Die Zahl der möglichen Schwingungsformen solcher Platten, namentlich wenn sie dünn sind, ist ausserordentlich gross, sie können fast jede beliebige Schwingung ausführen.

Den Platten verwandt sind gespannte Membranen, wie sie bei der Kesselpauke und Trommel benutzt werden, nur bildet der Rand hier stets eine Knotenlinie. Genau so, wie wir von den Stäben zu den Stimmgabeln übergehen könnten, kommen wir von Platten durch Verdickung in der Mitte und Biegung zu den Glocken, so dass nichts weiter darüber zu sagen ist.

D. Resonanz, Interferenz.

§ 210. Wenn wir einem schwingungsfähigen Körper, z. B. einem Pendel, einen ganz schwachen Stoss geben, so kann es dadurch in unmerklicher Weise bewegt werden. Wenn wir aber nach je einer Schwingungsdauer die schwachen Stösse in derselben Richtung wiederholen, so wird ihre Wirkung sich allmählich summieren und das Pendel kann in kräftige Schwingungen geraten. So kann ein Kind die schwerste Kirchenglocke läuten dadurch, dass es in passendem Rhythmus an dem Strick zieht und allmählich die Amplitude vergrössert. Die Stösse brauchen nicht bei jeder Schwingung zu erfolgen; auch wenn man nur jede zweite oder dritte u. s. w. Schwingung verstärkt, erreicht man, wenn auch schwächer, das gleiche. Wenn dagegen die Stösse in irgend einem anderen, wenn auch wenig verschiedenen Tempo erfolgen, so wird die Bewegung des schwingenden Körpers bald befördert, bald verhindert werden und kräftige Schwingungen können nicht auftreten. Dieselbe Erscheinung wird sehr häufig bei akustischen Bewegungen beobachtet; sie wird hier Mitschwingen oder Resonanz genannt. Wenn wir auf dem Monochord eine zweite mit der ersten gleich gestimmte Saite aufspannen und streichen die erste an, dämpfen sie gleich darauf, so hört man, dass die zweite tönt. Aber die erste Saite muss genau ebensoviel Schwingungen machen wie die zweite, allenfalls halb so viel oder drittel so viel. Wenn wir ebenso zwei genau gleich gestimmte Stimmgabeln mit den offenen Seiten ihrer Resonanzkästen gegen einander kehren, streichen die eine an und dämpfen sie kurz darauf, so tönt die zweite, weil zuerst die Luft des zweiten Resonanzkastens ins Mitschwingen gekommen ist, und diese Schwingungen durch den Deckel auf die Gabel übertragen worden sind.

Sobald man aber die eine Gabel ewas verstimmt, etwa durch Aufsetzen von Wachsklümpchen auf ihre Zinken, hört die Resonanz auf.

Besonders leicht tritt die Resonanz ein, wenn die Schwingungsenergie, d. h. die Masse des resonierenden Körpers, klein ist, also bei Luft, die in stehende Schwingungen gerät. Solche Luftsäulen beginnen sehr laut zu tönen, sobald aussen der ihnen entsprechende Ton angegeben wird. Wenn man über ein hohes cylindrisches Glasgefäss eine angeschlagene Stimmgabel ohne Resonanzkasten hält, so hört man im allgemeinen den Ton kaum. Giesst man aber langsam Wasser in das Gefäss, wodurch man die Länge der Luftsäule verkürzt, so findet man einen Punkt, wo die Luft sehr stark tönt. Misst man dann die Länge der Luftsäule, so findet man, dass sie $\frac{\lambda}{4}$, oder $\frac{3\lambda}{4}$, oder $\frac{5\lambda}{4}$ u. s. w. des Tones ist.

Dieses Hülfsmittel ist von v. Helmholtz mit grossem Erfolg zur Untersuchung von Klängen verwandt worden.

