

$$V : V' = T' : T = \frac{1}{T} : \frac{1}{T'}.$$

Man denke sich nun die Strecke λ durch Schnitte senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung in gleichviele sehr dünne Schichten zerlegt, so verhalten sich die Massen dieser Schichten wie die Dichten der beiden Mittel, und die Kräfte, unter deren Einfluß die Schichten in der Längsrichtung hin- und herschwingen, verhalten sich wie die Elastizitäten e und e'. In dem Ausdruck $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{p}}$, welcher die Schwingungsdauer angibt (20), ist demnach die Masse m der Dichte d, die Kraft p der Elastizität e proportional zu setzen. Es ergibt sich daher:

$$T : T' = \sqrt{\frac{d}{e}} : \sqrt{\frac{d'}{e'}} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{T} : \frac{1}{T'} = \sqrt{\frac{e}{d}} : \sqrt{\frac{e'}{d'}},$$

folglich:

$$V : V' = \sqrt{\frac{e}{d}} : \sqrt{\frac{e'}{d'}},$$

d. h. die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten verhalten sich direkt wie die Quadratwurzeln aus den elastischen Kräften und umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dichten der Mittel. Bei geeigneter Wahl der Einheiten kann man mit Newton (1687) setzen:

$$V = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

Bei gasförmigen Körpern ist die elastische Kraft nichts anderes als die Expansivkraft oder der Druck, und man hat statt e den Druck auf die Flächeneinheit (1 qcm), statt d die Masse der Volumeneinheit (1 ccm) zu setzen. Nun wiegt 1 ccm Luft von 0° bei 76 cm Druck 1/773 g; ist ferner s_0 das spezifische Gewicht des Gases bei 0° und 76 cm Druck, so ist dasselbe beim Druck b und bei der Temperatur $\vartheta°$, wenn $\beta = 1/273$ den Ausdehnungskoeffizienten der Gase bezeichnet:

$$s = \frac{b\,s_0}{76\,(1 + \beta\vartheta)}.$$

Die Masse der Volumeneinheit (1 ccm) beträgt demnach $s/773$ g oder

$$\frac{b\,s_0}{773 \cdot 76\,(1 + \beta\,\vartheta)} .$$

Andererseits beträgt bei dem Barometerstand b der Druck auf 1 qcm $b \cdot 13{,}595$ g, wo letztere Zahl das spezifische Gewicht des Quecksilbers auf Wasser bezogen angibt: es ist also in Dynen (12) ausgedrückt

$$e = b \cdot 13{,}595 \cdot 981 .$$

Setzt man diese Werte in die Newtonsche Formel ein, so erhält man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Gasen:

$$V = \sqrt{13{,}595 \cdot 981 \cdot 773 \cdot 76 \cdot \frac{1 + \beta\vartheta}{s_0}} .$$

Diese Geschwindigkeit der Fortpflanzung ist vom Drucke unabhängig, da bei gleichbleibender Temperatur Druck und Dichte nach dem Mariotteschen Gesetz proportional sich ändern und daher b sich weghebt.

Aus der vorstehenden Formel ergibt sich die Schallgeschwindigkeit in Luft von 0^0 ($\vartheta = 0$, $s_0 = 1$) zu 279,91 m, also erheblich kleiner als aus den Versuchen. Wie Laplace später (1816) gezeigt hat, ist in der Newtonschen Formel der Umstand nicht berücksichtigt, daß in den verdichteten Teilen der Schallwelle die Temperatur erhöht, in den verdünnten Teilen erniedrigt wird; da bei dem geringen Leitungs und Strahlungsvermögen der Luft diese Temperaturunterschiede innerhalb der kurzen Dauer einer Schwingung sich nicht ausgleichen können, so werden die Druckunterschiede, also die elastischen Kräfte, in dem Verhältnis $c_p/c_v = 1{,}41$ der spezifischen Wärmen c_p und c_v bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen vergrößert (127). Man hat also, um die Formel richtigzustellen, unter dem Wurzelzeichen noch mit c_p/c_v zu multiplizieren, und erhält für trockene atmosphärische Luft in naher Übereinstimmung mit der Erfahrung (in m ausgedrückt):

$$V = 332{,}4\sqrt{1 + \beta\vartheta} .$$

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den übrigen Gasen stehen im umgekehrten Verhältnis der Quadratwurzeln ihrer spezifischen Gewichte und im geraden Verhältnis der Quadratwurzeln aus den Werten von c_p/c_v.

Bei festen Körpern ist statt e der Elastizitätsmodul E (54) zu setzen, bei Flüssigkeiten ist e aus der Zusammendrückbarkeit abzuleiten.

291. **Zurückwerfung des Schalles.** Die Schallstrahlen werden nach ähnlichen Gesetzen zurückgeworfen und gebrochen (letzteres beim Übergang in Luft von anderer Dichte oder aus Luft in andere Körper) wie die Lichtstrahlen. Von einer ebenen Fläche werden die Schallstrahlen so zurückgeworfen, als kämen sie von einem Punkt, welcher auf der von der Schallquelle auf die Fläche gefällten Senkrechten ebensoweit hinter der Fläche liegt wie die Schallquelle vor ihr. Hieraus erklärt sich das Echo. Läßt man in einiger Entfernung von einer Mauer, einer Felswand, einem Waldrand usw. einen lauten Ruf erschallen, so hört man nach der Zeit, welche der Schall braucht, um nach der Wand und wieder zurück zum Standpunkt des Rufenden zu gelangen, den Ruf von der Wand zurückschallen. Die Wand wirft nämlich den Schall ebenso zurück wie ein Spiegel das Licht, und wir hören den zurückgeworfenen Schall gerade so,

als ob eine zweite Person, welche als Spiegelbild des Rufenden ebensoweit hinter der zurückwerfenden Fläche steht, wie dieser vor ihr, zu gleicher Zeit den nämlichen Ruf ertönen ließe. Um eine Silbe auszusprechen, braucht man mindestens $^1/_5$ Sekunde; steht man daher so weit von der Wand entfernt, daß der Schall zum Hin- und Rückweg $^1/_5$ Sekunde gebraucht, so wird der zurückgeworfene Schall gerade in dem Augenblick zurückkehren, in welchem das Aussprechen einer Silbe vollendet ist. Da der Schall in einer Sekunde 340 m zurücklegt, muß man daher, um ein einsilbiges Echo zu vernehmen, mindestens 34 m von der Wand entfernt sein; steht man zwei-, drei-, vier- . . . mal soweit von der zurückwerfenden Fläche entfernt, so wird man zwei, drei, vier . . . Silben aussprechen können, ehe die erste zurückgekehrt, und sonach ein zwei-, drei-, vier- . . . silbiges Echo vernehmen können. Ist die Fläche weniger als 34 m entfernt, so wird der zurückgeworfene Schall schon eintreffen, ehe die Silbe vollständig ausgesprochen ist, und sich mit dieser teilweise vermischen. In Kirchen und großen Sälen macht sich dieser Nachhall oft störend bemerkbar. Sind mehrere zurückwerfende Flächen in verschiedenen Entfernungen vorhanden, so entsteht ein mehrfaches Echo. Am Lurleifelsen z. B. hört man einen Pistolenschuß 17—20mal mit wechselnder Stärke ähnlich dem Donnerrollen wiederholt.

Stehen sich zwei Hohlspiegel gegenüber, und bringt man in den Brennpunkt des einen eine Taschenuhr, so hört ein Beobachter, der sein Ohr in den Brennpunkt des anderen Spiegels bringt, selbst in beträchtlicher Entfernung deutlich das Ticken der Uhr; die von letzterer ausgehenden Schallstrahlen werden nämlich von dem ersten Spiegel in paralleler Richtung auf den zweiten geworfen und von diesem in seinem Brennpunkt gesammelt. Läßt man die vom ersten Spiegel zurückkommenden parallelen Strahlen auf eine Glasplatte fallen, so werden sie von dieser unter gleichen Winkeln zurückgeworfen und können durch Drehen der Platte nach jeder beliebigen Richtung gelenkt werden.

Auf die Zurückwerfung des Schalles gründen sich auch das Sprachrohr und das Hörrohr. Das Sprachrohr ist ein mit Mundstück versehenes, nach vorn sich trichterförmig erweiterndes Rohr aus Blech, Pappe oder Guttapercha, durch welches die hineingesprochenen Worte auf größere Entfernung hörbar gemacht werden. Die von dem Mundstück ausgehenden Schallstrahlen werden nämlich an der Wand des Rohres so zurückgeworfen, daß sie dasselbe sämtlich nahezu in der Richtung, nach welcher das Rohr gewendet ist, verlassen und nun, ohne sich durch Ausbreitung abzuschwächen, gesammelt in die Ferne dringen. Durch ein Sprachrohr von 1,5—2 m Länge und 15—25 cm Öffnung, wie sie auf Schiffen gebräuchlich sind, kann man sich auf 1500—1900 m Entfernung verständlich machen. Das Hörrohr hat die umgekehrte Aufgabe, die in seinen Trichter eintretenden Schallstrahlen durch Zurückwerfen in der in den Gehörgang gesteckten engen Mündung zu vereinigen und dadurch für Schwerhörige ein deutlicheres Hören zu vermitteln. Das Stethoskop ist ein Hörrohr für Ärzte zum Behorchen (Auskultieren) der Atem- und Herzgeräusche.

Ein im Mittelpunkt eines kugelförmigen Raumes erzeugter Schall wird von allen Seiten wieder nach diesem Mittelpunkt zurückgeworfen. Schallwellen, welche von dem einen Brennpunkt einer Ellipse ausgehen, werden an ihr so zurückgeworfen, daß sie in dem anderen Brennpunkte gleichzeitig zusammentreffen; in einem Saal, dessen Wände elliptisch gewölbt sind, wird man daher die an dem einen Brennpunkt leise gesprochenen Worte am andern deutlich vernehmen, während im ganzen übrigen Raume nichts gehört wird. Gebäude, welche absichtlich oder zufällig so gebaut sind, daß das, was an einem Punkt in ihrem Innern leise gesprochen wird, nur an einem bestimmten anderen Punkt gehört werden kann, nennt man Sprachgewölbe. — Säle für Parlamente und Konzerte müssen akustisch, d. h. so gebaut sein, daß die von der Rednerbühne oder dem Orchester ausgehenden Schallwellen nach dem Zuhörerraum zurückgeworfen werden und keine anderen unzweckmäßigen oder störenden Zurückwerfungen erleiden.

Die Schallwellen werden nicht nur an festen Wänden, sondern auch überall da zurückgeworfen, wo sie in ein Mittel von anderer Beschaffenheit, z. B. aus dichterer in dünnere Luft oder umgekehrt, überzugehen genötigt sind. Bei Tage wird der Schall viel weniger weit gehört als bei Nacht, weil im ersteren Falle der Schall durch die zahlreichen Zurückwerfungen, welche er an den ungleich erwärmten und deswegen ungleich dichten auf- und absteigenden Luftströmen erleidet, geschwächt wird, während er sich in der gleichmäßig erwärmten Nachtluft ungehindert fortpflanzt. Tyndall hat beobachtet, daß die Nebelsignale, welche an den Küsten zur Warnung der Seefahrer durch Dampfpfeifen oder große Sirenen gegeben werden, bei nebeligem Wetter viel weiter zu hören sind als bei klarer Luft, weil letztere durch die Sonnenstrahlen ungleich erwärmt und dadurch für den Schall weniger durchlässig oder gleichsam durch eine „akustische Wolke“ getrübt ist.

292. **Verschiedenartige Schallempfindungen. Sirene.** Die Schallempfindungen sind sehr mannigfaltiger Art, und dementsprechend ist unsere Sprache sehr reich an Bezeichnungen, um deren Eigenart auszudrücken. Durch eine einzelne heftige Erschütterung wird ein Knall hervorgebracht; durch eine unregelmäßige Aufeinanderfolge von Erschütterungen entstehen die Geräusche (Rauschen, Brausen, Prasseln, Rasseln, Plätschern, Knistern, Klirren, Knirschen usw.). Ein Klang oder Ton dagegen wird durch eine regelmäßige in gleichen Zeitabschnitten sich wiederholende (periodische) oder „schwingende“ Bewegung des tönenden Körpers hervorgebracht. Man kann z. B. einen Klang hervorbringen durch ein Kartenblatt, das man gegen den Rand eines

gleichmäßig rotierenden Zahnrads (Savart) hält, oder durch Luftstöße, welche nach gleichen Zeiten in derselben Weise wiederkehren; letzteres geschieht mittels der Sirene, deren einfachste von Seebeck (1843) angegebene Form in einer runden Papp- oder Metallscheibe besteht, in welche mehrere kreisförmige Reihen von unter sich gleichweit abstehenden Löchern eingeschlagen sind. Bläst man durch ein Glasröhrchen gegen die innerste Lochreihe, während die Scheibe mittels einer Schwungmaschine in rasche gleichmäßige Umdrehung versetzt wird, so wird dem aus dem Röhrchen entweichenden Luftstrom der Weg geöffnet, sobald ein Loch vor seine Mündung tritt, dagegen versperrt, sobald ein undurchbohrter Teil der Scheibe dort ankommt. Die so in gleichen Zwischenräumen aufeinander folgenden Luftstöße bringen in unserem Ohr die Empfindung eines Klanges von bestimmter Tonhöhe hervor. Wird nun bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit eine der äußeren Lochreihen angeblasen, welche mehr Löcher enthält und deshalb in der gleichen Zeit eine größere Anzahl von Luftstößen gibt, so beurteilen wir den jetzt gehörten Klang als höher gegen den vorigen und erkennen daraus, daß ein Ton um so höher ist, je größer die in gleicher Zeit erfolgende Anzahl seiner Bewegungsperioden oder je größer seine Schwingungszahl ist. Eine vollkommenere Sirene, welche durch den Luftstrom selbst in Umdrehung versetzt wird, hat Cagniard-Latour konstruiert. Fig. 267 zeigt sie in der noch mehr vervollkommneten Gestalt, welche Dove ihr gegeben hat. Eine wagerechte von vier Löcherreihen durchbohrte Metallscheibe *de* dreht sich sehr leicht um eine lotrechte Achse. Die Scheibe befindet sich über einem zylindrischen Windkasten *C*, dessen Deckel von entsprechenden Löchern durchbohrt ist. Die Löcher des Deckels sowohl wie diejenigen der Scheibe sind mit entgegengesetzter Neigung schräg gebohrt, so daß der aus einem Loch des Deckels schief austretende Luftstrom ungefähr rechtwinklig gegen die Wände der Löcher der Scheibe stößt und diese dadurch in Umdrehung versetzt. Jeder Lochreihe entspricht unter dem Deckel noch ein drehbarer Metallring mit ebensoviel Löchern wie die zugehörige Reihe; diese Ringe können jeder für sich mittels federnder Stifte *mnop* entweder so gestellt werden, daß ihre undurchbohrten Teile die Löcher des Windkastendeckels schließen, oder so, daß die Löcher eines Ringes auf die Löcher der zugehörigen Reihe des Deckels passen. Durch Drücken an einen

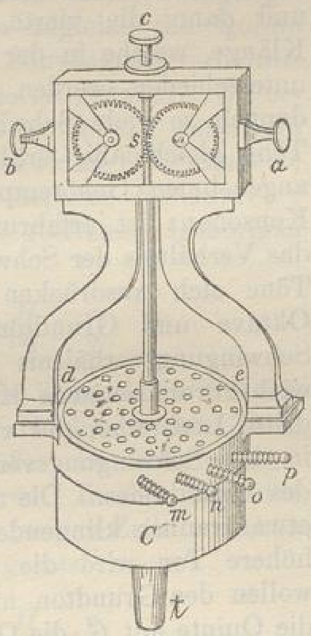

Fig. 267.
Sirene.

oder mehrere Stifte kann man daher nach Belieben eine oder mehrere Lochreihen anblasen. Der Windkasten wird mittels des Rohres *t* auf einen Blasetisch aufgesetzt. Die Achse der Scheibe trägt oben eine Schraube ohne Ende *s*, welche in die Zahnräder eines Zählwerkes eingreift, an dessen (in der Zeichnung nicht sichtbaren) Zifferblättern die Anzahl der in gemessener Zeit stattgehabten Umdrehungen abgelesen und danach die Schwingungszahl für eine Sekunde bestimmt werden kann. Durch einen Druck auf den Knopf *a* kann das Zählwerk in Tätigkeit gesetzt, durch einen Druck auf *b* wieder ausgeschaltet werden.

293. **Tonleiter.** Die erste Lochreihe unserer Sirene enthält 8, die zweite 10, die dritte 12, die vierte 16 Löcher. Wird die erste und dann die vierte Lochreihe angeblasen, so erhält man zwei Klänge, welche in der Musik als Grundton (Prime) und Oktave unterschieden werden. Die Oktave macht also in derselben Zeit doppelt so viele Schwingungen wie der Grundton. Läßt man beide Töne gleichmäßig erklingen, so verschmelzen sie ungestört zu einer angenehmen Gehörempfindung: sie bilden eine Konsonanz. Eine Konsonanz ist erfahrungsgemäß um so vollkommener, je einfacher das Verhältnis der Schwingungszahlen der beiden zusammenklingenden Töne sich ausdrücken läßt. Nächst dem Einklang (1 : 1) bilden Oktave und Grundton die vollkommenste Konsonanz, denn ihr Schwingungsverhältnis ist das denkbar einfachste, nämlich 2 : 1. Die nächst vollkommene Konsonanz wird erhalten durch die erste und dritte Lochreihe; der von letzterer erzeugte Ton steht zum Grundton in dem Schwingungsverhältnis 12 : 8 oder 3 : 2 und heißt die Quinte des Grundtones. Die erste und zweite Lochreihe geben das schon etwas rauher klingende Schwingungsverhältnis 10 : 8 oder 5 : 4. Der höhere Ton wird die große Terz des Grundtones genannt. Wir wollen den Grundton mit dem Buchstaben *C*, seine große Terz mit *E*, die Quinte mit *G*, die Oktave mit *c* bezeichnen. Den angenehmen Zusammenklang dreier oder mehrerer Töne nennt man einen Akkord. Grundton, große Terz und Quinte (*C E G*) bilden zusammen den Dur-Akkord. Indem man je zwei Lochreihen der Sirene noch in anderer Weise zusammenklingen läßt, ergeben sich noch andere Konsonanzen. Die vierte und dritte Lochreihe geben das Schwingungsverhältnis 16 : 12 oder 4 : 3, dasjenige der Quarte; wir bezeichnen die Quarte von *C* mit *F*. Die dritte und zweite Reihe liefern das Verhältnis 12:10 oder 6:5. Wir nennen hier den höheren Ton die kleine Terz des tieferen und bezeichnen ihn in Beziehung auf den Grundton *C* mit *Es*. Überblicken wir vorläufig diese Reihe von Klängen, welche auch bei geänderter Drehungsgeschwindigkeit ihre musikalische Eigenart beibehält, so erhalten wir, wenn die kleine Terz weggelassen wird, folgende Zusammenstellung, bei der unter der Bezeichnung des Klanges sein Schwingungsverhältnis zum Grundton angegeben ist:

$$\begin{matrix} C & E & F & G & c \\ 1 & {}^5/_4 & {}^4/_3 & {}^3/_2 & 2. \end{matrix}$$