Kugelförmige Luftmassen (kubische Pfeifen) geben ausser dem Grundton unharmonische Obertöne (§ 199). v. Helmholtz hat eine Reihe Hohlkugeln von Messingblech hergestellt, welche die Reihe der Töne als Grundton besitzen. Sie haben eine weite Oeffnung A (Fig. 152) und eine enge B. Letztere wird in das Ohr gesteckt. Sobald nun in einem äusseren Klang der Eigenton des Resonators vorhanden ist, wenn auch so schwach, dass man ihn sonst nicht hört, so wird er allein durch den Resonator verstärkt und man hört ihn sehr deutlich, während der Resonator stumm bleibt, sobald der Ton im Klange nicht vorhanden ist.

§ 211. Eine Reihe wichtiger Erscheinungen wird durch Interferenz der Wellen hervorgebracht.

Als erster Fall seien die Stimmgabeln erwähnt; hier schwingen beide Zinken, jede erzeugt Wellen. An jeder Stelle des Raumes um die Gabel treffen sich Wellen von gleichem λ, gleicher Amplitude; wo sie einen Phasenunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge haben, vernichten sie sich. Durch Rechnung lässt sich finden, dass von der Gabel 4 Linien ausgehen, in deren Punkten dies der Fall ist (Fig. 153); sie bilden eine Hyperbel. Geht man um die Gabel herum, oder dreht sie vor dem Ohr einmal um, so hört man daher bei 4 Stellungen nichts von dem Ton, dazwischen hört man ihn.

§ 212. Viel wichtiger ist der Fall, wo zwei Wellen von nahezu gleicher Schwingungszahl zusammen kommen. Wir wollen uns zuerst graphisch ein Bild davon machen, was geschehen muss: Es seien in Fig. 154 zwei Wellen (punktiert gezeichnet) von 8 und 9 Schwingungen in der Sekunde gegeben, welche auf demselben Wege fortlaufen. Anfangs sollen ihre Phasen übereinstimmen, dann verstärken sie sich, und wir hören also einen kräftigen Ton, ihre Resultante hat grosse Amplitude. Da aber die eine Schwingung schneller

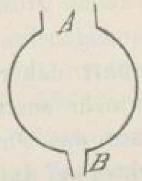

Fig. 152.

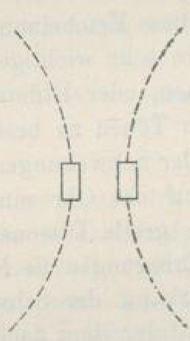

Fig. 153.

Fig. 154.

ist als die andere, so eilt die Phase dieser Welle vor, nach $\frac{1}{2}$ Sekunde hat die eine Welle 4 Schwingungen, die andere $4\frac{1}{2}$ gemacht; die Phasen sind also entgegengesetzt, die Wellen vernichten sich. Von da an kommen sich die Phasen wieder näher, um nach 1 Sekunde wieder genau zu koinzidieren. Wie man aus der Gestalt der Resultante erkennt, wird also im Laufe jeder Sekunde durch Interferenz die Amplitude einmal ausserordentlich geschwächt, die Intensität nimmt also ab und zu.

Es ist leicht zu erkennen, dass jede beliebige zwei Wellen, deren Schwingungszahl um 1 verschieden ist, sich in der Sekunde 1mal aufheben müssen. Sind die Schwingungszahlen um 2 verschieden, so wird das gleiche 2mal in der Sekunde eintreten; denn haben sie etwa 100 und 102 Schwingungen, so wird nach

25 Schwingungen des ersten Tones der zweite $25\frac{1}{2}$ gemacht haben, sie werden sich vernichten. Bei 50 und 51 Schwingungen koinzidieren sie wieder, bei 75 und $76\frac{1}{2}$ vernichten sie sich, am Ende der Sekunde, bei 100 und 102 verstärken sie sich. Wir finden also, dass zwei Töne mit den Schwingungszahlen n und n + m keinen gleichmässig intensiv verlaufenden Klang erzeugen können, sondern einen mit ab- und zunehmender Stärke, und zwar wird er m-mal in der Sekunde, d. h. so oft, als die Differenz der Schwingungszahlen angibt, sehr schwach oder 0 werden.