Um den Anforderungen der Musik zu genügen, muß jeder Klang wieder der Grundton eines Dur-Akkordes sein, d. h. man muß von jedem Ton aus wieder in Terzen und Quinten aufsteigen können. Nun müßte die Quinte von G $^3/_2$ mal soviel Schwingungen machen wie G, also $^3/_2 \times {}^3/_2 = {}^9/_4 = 2^1/_4$. Der so gefundene Klang ist höher als die Oktave c; die nächst niedere Oktave des Tones $^9/_4$ dagegen hat die Schwingungszahl $^9/_8$ und liegt innerhalb unserer Oktave; den entsprechenden Klang bezeichnet man mit D und nennt ihn die Sekunde von C. Die große Terz von G hat die Schwingungszahl $^3/_2 \times {}^5/_4 = {}^{15}/_8$; sie heißt die Septime des Grundtones und wird mit H bezeichnet. Der Quinte des Tones F entspricht die Schwingungszahl $^4/_3 \times {}^3/_2 = 2$; die Oktave von C ist also zugleich die Quinte von F. Die große Terz von F besitzt das Schwingungsverhältnis $^4/_3 \times {}^5/_4 = {}^5/_3$, wird mit A bezeichnet und Sexte genannt. So erhalten wir die diatonische (Dur-) Tonleiter, welche innerhalb einer Oktave aus folgenden Tönen: Grundton oder Prime C, Sekunde D, große Terz E, Quarte F, Quinte G, Sexte A, Septime H, Oktave c besteht, mit den in der folgenden Reihe darunter gesetzten zugehörigen Schwingungsverhältnissen:

$$\begin{array}{cccccccc} C & D & E & F & G & A & H & c \\ 1 & ^9/_8 & ^5/_4 & ^4/_3 & ^3/_2 & ^5/_3 & ^{15}/_8 & 2. \end{array}$$

Dividiert man die Schwingungszahl jedes dieser Töne durch die des vorhergehenden, so erhält man das Intervall der beiden Töne, d. h. die Zahl, welche angibt, wievielmal größer die Schwingungszahl des Tones ist als die des nächst niedrigeren. In der folgenden Reihe sind die Werte dieser Intervalle in der zweiten Zeile zwischen die in der ersten Zeile stehenden Tonzeichen gesetzt:

$$\begin{array}{ccccccccccccccc} C & & D & & E & & F & & G & & A & & H & & c \\ & ^9/_8 & & ^{10}/_9 & & ^{16}/_{15} & & ^9/_8 & & ^{10}/_9 & & ^9/_8 & & ^{16}/_{15}. & \end{array}$$

Man sieht, daß die Intervalle in der diatonischen Tonleiter keineswegs gleich sind. Die Intervalle zwischen Terz und Quarte und zwischen Septime und Oktave ($^{16}/_{15}$) sind bedeutend kleiner als die übrigen. Man sagt daher, das Intervall von E zu F und von H zu c betrage einen halben Ton, während man die übrigen Intervalle als solche ganzer Töne rechnet. Um ein Fortschreiten nach gleichmäßigeren Intervallen möglich zu machen, müssen daher zwischen den ganzen Tönen noch halbe Töne eingeschaltet werden, und die ganze aus zwölf Tönen bestehende Tonreihe einer Oktave (die chromatische Tonleiter) lautet alsdann:

C Cis D Dis E F Fis G Gis A B H c.

Da jedoch auch die ganzen Töne keine gleichen Intervalle besitzen, sondern von C zu D, von F zu G, von A zu H um einen großen ganzen Ton ($^9/_8$), von D zu E und von G zu A um einen kleinen ganzen Ton ($^{10}/_9$) fortgeschritten wird, so sind auch in der chromatischen Tonleiter die Intervalle nicht einander gleich, ein Übelstand, der es unmöglich macht, von jedem beliebigen Ton als Grundton aus in gleicher Weise aufzusteigen. Schreitet man z. B. in reinen Terzen fort, so kommt man zu einer unreinen Oktave, ebenso beim Fortschreiten in reinen Quinten. Da aber die Oktave die vollkommenste Konsonanz bildet, deren Unreinheit am unangenehmsten empfunden wird, so opfert man lieber die Reinheit der übrigen Töne, indem man sie, wie die Musiker sagen, etwas ober- oder unterhalb ihrer von der diatonischen Tonleiter geforderten Höhe „schweben" läßt, und hält die Reinheit der Oktaven mit Strenge aufrecht. Eine solche Ausgleichung heißt Temperatur. Die gleichschwebende Temperatur, welche die einfachste und verbreitetste ist und bei allen musikalischen Instrumenten mit fester Stimmung (z. B. dem Piano) angewandt wird, nimmt alle Intervalle einander gleich; da in der chromatischen Tonleiter 12 Tonstufen vorhanden sind, so muß das Intervall eines Halbtones so gewählt werden, daß es, zwölfmal wiederholt, zur reinen Oktave führt, d. h. zu einer Schwingungszahl, welche doppelt so groß ist wie diejenige des Grundtones; wenn also x das gesuchte Intervall bezeichnet, so muß $x^{12} = 2$ sein. Dieses Intervall wird daher ausgedrückt durch die Zahl $\sqrt[12]{2} = 1{,}05946$. Man gelangt so zur gleichschwebenden Tonleiter mit folgenden Schwingungsverhältnissen (die reinen Verhältnisse der diatonischen Tonleiter stehen in Klammern daneben):

C	1,00000	*G* (1,500) . .	1,49831
Cis	1,05946	*Gis*	1,58740
D (1,125) . .	1,12246	*A* (1,667) . .	1,68179
Dis	1,18921	*B*	1,78180
E (1,250) . .	1,25992	*H* (1,875) . .	1,88775
F (1,333) . .	1,33484	*c*	2,00000
Fis	1,41421		

in welcher jede Schwingungszahl aus der des vorhergehenden Halbtones durch Multiplikation mit der Zahl 1,05946 erhalten wird.

294. **Absolute Schwingungszahlen.** Bisher wurden bloß die Schwingungsverhältnisse der Töne innerhalb einer Oktave, nicht aber ihre absoluten Schwingungszahlen in Betracht gezogen. Kennt man aber für einen dieser Töne die absolute Schwingungszahl, d. h. die Anzahl seiner Schwingungen in einer Sekunde, so kennt man sie für alle, weil ja die Schwingungsverhältnisse bekannt sind.

Zur Bestimmung absoluter Schwingungszahlen kann die Sirene dienen. Gesetzt, man wollte die Schwingungszahl einer Stimmgabel ermitteln, so gibt man der Sirene eine solche Umdrehungsgeschwindigkeit, daß eine ihrer Löcherreihen denselben Ton gibt wie die Stimmgabel; aus der am Zählwerk abgelesenen Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde und der Anzahl der Löcher ergibt sich alsdann die Anzahl der Schwingungen der Stimmgabel in einer Sekunde.

Als Grundlage für die Stimmung der musikalischen Instrumente 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		Internationale Stimmung	Physikalische 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 voraneilten 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 $= {}^{340}/_{435} = 0{,}782$ m $= 782$ 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 $^1/_2$, $^2/_2$, $^3/_2$, $^4/_2$ . . . Wellenlängen vom Boden der Röhren entfernt sind. In den Punkten dagegen, welche um $^1/_4$, $^3/_4$, $^5/_4$, $^7/_4$ . . . 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 $^1/_4$ oder $^3/_4$ oder $^5/_4$ 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 Erklingen 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

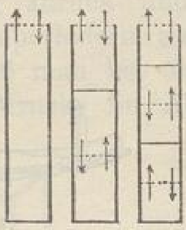

Fig. 268.
Schwingungsformen einer einerseits geschlossenen Röhre.

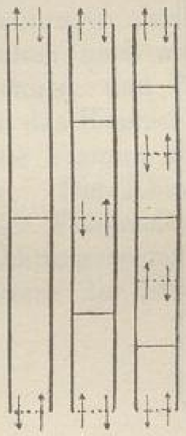

Fig. 269.
Schwingungsformen einer beiderseits offenen Röhre.

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 $^1/_2$ oder $^2/_2$ oder $^3/_2$ 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*

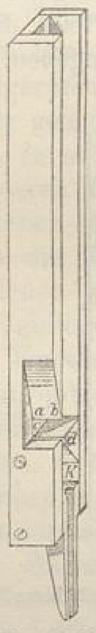

Fig. 270.
Orgelpfeife.

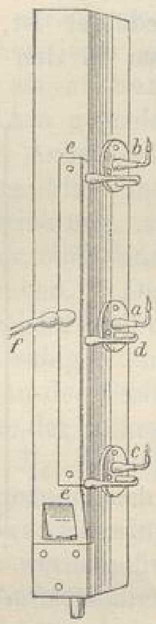

Fig. 271.
Pfeife mit manometrischen Flammen.