Man bezeichnet diese Erscheinungen als Schwebungen oder Stösse. Sie bilden ein sehr wichtiges Hülfsmittel, um zwei Töne genau gleich zu stimmen, oder Differenzen der Schwingungszahlen zwischen nahe gleichen Tönen zu bestimmen.

Wenn die Zahl der Schwebungen in der Sekunde gross wird, so ist die Wirkung auf das Ohr eine höchst unangenehme, wir empfinden sie als eine grelle Dissonanz. Das rührt daher, dass alle intermittierenden Erregungen die Nerven viel mehr anstrengen, als dauernde. Die Wirkung der Schwebungen auf das Ohr lässt sich etwa vergleichen mit der eines flackernden Lichtes auf das Auge.

Werden die Schwebungen sehr häufig in der Sekunde, so hören sie auf, bemerkbar zu sein; bei tiefen Tönen wird diese Grenze viel eher erreicht, als bei hohen, wo nach v. Helmholtz noch 132 Stösse empfunden werden.

§ 213. Es war schon lange bekannt, dass beim Zusammenklingen zweier Töne, deren Schwingungszahlen zu verschieden sind, als dass Schwebungen hörbar wären, ein dritter Ton entsteht, dessen Schwingungszahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen der Grundtöne ist, oder gleich der Zahl der Schwebungen, welche vorhanden sein könnten. Man nennt diese Töne nach dem ersten Beobachter Tartinische Töne. Nach dem Vorgange von Young erklärte man sie als entstanden aus den Schwebungen. Erst v. Helmholtz machte auf das Widersinnige dieser Erklärung aufmerksam, dass das m-malige Stark- und Schwachwerden eines bestimmten Tones von n Schwingungen einen Ton von m Schwingungen erzeugen solle, und gab die richtige Erklärung. Wir haben bisher stets das Prinzip von der Superposition kleiner Bewegungen (§ 184) benutzt, nach welchem man die Resultante zweier Bewegungen einfach durch Addition der Komponenten erhält. v. Helmholtz machte nun darauf aufmerksam, dass, wenn die Bewegungen nicht klein sind, die Zusammensetzung nach der Theorie viel kompliziertere Resultate ergibt: ausser der gewöhnlichen Resultante erhält man noch einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen der Komponenten ist, und viel schwächer noch einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Summe jener beiden ist. v. Helmholtz nannte diese Töne Kombinationstöne, den ersten Differenzton — es ist das der alte Tartinische Ton —, den zweiten Summationston. Haben wir also z. B. zwei starke Töne von 300 und 400 Schwingungen, so entstehen ausserdem der Differenzton mit 100 und der Summationston mit 700 Schwingungen.

Die Richtigkeit dieser Theorie ist dann auch experimentell bestätigt worden.

§ 214. Wir können nun den Grund für Konsonanz derjenigen Töne, deren Schwingungszahlen im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen stehen (§ 198), erkennen. Werden die beiden Töne angegeben, so sind im allgemeinen noch eine grosse Zahl harmonischer Obertöne bei beiden vorhanden, ferner die Kombinationstöne der Grundtöne, eventuell der Obertöne. Zwischen dieser ganzen Masse von Tönen darf niemals eine kleine Zahl von Schwebungen eintreten, wenn die Töne konsonant klingen sollen.

Werden etwa von offenen Pfeifen Grundton und Oktave gegeben, so verhalten sich ihre Schwingungszahlen wie 1 : 2. Die Obertöne sind dann: 2, 3, 4 . . . einerseits, 4, 6, 8 . . . andererseits, die Differenz je zweier Töne ist also nie kleiner als 1, die Schwingungszahl des Grundtons. Dies ist daher die vollkommenste Konsonanz.