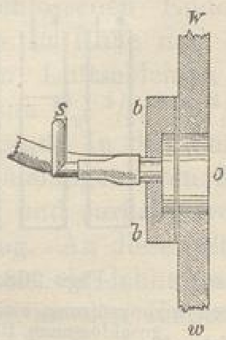

Fig. 272.
Manometrische Kapsel.

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 Schwingungsknoten 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 *w w* ist durch ein dünnes Kautschukhäutchen von dem Innenraum der Kapsel *b b* getrennt; in diesen aber wird durch das Kautschukröhrchen *d* aus dem Kästchen *e e* (Fig. 271) Leuchtgas geleitet, das nach *e e* durch den Kautschukschlauch *f* gelangt. Aus der Kapsel *b b* 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-

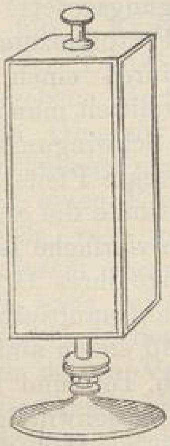

Fig. 273.
Rotierender Spiegel.

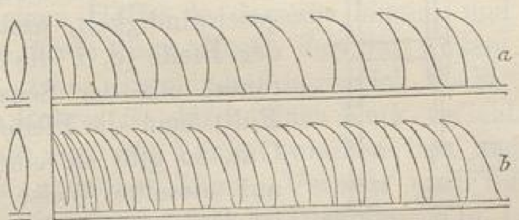

Fig. 274.
Flammenbilder im rotierenden Spiegel.

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 abstehen wie die vorigen (Fig. 274*b*).

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.

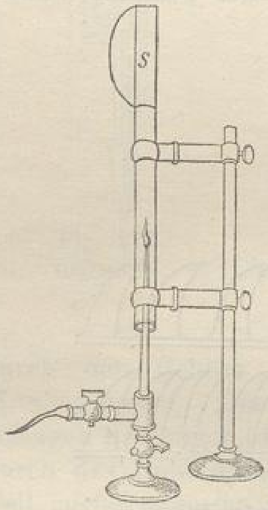

Fig. 275.
Singende Flamme.

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 Mittönen 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 hervorrufen. 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 $16^2/_3$-, 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

der Dichte d eines festen Körpers ergibt sich sodann dessen Elastizitätsmodul $E = V^2 d$ (290).

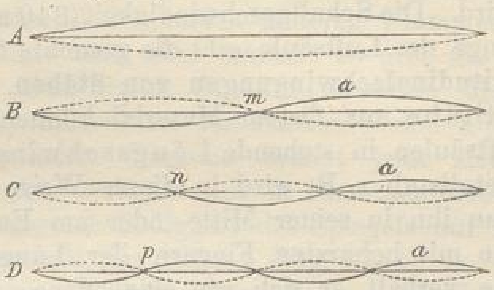

Fig. 276.
Schwingungsformen einer Saite.

299. **Saiten.** Saiten sind fadenförmige Körper, welche, wenn man sie durch Zupfen oder Anschlagen oder durch Streichen mit dem Violinbogen aus ihrer durch Spannung hervorgerufenen geradlinigen Gleichgewichtslage bringt, in stehende Quer- oder Transversalschwingungen geraten, indem ihre Teilchen in zur Längsrichtung der Saite senkrechten Bahnen gleichzeitig hin und her schwingen (Fig. 276). Um die Schwingungsgesetze der Saiten zu erforschen, kann man sich des Monochords (Fig. 277) bedienen, eines Resonanzkastens, auf dem zwischen den beiden Stegen a und b die Saiten entweder mittels des Stimmstockes s oder durch Gewichte P ausgespannt werden. Es ergibt sich, daß die Schwingungszahl einer Saite um so größer ist, je kürzer und je dünner sie ist; spannt man sie mit dem vierfachen Gewicht, so gibt sie die Oktave ihres ursprünglichen Tones, also eine doppelt so große Schwingungszahl, d. h. die Schwingungszahl ist der Quadratwurzel aus der Spannung proportional; macht man sie aus schwererem Material, so gibt sie einen tieferen Ton, und zwar findet man, daß die Schwingungszahl der Quadratwurzel aus dem spezifischen Gewicht umgekehrt proportional ist. Schwingt die Saite als Ganzes (Fig. 276 A), so gibt sie ihren Grundton; sie kann sich aber auch durch ruhende

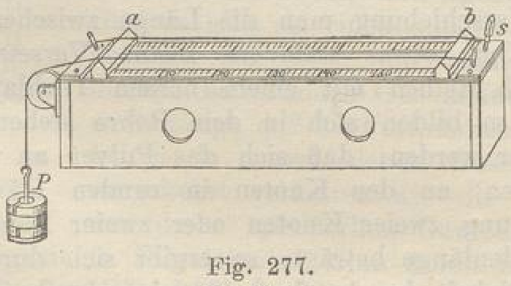

Fig. 277.
Monochord.

Punkte (Schwingungsknoten) in 2, 3, 4 . . . schwingende Teile (Bäuche) zerlegen und gibt dann die zum Grundton harmonischen Obertöne, deren Schwingungszahlen 2-, 3-, 4- . . . mal so groß sind wie diejenige des Grundtones. Um die Schwingungsformen B, C, D (Fig. 276) hervorzurufen, berührt man die Saiten bei m, n, p mit einem Pinsel und streicht oder zupft bei a. Die Schwingungsknoten können sichtbar gemacht werden, indem man an den Knoten sowohl als an den Bäuchen Papierreiterchen aufsetzt; an diesen Punkten werden sie abgeworfen, an jenen bleiben sie sitzen.

Die Schwingungszahl N des Grundtones einer Saite wird gegeben durch den Ausdruck

$$N = \frac{1}{l\,d}\sqrt{\frac{g\,S}{s\,\pi}},$$

wenn l ihre Länge, d die Dicke, S die Spannung, s das spezifische Gewicht bedeutet, und $g = 9{,}81$, $\pi = 3{,}14159$ ist (Taylorsche Formel, 1716).

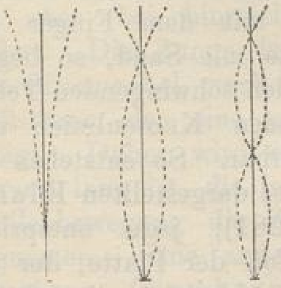

Fig. 278.
Schwingungsformen eines am einen Ende festgeklemmten Stabes.

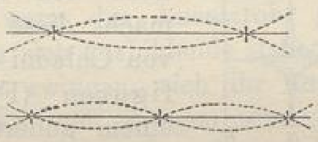

Fig. 279.
Schwingungsformen eines an beiden Enden freien Stabes.

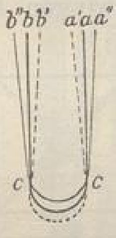

Fig. 280.
Stimmgabel.

300. **Transversalschwingungen von Stäben.** Während einer Saite die Fähigkeit, nach dem Anschlagen in ihre Gleichgewichtslage zurückzukehren, durch eine äußere Kraft, die Spannung, mitgeteilt werden muß, besitzen Stäbe in sich selbst schon die zum Schwingen erforderliche Elastizität. Am einen Ende eingeklemmt, ist ein Stab der in Fig. 278 dargestellten Schwingungsformen fähig, indem er entweder als Ganzes oder mit 1, 2, 3 . . . Knoten schwingt; an einem Glasfaden von geeigneter Länge, den man an einer Zinke einer Stimmgabel befestigt, lassen sich die Schwingungsknoten leicht beobachten. Sind beide Enden frei, so besitzt der Stab in seiner einfachsten Schwingungsart bereits zwei Knoten (Fig 279), welche etwa um $^1/_5$ der Stablänge von den Enden abstehen, und in welchen der Stab unterstützt werden muß, um ungehindert schwingen zu können. Die Schwingungszahl eines Stabes steht im geraden Verhältnis seiner Dicke, im umgekehrten Verhältnis des Quadrats seiner Länge, ist aber unabhängig von seiner Breite. Die Obertöne, welche den höheren Schwingungsformen entsprechen, sind zum Grundton nicht harmonisch, sondern steigen viel rascher in die Höhe. Die Längen gleichdicker Stäbe, deren Grundtöne die Noten der Tonleiter geben sollen, müssen sich umgekehrt verhalten wie die Quadratwurzeln der Schwingungszahlen.

Die Schwingungszahl N eines Stabes wird ausgedrückt durch

$$N = C\frac{d}{l^2}\sqrt{\frac{gE}{s}},$$

wo E den Elastizitätsmodul, s das spezifische Gewicht und C einen konstanten Faktor bezeichnet, der von der Art der Einklemmung oder Unterstützung und von der Anzahl der Schwingungsknoten abhängig ist.

Bei einem gebogenen Stab liegen die beiden Knoten seiner Mitte näher als bei einem geraden; eine **Stimmgabel** ist ein hufeisenförmig gebogener Stab, der so stark zusammengebogen ist, daß die beiden Schwingungsknoten (Fig. 280 *c*, *c*) der Biegung nahe zu liegen kommen.

301. **Schwingende Platten.** Platten können sich in mannigfaltiger Weise durch Knotenlinien abteilen, wenn man sie am Rand mit dem Violinbogen streicht und gewisse Punkte der Platten durch Festklemmen oder durch Berühren mit dem Finger am Schwingen hindert. Bestreut man die Platte mit Sand, so begibt sich dieser von den schwingenden Teilen nach den ruhenden Knotenlinien und macht diese sichtbar. So entstehen die von Chladni zuerst dargestellten Klangfiguren (Fig. 281); jede entspricht einem anderen Ton der Platte, der um so höher ist, je zahlreicher die schwingenden Abteilungen der Platte sind. In der Zeichnung sind die Punkte, welche man, um die betreffende Figur zu erhalten, festhalten muß, mit *a*, der Punkt, wo der Violinbogen anzusetzen ist, mit *b* bezeichnet. Kreisförmige Platten, in der Mitte eingeklemmt und am Rande gestrichen, teilen sich durch ruhende Durchmesser in 4, 6, 8 . . . gleiche Sektoren. Zwei angrenzende Abteilungen einer Platte schwingen immer entgegengesetzt. Glocken sind als schalenförmig gekrümmte Platten zu betrachten; beim Tönen zerlegen sie sich ebenfalls in schwingende Abteilungen, welche durch ruhende Knotenlinien voneinander getrennt sind.

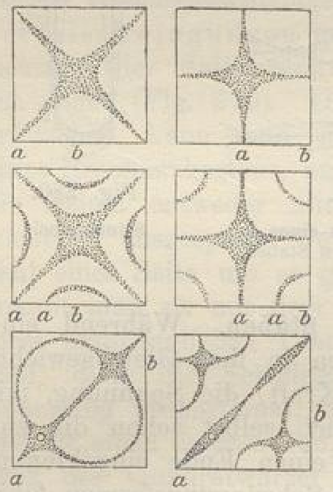

Fig. 281.
Chladnis Klangfiguren.

Bei Platten aus demselben Material, die ähnliche Formen, aber verschiedene Dimensionen haben, sind bei gleicher Schwingungsform die Schwingungszahlen proportional den Dicken und umgekehrt proportional den Flächen. Haben die Dimensionen nach allen drei Richtungen dasselbe Verhältnis, so kann man auch sagen, die Schwingungszahlen stehen im umgekehrten Verhältnis der linearen Dimensionen oder, da das Gewicht bei Platten aus demselben Stoff dem Volumen proportional ist, die Schwingungszahlen verhalten sich umgekehrt wie die Kubikwurzeln aus den Gewichten.

302. **Zungenpfeifen.** Unter einer Zunge versteht man einen elastischen Metallstreifen, der, an seinem einen Ende befestigt, nach dem Gesetz der Stäbe schwingt und durch seine Schwingungen einen

Luftstrom in regelmäßigen Zwischenräumen unterbricht. Dieser Luftstrom dringt aus dem Rohr *pp* der Zungenpfeife (Fig. 282), welche mit ihrem Fuß auf ein Gebläse aufgesetzt ist, in die halbzylinderförmige Messingrinne *rr* (Kanüle), deren Schlitz von der schwingenden Zunge *l* abwechselnd geöffnet und geschlossen wird, und entweicht durch die Öffnung *v* ins Freie. Durch den Holzpfropf *ss*, mit welchem das Zungenwerk auf das Rohr der Pfeife aufgesetzt ist, ist der Stimmdraht *d* gesteckt, durch dessen Niederdrücken oder Hinaufziehen man die Zunge höher oder tiefer stimmen kann. Zur Verstärkung und Abänderung des Tones kann auf die Öffnung *v* ein kegelförmiger Schalltrichter aufgesetzt werden, welcher, wenn er nur kurz ist, auf die Schwingungszahl des Grundtones der Zunge keinen merklichen Einfluß übt, sie aber bei hinreichender Länge wesentlich abändert. Die Zunge ist nämlich weder so starr wie eine Stimmgabel, noch so nachgiebig wie der zitternde Luftstrom, der eine gewöhnliche Pfeife zum Tönen bringt. Daher wird erst, wenn das Ansatzrohr genügend lang ist, die in ihm sich ausbildende stehende Wellenbewegung die Zunge zwingen, sich ihr anzubequemen. Eine andere Art von Zungen sind die häutigen (membranösen) Zungen; sie werden durch zwei häutige elastische Platten oder Bänder (z. B. von Kautschuk) gebildet, welche einen schmalen, zwischen ihnen befindlichen Spalt durch ihre Schwingungen abwechselnd öffnen und schließen und so den aus dem Spalt dringenden Luftstrom rhythmisch unterbrechen. Durch stärkere Spannung der Bänder wird die Tonhöhe gesteigert. Das menschliche Stimmorgan ist nichts anderes als eine membranöse Zungenpfeife, in welcher die zu beiden Seiten der Stimmritze ausgespannten Stimmbänder als Zungen wirken.

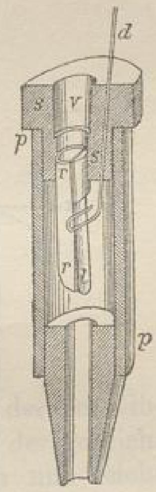

Fig. 282.
Zungenpfeife.

303. **Zusammensetzung rechtwinkliger Schwingungen.** Ein Stäbchen von rechteckigem Querschnitt, welches an einem Ende *A* befestigt ist (Fig 283), kann sowohl in der Richtung *ab* als in der dazu senkrechten Richtung *cd* in Schwingungen versetzt werden, deren Schwingungszahlen sich verhalten wie die Dicken des Stäbchens nach diesen Richtungen. Durch einen schiefen Stoß werden beide Schwingungsarten gleichzeitig wachgerufen, und das freie Stabende beschreibt eine krumme Linie (Fig. 284), deren Gestalt von dem Verhältnis der Schwingungszahlen abhängig ist. Sind die Schwingungszahlen einander gleich oder ist ihr Verhältnis 1 : 1, so stellt die Schwingungsfigur einen Kreis oder eine Ellipse dar; ist das Verhältnis 1 : 2 (Grundton und Oktave), so hat die Figur die Form einer 8 usf. Man kann diese zierlichen Figuren sehr schön beobachten an Stäbchen, die oben glänzende Knöpfchen tragen (Wheatstones Kaleidophon, 1827). Nach einem von Lissajous (1847) angegebenen Verfahren können diese Schwingungsfiguren mittels eines Lichtstrahles auf

einem Schirm entworfen werden. Zwei Stimmgabeln R und S (Fig. 285), von welchen jene lotrecht, diese wagerecht aufgestellt ist, tragen bei C und B kleine Spiegel. Der von der Lampe A kommende Lichtstrahl AB wird von B nach C, von C auf einen Schirm bei D geworfen und zeichnet hier, wenn beide Gabeln in Ruhe sind, einen Lichtpunkt. Schwingt die Gabel R allein, so erscheint statt des Lichtpunktes ein senkrechter, dagegen wenn S allein schwingt, ein wagerechter Lichtstreifen; schwingen aber beide Stimmgabeln gleichzeitig,

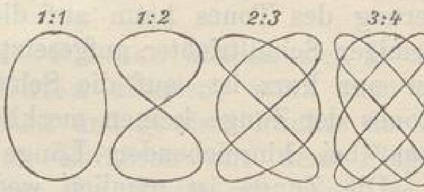

Fig. 284.
Schwingungsfiguren.

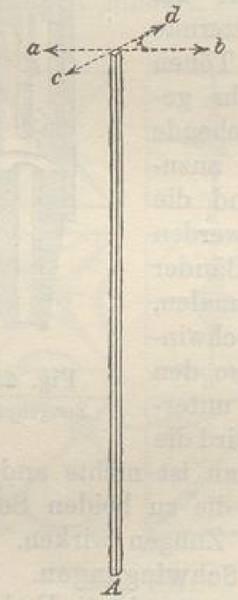

Fig. 283.
Zusammengesetzte Schwingungen eines Stäbchens.

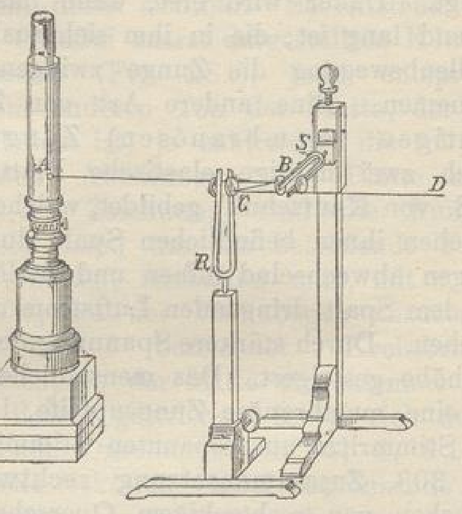

Fig. 285.
Optische Methode der Vergleichung zweier Stimmgabeln nach Lissajous.

so erblickt man eine jener krummlinigen Figuren, aus deren Gestalt auf das Schwingungsverhältnis der beiden Gabeln geschlossen werden kann.