Nehmen wir zwei Töne, welche die Quinte bilden: 2 : 3, so sind die Obertöne: 4, 6, 8, 10 . . . und 6, 9, 12, 15 . . . Hier ist die kleinste mögliche Differenz 1, die Hälfte der Schwingungen des Grundtons, also auch noch eine Zahl, die viel zu gross ist, um hörbare Schwebungen zu geben. Z. B. für die Töne 256 und 384 wäre die kleinste mögliche Schwebungszahl 128.

Betrachten wir dagegen die Septime, wobei sich die Schwingungszahlen verhalten wie 8 : 15, so sind die Obertöne: 16, 24, 32 . . . und 30, 45, 60 . . . Hier bildet z. B. der zweite Grundton 15 mit dem ersten Oberton des ersten Grundtons 16 die Schwebungen 1, deren Anzahl $\frac{1}{8}$ der Schwingungszahl des Grundtons sind. Haben wir also etwa die Töne 256 und 480, so geben sie 32 Schwebungen, welche stören und die Konsonanz der Septime unvollkommen machen. Diese Verhältnisse sind erst durch v. Helmholtz aufgeklärt worden.

§ 215. Es sind noch einige Methoden zu erwähnen, welche dazu dienen, Schwingungen zu untersuchen. Die erste Methode, die von Lissajous eingeführt wurde, beruht auf der Kombination zweier rechtwinkelig zu einander stattfindender Schwingungen. Es sei also eine Welle gegeben, $x = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right)$, welche horizontal schwingt, und eine zweite $y = b \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{l'}{\lambda}\right)$, welche vertikal schwingt. Wir betrachten einen Punkt, der von beiden in Bewegung gesetzt wird, und untersuchen die resultierende Bewegung. Die obigen Gleichungen drücken aus, dass Schwingungszahl, also auch Wellenlänge beider Bewegungen identisch ist, aber Amplitude und Phase verschieden. Wir schreiben einfacher:

$$x = a \sin \psi, \; y = b \sin(\psi - \alpha),$$

wo $\psi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right)$ und $\alpha = 2\pi\,\frac{l' - l}{\lambda}$ der Phasenunterschied ist.

Es folgt: $\sin\psi = \frac{x}{a}$, $\cos\psi = \sqrt{1 - \sin^2\psi} = \sqrt{1 - \frac{a^2}{x^2}}$

$$\frac{y}{b} = \sin(\psi - \alpha) = \sin\psi\cos\alpha - \cos\psi\sin\alpha = \frac{x}{a}\cos\alpha - \sin\alpha\sqrt{1 - \frac{a^2}{x^2}}$$

$$\text{oder } \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \frac{2xy}{ab}\cos\alpha = \sin^2\alpha.$$

Dies ist die Gleichung einer Ellipse, welche also im allgemeinen vom Punkte durchlaufen wird. Wir wollen die Gleichung vereinfachen, indem wir annehmen $a = b$, so erhalten wir

$$x^2 + y^2 - 2xy\cos\alpha = a^2\sin^2\alpha.$$

Diese Gleichung stellt verschiedene Kurven dar, je nach dem Wert von α, dem Phasenunterschied. Im allgemeinen ist es die Gleichung einer Ellipse; aber für den Phasenunterschied $\alpha = 0$, $l' = l$ wird $\cos\alpha = 1$, $\sin\alpha = 0$, also die Gleichung

$$x^2 + y^2 - 2xy = 0, \; (x - y)^2 = 0, \; x = y.$$

Dies ist die Gleichung einer geraden Linie durch den ersten und dritten Quadranten. Dieselben Werte erhält cos α und sin α, wenn $\alpha = 2\pi$, $4\pi \ldots$, also wenn der Phasenunterschied 0 oder eine ganze Anzahl von Schwingungen ist. Wächst der Phasenunterschied von 0 aus, so erhalten wir eine Ellipse, deren grosse Axe durch den ersten und dritten Quadranten geht. Ist der Phasenunterschied $\frac{1}{4}$ Schwingung geworden, $l' - l = \frac{\lambda}{4}$, so ist $\alpha = \frac{\pi}{2}$, $\cos \alpha = 0$, $\sin \alpha = 1$; die Gleichung wird $x^2 + y^2 = a^2$, die Gleichung eines Kreises mit dem Radius a. Wächst die Phasendifferenz noch mehr, so erhalten wir wieder eine Ellipse, deren grosse Axe aber im zweiten und vierten Quadranten liegt. Ist $l' - l = \frac{\lambda}{2}$ geworden, so ist $\alpha = \pi$, $\cos \alpha = -1$, $\sin \alpha = 0$, die Gleichung