304. **Vibrographie.** Man kann eine Stimmgabel ihre Schwingungen aufzeichnen lassen, wenn man eine ihrer Zinken mit einer Spitze (Fig. 286 r) aus dünnem Messingblech versieht und diese Spitze, während die Stimmgabel schwingt, über eine berußte Glasplatte hinführt, oder wenn man einen berußten Zylinder (Fig. 286 T), welcher sich während der Drehung vermöge des Schraubengewindes Ab in der Richtung seiner Achse langsam verschiebt, vor der fest aufgestellten Stimmgabel dreht. Die Schreibspitze zeichnet eine Wellen-

linie (Fig. 287) in den Ruß, welche der treue Ausdruck für das Bewegungsgesetz der Stimmgabel ist. Sie ist eine Sinuskurve, und zeigt dadurch, daß die Schwingungen einer Stimmgabel nach demselben Gesetze wie diejenigen eines Pendels erfolgen. Diese Vorrichtung, welche Phonautograph genannt wird, gestattet, die Schwingungszahl einer Stimmgabel genau zu bestimmen; man führt nämlich von dem Gestell des Zylinders und vom Fuß der Gabel Drähte nach den Polen der Sekundärspule eines Induktionsapparates und schaltet in die primäre Leitung ein Sekundenpendel derart ein, daß es bei jedem Hin- und Hergang den elektrischen Strom auf einen

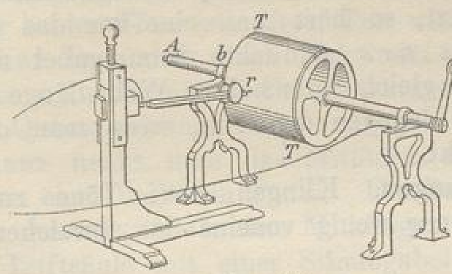

Fig. 286.
Phonautograph.

Augenblick schließt; in diesem Augenblick springt von der Schreibspitze ein Fünkchen auf den Zylinder und hinterläßt auf der gezeichneten Wellenlinie eine Marke (Fig. 287 *a b c*); man kann nun leicht zählen, wieviel Schwingungen die Stimmgabel während einer Sekunde gemacht hat. Ist die Schwingungszahl der Gabel bekannt, so kann die Anzahl der zwischen zwei Marken enthaltenen Wellen zur genauen Messung des kleinen Zeitraumes dienen, welcher zwischen der Hervorbringung der beiden Marken verflossen ist (Stimmgabelchronoskop,

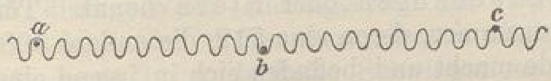

Fig. 287.
Wellenlinie von einer Stimmgabel gezeichnet.

Vibrationschronoskop). Um auch Luftwellen mittels des Phonautographen aufzuzeichnen, wird ein Schalltrichter vor dem berußten Zylinder aufgestellt, dessen verengtes Ende mit einer elastischen Haut überzogen ist, die ein leichtes, die Rußfläche sanft berührendes Schreibstielchen trägt (Phonautograph von Scott und Rud. König, 1859).

305. **Interferenz der Schallwellen.** Zwei Schallwellen von gleicher Tonhöhe und gleicher Stärke können sich durch ihr Zusammenwirken (Interferenz) gegenseitig aufheben, d. h. Stille erzeugen, wenn sie mit einem Gangunterschied von einer halben Wellenlänge zusammentreffen. Dies beobachtet man z. B. bei zwei gleichgestimmten auf denselben Windkasten gesetzten Pfeifen; die Luftbewegung in

ihnen regelt sich alsdann so, daß, wenn in dem Schwingungsknoten der einen eine Verdichtung eintritt, gleichzeitig in dem der anderen eine Verdünnung stattfindet; ein etwas entferntes Ohr empfängt daher gleichzeitig eine Verdichtungs- und eine Verdünnungswelle und vernimmt den Grundton der Pfeifen nicht, wohl aber die Obertöne, für welche ein solcher Gegensatz der Bewegungen nicht stattfindet. Fig. 288 stellt eine Vorrichtung (Quincke) dar, welche dazu bestimmt ist, den Ton einer Stimmgabel durch Interferenz auszulöschen; zwei gabelförmige Glasröhrenstücke *o b a c* und *n e d f* sind einerseits durch einen kurzen (*a d*), andererseits durch einen längeren Kautschukschlauch *f q p c* miteinander verbunden; wird das Ende *o* des Apparats in das Ohr eingesetzt, so hört man eine vor das offene Ende des Kautschukschlauches *n r s* gebrachte Stimmgabel nicht, wenn das Schlauchstück *f q p c* gleich einer halben Wellenlänge des Stimmgabeltones ist; man hört dagegen den Ton, wenn man dieses Stück mit den Fingern zudrückt.

306. **Schwebungen.** Klingen zwei Töne zusammen, deren Schwingungszahlen nur wenig voneinander abweichen, so vernimmt

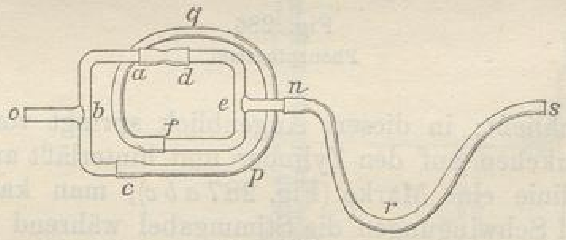

Fig. 288.
Interferenz des Schalles.

man abwechselnde Anschwellungen und Senkungen der Tonstärke, welche man Schwebungen oder Stöße nennt. Tönen z. B. zwei Stimmgabeln zusammen, deren eine 512, die andere 508 Schwingungen in einer Sekunde macht und befinden sich in irgend einem Augenblick ihre Bewegungen derart in Übereinstimmung, daß beide gleichzeitig eine Verdichtungswelle ins Ohr senden, so empfängt dieses einen verstärkten Eindruck. Dasselbe wiederholt sich je nach $^1/_4$ Sekunde, da in dieser Zeit die erste Gabel 128, die zweite 127 ganze Schwingungen vollendet; nach $^1/_8$ Sekunde dagegen hat jene 64, diese nur $63\,^1/_2$ Schwingungen gemacht, letztere ist also um eine halbe Schwingung gegen erstere zurückgeblieben und sendet eine Verdünnungswelle ins Ohr, welche die von der ersteren gleichzeitig ausgehende Verdichtungswelle aufhebt. Man hört also in einer Sekunde 4 Schwebungen, nämlich so viele, wie der Unterschied der Schwingungszahlen ausmacht. Erfolgen mehr als 30 Stöße in der Sekunde, so kann man sie nicht mehr gut einzeln wahrnehmen; sie bringen aber in ihrer Gesamtheit eine für das Ohr unangenehme Rauhigkeit in den Zusammenklang, welche die Hauptursache der Dissonanz ist. Mit Hilfe der Schwebungen kann man sehr leicht, auch ohne geübtes Gehör, zwei Saiten, Pfeifen usw. vollkommen gleich stimmen, weil sich die Annäherung an den Gleichklang durch immer langsamer erfolgende Stöße kundgibt. Eine Reihe von Stimmgabeln oder Zungen, deren jede mit der folgenden Schwebungen, z. B. vier in der Sekunde, gibt, kann als Tonmesser dazu dienen, die Schwingungszahlen von Tönen, die im Bereiche der Reihe liegen, zu bestimmen.

307. **Kombinationstöne.** Beim Zusammenklingen zweier kräftiger Töne, deren Tonhöhen nicht so nahe beisammen liegen, daß Stöße unterschieden werden können, hört man einen dritten, tieferen Ton, dessen Schwingungszahl gleich dem Unterschied der Schwingungszahlen jener beiden Töne ist; dieser Ton wird Kombinationston, Tartinischer Ton oder nach Helmholtz Differenzton genannt. Man hört z. B. die nächst tiefere Oktave eines Tones, wenn gleichzeitig seine Quinte erklingt.

308. **Resonanz** nennt man das Mittönen eines Körpers beim Erklingen des ihm eigentümlichen Tones. Ein Beispiel davon haben wir schon kennen gelernt (296) in dem Mitklingen einer in eine Röhre eingeschlossenen Luftsäule mit einer Stimmgabel, welche denselben Ton gibt, den jene beim Anblasen geben würde.

Wird von zwei nebeneinander aufgespannten Saiten die eine angeschlagen, so tönt auch die andere mit, wenn beide gleich gestimmt sind; sie bleibt dagegen stumm, wenn sie in ihrer Stimmung auch nur ein wenig von jener abweicht. Die angeschlagene Saite sendet nämlich Schallwellen aus, welche, an der ruhenden Saite anlangend, diese in Bewegung zu setzen suchen. Erfolgt der Wellenschlag in gleichem Tempo wie die Schwingungen, deren die Saite fähig ist, d. h. sind beide Saiten gleich gestimmt, so erhält die Saite, wenn sie vorwärts zu gehen im Begriff ist, einen Stoß nach vorwärts und während sie zurückgeht, einen Stoß nach rückwärts. Die folgenden Stöße wirken in dieser Weise unausgesetzt zur Verstärkung der Bewegung, welche durch den ersten nur schwach eingeleitet worden ist, und die Saite gerät in so lebhafte Schwingungen, daß auf sie gesetzte Papierreiterchen abgeworfen werden. Ist dagegen die Schwingungszahl der ankommenden Welle von derjenigen der Saite verschieden, so geraten die späteren Stöße sehr bald in Widerstreit mit der durch die früheren hervorgebrachten leisen Erzitterung und heben deren Wirkung wieder auf, so daß die Saite in Ruhe bleibt. Die Töne von Saiten werden bekanntlich erst dann kräftig hörbar, wenn letztere über einem hölzernen Resonanzboden oder Resonanzkasten (Fig. 277) ausgespannt sind. Die elastischen Fasern des Holzes sowie die in dem Kasten enthaltene Luft verstärken nämlich durch ihr Mitklingen den an sich nur leisen Ton der Saiten. Der Wert eines Saiteninstruments ist wesentlich von der Güte seines Resonanzbodens abhängig. Auch Stimmgabeln, die ebenfalls für sich nur schwach klingen, befestigt man auf einerseits geschlossenen Holzkästen, deren Länge gleich einer Viertelwelle des Stimmgabeltones ist, so daß auch noch die Luft im Kasten wie in einer gedeckten Pfeife mitschwingt. Bringt man die eine von zwei einander gegenüberstehenden genau gleichgestimmten Gabeln zum Tönen und alsbald durch Berührung mit der Hand wieder zum Schweigen, so tönt die andere fort, und stößt ein Elfenbeinkügelchen, das in Berührung mit einer ihrer Zinken aufgehängt ist, von sich ab.