$$x^2 + y^2 + 2xy = 0,\ (x + y)^2 = 0,\ x = -y,$$

eine gerade Linie unter 45° gegen die Axen im zweiten und vierten Quadranten. Für $l' - l = \frac{3\lambda}{4}$ erhalten wir wieder einen Kreis, und für $l' - l = \lambda$ wie oben besprochen wieder die schräge Linie durch den ersten und dritten Quadranten. In dem allgemeinen Fall, wo a nicht gleich b, treten nur statt der Kreise Ellipsen mit vertikaler und horizontaler Axe auf; für $l' - l = \frac{\lambda}{2}$ bilden dann die geraden Linien nicht Winkel von 45° mit den Axen.

Wie man sieht, hängt die gesehene Kurve nur von der Phasendifferenz ab, und wenn wir die Phase der einen Komponente kennen, können wir die der anderen aus der Resultante ableiten.

Die Zusammensetzung zweier Schwingungen lässt sich in verschiedener Weise machen: es seien z. B. 2 Stimmgabeln, oder eine Gabel und eine Zungenpfeife die tönenden Körper. Wir bringen an beiden kleine leichte Spiegel an, oder polieren ein Stück der Oberfläche; stellen wir sie dann so auf, dass die eine in horizontaler Ebene schwingt, die andere in vertikaler, lassen dann einen Lichtstrahl auf den ersten Spiegel fallen so, dass er nach dem zweiten reflektiert wird und von da auf einen Schirm, so werden dem Strahle beide Bewegungen mitgeteilt und er beschreibt die besprochene Resultante auf dem Schirme. Die von dem Strahle beschriebenen Kurven heissen Lissajoussche Kurven.

Für andere Fälle, z. B. zur Beobachtung einer schwingenden Saite, hat v. Helmholtz das Vibrationsmikroskop konstruiert.

Die eine Zinke einer elektromagnetischen Stimmgabel (§ 206) trägt das Objektiv eines Mikroskops, dessen Rohr und Okular an einem besonderen Stativ befestigt ist. Schwingt die Gabel und betrachtet man durch das Mikroskop einen ruhenden hellen Punkt, so erscheint derselbe wegen der Schwingung des Objektives als gerade Linie — er schwingt scheinbar hin und her. Schwingt dagegen der Punkt senkrecht zu der Schwingungsrichtung des Objektives, so sieht man ihn die Lissajousschen Figuren beschreiben. Dieses Instrument hat in v. Helmholtz' Händen wichtige Resultate geliefert.

Wir haben oben zwei gleiche Schwingungszahlen zusammengesetzt und eine Ellipse erhalten; man kann natürlich auch andere Töne kombinieren, dann erhält man kompliziertere Figuren, z. B. bei Grundton und Oktave eine 8-artige Kurve.

§ 216. Von Wichtigkeit ist noch eine andere Benutzung dieser Kurven. Haben wir zwei Schwingungen, deren Schwingungszahlen nicht ganz, sondern nur fast gleich sind, so ändert sich, wie wir bei den Schwebungen gesehen haben, ihr Phasenunterschied fortwährend. Die bei ihrer Kombination entstehende Lissajoussche Kurve kann also nicht konstant bleiben, sondern muss nach einander alle jene Formen annehmen, die wir besprochen haben. In Fig. 156 ist z. B. ein Bild gegeben von dem Wege, den der Lichtstrahl der Lissajousschen Figur bei fast gleicher Schwingungszahl durchläuft; der Pfeil gibt den Weg an: die gerade Linie im zweiten und vierten Quadranten öffnet sich zu einer Ellipse, die immer grössere kleine Axe erhält, während gleichzeitig die grosse Axe immer senkrechter wird. Aus der senkrecht stehenden Ellipse oder dem Kreise wird darauf wieder eine schmalere Ellipse im ersten und dritten Quadranten, die sich endlich zu einer geraden Linie zusammenzieht. Von hier an wird derselbe Weg in umgekehrter Richtung durchlaufen, bis wieder die gerade Linie im zweiten und vierten Quadranten vorhanden ist. Die ganze Reihe von Verwandlungen geschieht in der Zeit, wo die eine Bewegung der anderen um eine Schwingung vorauseilt, also in derselben Zeit, wo für das Ohr eine Schwebung stattfinden würde. Wenn nun die Schwebungen sehr selten sind, alle paar Sekunden deren eine

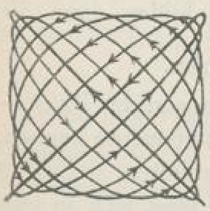

Fig. 155.

stattfindet, so hört man sie nicht mehr; aber dann gerade kann man sie nach dieser Methode sehen. Man kann auf diese Weise z. B. zwei Stimmgabeln ausserordentlich genau gleich stimmen, da man einen Unterschied von einer Schwingung auf mehrere Minuten noch bequem sehen kann.

§ 217. Zusammensetzung zweier Schwingungen lässt sich auch auf graphischem Wege erreichen, wenigstens in einzelnen Fällen. Versieht man eine Zinke einer Stimmgabel mit einer elastischen Spitze (Metallblättchen, Schweinsborste), und zieht diese, während die Gabel schwingt, über eine berusste Unterlage fort, so schreibt die Spitze in den Russ eine Sinuskurve. Befestigt man aber die Schreibfläche an der Zinke einer zweiten ebenfalls schwingenden Gabel, so wird die Kombination beider Schwingungen aufgeschrieben. Dabei können die Gabeln parallel oder senkrecht zu einander stehen.

§ 218. Endlich ist noch die Methode der manometrischen Flammen von König zu erwähnen: Die Schallwellen werden an die Hinterwand B einer Kapsel A (Fig. 156) geleitet; B ist aus

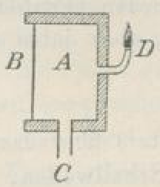

Fig. 156.

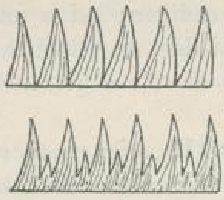
Fig. 157.

einer Membran gebildet, welche die Schwingungen der Luftwellen mitmacht. In die Kapsel tritt durch C Leuchtgas, welches durch eine Brenneröffnung D austritt und angezündet wird. Schwingt die Membran in die Kapsel hinein, so wird Gas herausgedrängt, die Flamme brennt höher, bei der entgegengesetzten Membranschwingung niedriger. Betrachtet man sie in einem rotierenden Spiegel (§ 200), so erscheint die Flamme zu einem Band ausgezogen, welches durch Flammenzacken gebildet ist. In Fig. 157 ist z. B. das Bild skizziert, welches erscheint, wenn in einem Fall nur der Grundton, im zweiten auch noch dessen Oktave, aber schwächer vorhanden ist.

§ 219. Wir haben schon besprochen, wie die Töne der menschlichen Sprache hervorgebracht werden (§ 208). Oberhalb der Stimmritze befindet sich die Mundhöhle, welcher durch verschieden weite Oeffnung des Mundes und verschiedene Stellung der Zunge verschiedene Formen gegeben werden können. Sie spielt für die menschliche Sprache dieselbe Rolle, wie die Ansatzröhren an den Zungenpfeifen; es entstehen stehende Schwingungen, welche je nach der Gestalt des Mundes einzelne der durch die Stimmritze hervorgebrachten Töne kräftig hörbar machen. Die Gestalt der Mundhöhle setzt sich im allgemeinen aus zwei Teilen zusammen, aus einem tiefer gelegenen weiten Teile, und aus dem zwischen Zunge und Gaumen gelegenen röhrenförmigen. Beide Teile geben verschiedene Töne.