309. **Klangfarbe.** Die Klänge unterscheiden sich außer durch ihre Tonhöhe und Stärke auch noch durch ihre Klangfarbe (timbre); man bezeichnet mit diesem Ausdruck den eigentümlichen Charakter, den ein und dieselbe Note besitzt, je nachdem sie durch die Violine, Klarinette, das Piano, die menschliche Stimme usw. wiedergegeben wird. Während die Stärke eines Klanges nur von der Weite (Amplitude) seiner Schwingungen abhängig und deren Quadrat proportional ist (20), die Höhe aber nur von der Schwingungszahl abhängt, ist die Klangfarbe durch die Schwingungsform bedingt. Die Schwingungsform findet ihren Ausdruck

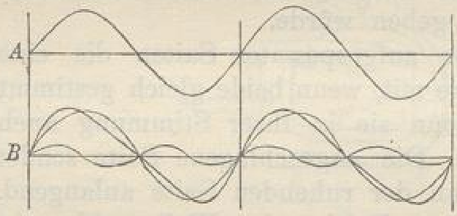

Fig. 289.
Schwingungsformen.

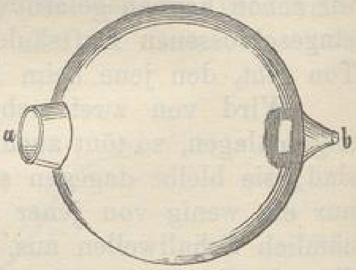

Fig. 290.
Resonator.

in der Gestalt der Wellenlinie, durch welche sich das Gesetz der durch den tönenden Körper erzeugten Verdichtungen und Verdünnungen (etwa mittels des Phonautographen) darstellen läßt. In Fig. 289 *A* und *B* stellen die stärker ausgezogenen Wellenlinien zwei Schallbewegungen von gleicher Tonhöhe, aber verschiedener Schwingungsform dar: die erstere entspricht der einfachen, nach dem Pendelgesetz erfolgenden Bewegung einer Stimmgabel; die letztere ist aus zwei durch die schwach ausgezogenen Wellenlinien angedeuteten pendelartigen Bewegungen, dem Grundton und der Oktave, zusammengesetzt; die an jeder Stelle von den beiden Wellen einzeln hervorgebrachten Verschiebungen fügen sich zueinander, indem die längere Welle die kürzere gleichsam auf ihren Rücken nimmt, und bringen dadurch eine neue, durch die stärker ausgezogene Linie dargestellte Wellenform hervor, welche zwar selbst nicht mehr dem Pendelgesetz entspricht, in welcher aber zwei pendelartige Schwingungen innig miteinander verschmolzen sind. In dieser Weise läßt sich jede nicht pendelartige Schwingungsbewegung aus solchen einfachen pendelartigen Schwingungen zusammengesetzt oder in dieselben zerlegt denken (Fourier), deren Schwingungszahlen sich wie die Zahlen der natürlichen Reihe 1, 2, 3, 4 . . . verhalten. Diese Zerlegung ist aber nicht bloß eine gedachte, sondern sie wird von unserem Ohr in der Tat unbewußt vorgenommen. Denn nach einem von G. S. Ohm zuerst aufgestellten Satz empfindet das Ohr nur eine pendelartige Schwingung der Luft als einfachen Ton und zerlegt jede andere schwingende Bewegung in pendelartige Schwingungen, welche als eine Reihe einfacher Töne aus dem zusammengesetzten Klang herausgehört werden. Der tiefste in einem Klang enthaltene einfache Ton heißt sein Grundton, die höheren die Obertöne (Teiltöne, Partialtöne). Die große Mannigfaltigkeit der Klangfarben ist nun dadurch bedingt, daß sich zu dem Grundton bald diese, bald

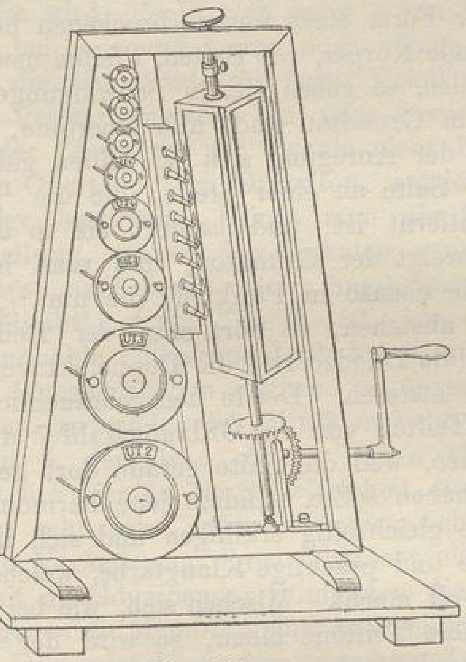

Fig. 291.
Klanganalysator.

jene seiner Obertöne mit größerer oder geringerer Stärke hinzugesellen. Um das Ohr, welches durch Gewohnheit leicht geneigt ist, jeden Klang als ein einheitliches Ganze aufzufassen, in der Wahrnehmung der einfachen Teiltöne zu unterstützen, dienen die von Helmholtz angegebenen Resonatoren (Fig. 290), nämlich gläserne oder messingene Hohlkugeln, deren eine Öffnung *a* der Schallquelle zugekehrt ist, während die andere kegelförmig gestaltete *b* in das Ohr eingesetzt wird. Jeder Resonator verstärkt nur denjenigen einfachen Ton, auf welchem die in ihm enthaltene Luftmasse infolge der Dimensionen und der Gestalt des Hohlraumes abgestimmt ist, und befähigt so das mit ihm bewaffnete Ohr, diesen Ton aus einem Tongemisch oder Klang deutlich herauszuhören. Durch eine Reihe auf einen Grundton und die zugehörigen Obertöne abgestimmter Resonatoren vermag man daher die Zusammensetzung eines Klanges von gleichem Grundton zu erforschen, indem man ihn in seine einfachen Teiltöne zerlegt. Diese Klanganalyse kann sogar für das Auge sichtbar durchgeführt werden mittels Rud. Königs Klanganalysator (Fig. 291); acht Resonatoren sind übereinander auf einem Gestell befestigt, die hintere Öffnung eines jeden steht durch einen Kautschukschlauch mit einer manometrischen Kapsel (s. oben Fig. 272) in Verbindung. Die Gasflammen dieser Kapseln sind seitwärts längs einer geneigten Linie übereinander angebracht und werden in einem drehbaren Spiegel betrachtet. Diejenigen Flammen, deren Resonatoren durch den zu untersuchenden Klang in Tätigkeit gesetzt werden, geben im Spiegel eine Reihe getrennter Flammenbilder; jene dagegen, auf deren Resonatoren jener Klang nicht einwirkt, erscheinen in der Form eines ununterbrochenen hellen Streifens.

Sind tönende Körper, wie Saiten, Pfeifen usw. geneigt, sich durch Knoten abzuteilen, so geben sie, in Schwingungen versetzt, gleichzeitig mit dem Grundton auch alle Obertöne, welche nicht etwa durch die Art der Anregung sich zu bilden gehindert sind. Zupft man z. B. eine Saite an einer Stelle, die um $^1/_7$ ihrer Länge vom einen Ende entfernt ist, und berührt sie in der Mitte mit einem Pinsel, so schweigt der Grundton, und man hört dessen Oktave; berührt man sie ebenso in Punkten, die um $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$, $^1/_6$ vom anderen Ende abstehen, so hört man der Reihe nach die Quinte dieser Oktave (die Duodecime), die Doppeloktave, dann die Terz und die Quinte der letzteren. Der in den gebräuchlichen Tonleitern nicht vorkommende Teilton von der Ordnungszahl 7 dagegen konnte nicht zustande kommen, weil die Saite gerade dort gezupft wurde, wo er einen Knoten haben sollte. Indem jene harmonischen Obertöne mit dem Grundtone gleichzeitig erklingen und sich ihm beimischen, entsteht die reiche und prächtige Klangfarbe, welche die Saiten für die Musik so wertvoll macht. Mischen sich, wie bei gestrichenen Saiten, auch noch höhere Teiltöne hinzu, so wird der Klang zwar rauher und schärfer, gewinnt aber noch an Ausdrucksfähigkeit. Die offenen Pfeifen geben dieselbe Reihe harmonischer Obertöne, jedoch vorzugsweise die niedrigeren. Sind, wie bei gedeckten Pfeifen, nur ungeradzahlige Obertöne vorhanden, so erscheint der Klang dumpf und hohl. Einfache Töne, wie diejenigen von Stimmgabeln, klingen angenehm und weich, aber leer und ausdruckslos, und sind daher zu musikalischen Zwecken kaum brauchbar. Noch weniger musikalisch sind die klirrenden Klänge von Stäben und Platten, deren Grundton von hohen unharmonischen Obertönen begleitet ist. Die Konsonanz zweier Klänge ist um so vollkommener, je mehr gemeinschaftliche Teiltöne sie enthalten (Helmholtz, 1865).

310. **Vokale.** Die menschliche Stimme entsteht durch die Schwingungen der beiden Stimmbänder, welche im Kehlkopf von vorn nach hinten ausgespannt sind und so die Ränder einer schmalen Spalte, der Stimmritze bilden. Durch die Schwingungen der Stimmbänder wird die Stimmritze abwechselnd geöffnet und geschlossen

und durch diese regelmäßige Unterbrechung des aus der Luftröhre dringenden Luftstromes ein Klang erzeugt, der um so höher ist, je stärker die Stimmbänder durch die Einwirkung gewisser unserem Willen gehorchender Muskeln gespannt werden. Dieser Klang ist sehr reich an Obertönen. Je nach der Größe und Gestalt, welche man der Mundhöhle gibt, können wir einen oder mehrere von diesen Obertönen besonders zur Geltung bringen und so die Klangfarbe der Stimme mannigfach abändern; die Mundhöhle wirkt nämlich als Resonator, indem sie durch Mitklingen der in ihr enthaltenen Luft denjenigen Oberton verstärkt, auf welchen sie jedesmal abgestimmt ist. Auf den so hervorgebrachten Abänderungen der Klangfarbe beruhen die Unterschiede der Vokale. Während beim *u* fast nur der reine Grundton gehört wird, gesellt sich beim *o* zum Grundton noch dessen Oktave, und bei *a*, *e* und *i* sind noch höhere Obertöne beigemischt. Da aber die Mundhöhle für jeden Vokal eine bestimmte Form annimmt, der Verstärkungstöne von ganz bestimmter Tonhöhe zukommen, so ist der Charakter der Vokale nicht bloß durch das Stärkeverhältnis der Obertöne zum Grundton, sondern auch durch eine absolute Tonlage bestimmt. Bringt man die Mundhöhle abwechselnd in die Stellung, welche den Vokalen *a* und *o* zukommt, indem man diese Laute nacheinander leise ausspricht, und hält eine angeschlagene Stimmgabel, deren Ton b_1 ist, vor den Mund, so wird die in der Mundhöhle enthaltene Luft bei dem *o* kräftig mitklingen, bei dem *a* dagegen stumm bleiben; ist dagegen die Stimmgabel auf b_2 gestimmt, so erfolgt das Mittönen beim *a*, nicht aber bei *o*. Demnach ist b_1 der für *o*, b_2 der für *a* charakteristische Eigenton. Es erklärt sich hieraus die Schwierigkeit, die dumpfen tiefen Vokale *a* und *o* auf sehr hohe, oder die hellen hohen Vokale auf sehr tiefe Töne ohne Veränderung ihres Vokalcharakters zu singen.

Spricht man mit gleichbleibender Stimmlage die Vokale durch einen Schalltrichter gegen die Membran einer manometrischen Flamme, so erkennt man im Drehspiegel an den gezackten Lichtstreifen die Unterschiede in der Zusammensetzung der Vokalklänge.

Die Konsonanten sind kurzdauernde Geräusche, welche mit Lippen, Zunge, Gaumen hervorgebracht werden.

311. **Phonograph. Grammophon.** Durch den Phonograph von Edison (1877) lassen sich die Laute der menschlichen Sprache und beliebige andere Klänge dauernd aufzeichnen und nach beliebiger Frist wiedergeben. Eine Messingwalze *C* (Fig. 292) wird von einer Achse *A A'* getragen, in deren eine Hälfte *A'* ein Schraubengewinde eingeschnitten ist, dem das eine Achsenlager als Mutter dient. Auf der Oberfläche der Walze ist eine schraubenförmige Rinne von derselben Steigung wie die Schraube *A'* eingegraben. Die Walze wird mit einem dünnen Stanniolblatt oder bei den später verbesserten Apparaten mit einer abnehmbaren Wachsschicht überzogen und ist nun zum Empfang der Zeichen bereit. Der zeichengebende Teil besteht aus einem mit einem Schallbecher versehenen Mundstück *D*

(Fig. 293), in dem eine dünne Platte E gleich einem Trommelfell ausgespannt ist, welche einen von einer Metallfeder getragenen Stift G durch Vermittelung der Dämpfer FF (Stücke von Kautschukschläuchen) gegen die Walze drückt, so daß der ruhende Stift, wenn die Kurbel B gedreht wird, eine der Rinne der Walze folgende Schraubenlinie beschreiben würde. Spricht man nun in das Mundstück, während die Walze gleichmäßig gedreht wird, so schwingt die Platte, und der Stift bringt auf dem Stanniolblatt oder der Wachsschicht Eindrücke hervor, deren Profil die Schwingungsform

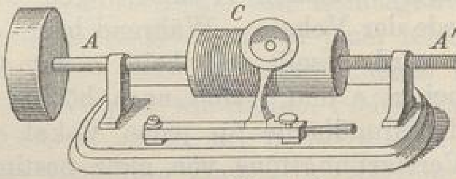

Fig. 292.
Phonograph.

der gesprochenen Laute nachahmt. Um diese Laute wieder hervorzubringen, schlägt man den Zeichengeber zurück, dreht die Walze rückwärts und bringt Stift und Mundstück wieder in die anfängliche Lage. Dreht man jetzt die Kurbel wie anfangs, so versetzt der Stift, indem er über die Eindrücke des Stanniolblattes hinweggleitet, die Platte in Schwingungen, welche denjenigen, die sie vorher beim Aufzeichnen gemacht hatte, entsprechen. Der Apparat gibt auf diese Weise die gesprochenen Worte in ähnlicher Klangfarbe mehr oder weniger deutlich wieder.

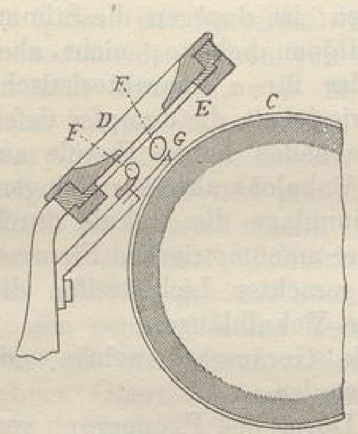

Fig. 293.
Zum Phonograph.

Beim Grammophon (Berliner, 1888) werden durch eine vertikal stehende, in der Mitte mit Schreibstift versehene Membran die mittels Schalltrichters aufgefangenen Schallwellen als spiralförmige Wellenlinien auf einer horizontalen Metallscheibe in einen Ätzgrund eingezeichnet und sodann eingeätzt; die so erhaltenen Platten lassen sich beliebig vervielfältigen. Zur Wiedergabe der Töne (Sprache, Tierstimmen, Musikstücke usw.) wird der Stift einer vertikalen Membran beim Drehen der Scheibe in der vertieften Wellenlinie geführt und versetzt die Membran in entsprechende Schwingungen, welche die ursprünglichen Laute deutlich und beliebig oft wiederholen.

312. **Gehör.** Der äußere Gehörgang ist an seinem inneren Ende durch eine schwingungsfähige Membran, das Trommelfell, ab-

geschlossen, von welchem aus die Reihe der Gehörknöchelchen (Hammer, Amboß und Steigbügel) die Schwingungen durch die Paukenhöhle hindurch auf die im Labyrinth enthaltene Flüssigkeit überträgt. Diese Vorrichtung hat den Nutzen, daß die Schallbewegung zunächst von einer relativ großen Fläche, dem Trommelfell, aufgefangen und von dieser durch die Gehörknöchelchen auf die 15—20 mal kleinere Fläche des ovalen Fensters, das in das innere Ohr hineinführt, gewissermaßen konzentriert wird, und daß dabei die Gehörknöchelchen als eine hebelartige Kombination wirken, welche die Bewegung von großer Amplitude und geringer Kraft, wie sie das Trommelfell ausführt, in eine solche von geringer Amplitude und großer Kraft verwandeln, wie sie erforderlich ist, um das Labyrinthwasser zum Mitschwingen anzuregen. Das Labyrinth besteht aus dem Vorhof, den halbkreisförmigen Kanälen und der Schnecke. In seiner knöchernen Wandung befinden sich zwei mit Membranen verschlossene Öffnungen, das runde und ovale Fenster. Auf die Membran des ovalen Fensters ist der Steigbügel mit seiner Fußplatte aufgewachsen. In der Schnecke ist in ihrer ganzen Längserstreckung eine feine Scheidewand, die Basilarmembran, ausgespannt. Sie besteht aus 15—20000 feinen Fasern, die in radialer Anordnung nebeneinander liegen, und von der Basis der Schnecke bis zu ihrer Spitze an Länge zunehmen. Mit diesen, den Saiten einer Harfe ähnlichen Fasern sind die feinen Endigungen des Hörnerven unter Vermittelung eines komplizierten Zwischengliedes, des sog. Cortischen Organes, verbunden. Auf bestimmte einfache Töne sprechen bestimmte Fasern der Basilarmembran an und erregen durch Reizung der ihnen zugeordneten Nervenendigungen die diesen einfachen Schwingungsvorgängen entsprechenden Tonempfindungen.