Die Vokale unterscheiden sich nur durch diese Töne. Nach v. Helmholtz entspricht für Männerstimme und norddeutsche Aussprache

dem A: b_2; dem O: b_1; dem U: f;
dem Ae: b_1 und g_3; dem Ei: f_1 und b_4; dem J: f und d_4.

Die Konsonanten entstehen durch Geräusche wie die Zischlaute, das H, das R, oder auch durch die Art, wie die Klänge beginnen und endigen; bei b und p z. B. werden plötzlich die Lippen geöffnet, bei dem m plötzlich geschlossen, aber dabei der Luft ein Weg durch die Nase gelassen u. s. w.

§ 220. Es seien noch ein paar Worte[1]) über das Gehör hinzugefügt; das äussere Ohr sammelt die Schallwellen, welche den Abschluss desselben, das Trommelfell, in Schwingung versetzen. Vom Trommelfell werden die Schwingungen durch drei kleine Knochen, Hammer, Ambos und Steigbügel, auf das eigentlich hörende Organ übertragen. Dasselbe besteht aus sehr kompliziert gestalteten Höhlungen im Felsenbein, dem Labyrinth, welches sich aus drei Teilen zusammensetzt: dem Vorhof, drei Bogengängen, welche verschiedene Teile des Vorhofs mit einander verbinden, und der Schnecke. Die ganze Höhlung ist mit wässeriger Flüssigkeit gefüllt, in ihr endigen die Gehörnerven in verschiedenartigen Gebilden, teils steifen Härchen, teils gespannten Fasern (Cortische Fasern), welche alle sehr schwingungsfähig sind. Das

[1]) Ausführlicheres siehe in v. Helmholtz, Tonempfindungen.

Labyrinth hat zwei durch Membranen verschlossene Oeffnungen, die Fenster. In das eine passt gerade der Steigbügel, so dass bei der Schwingung des Trommelfells durch die Gehörknöchelchen die Bewegung auf die Flüssigkeit des Labyrinths übertragen wird. Dabei werden auch jene schwingungsfähigen Nervenendigungen in Schwingung geraten, und zwar, wenn wir annehmen, dass sie verschieden gespannt und verschieden dick sind — wie es in der That der Fall ist —, nur einzelne, deren Eigenton der vorhandenen Schwingung entspricht. Dadurch werden die Nerven gereizt und der Ton kommt uns zum Bewusstsein.

§ 221. Auf der Fähigkeit der Platten und Membranen, so ziemlich alle möglichen Schwingungen ausführen zu können (§ 209), beruht ein interessantes Instrument, der Phonograph von Edison, der im stande ist, die menschliche Sprache aufzuschreiben und zu reproduzieren. Man spricht in ein kurzes Rohr hinein, welches dazu dient, die Schallwellen zu konzentrieren. Dasselbe ist am anderen Ende durch eine dünne Platte von Glas verschlossen, an deren Mitte eine Metallspitze befestigt ist; sie ruht auf einer Walze, die bei den neueren Apparaten aus Wachs besteht. Sie wird durch ein Uhrwerk langsam gedreht und gleichzeitig verschoben, so dass die ruhende Spitze eine Spirale hineinzeichnet. Spricht man nun in den Schallbecher, so macht die Platte und Spitze die Luftschwingungen mit, die Spitze gräbt also in das Wachs eine diesen Schwingungen genau entsprechende Kurve.

Bringt man dann die Spitze wieder an den Anfang der eingegrabenen Kurve, dreht die Walze mit derselben Geschwindigkeit wie vorher, so wird die Spitze gezwungen, genau dieselben Bewegungen auszuführen, wie die waren, durch welche sie jene Kurve eingrub. Also wird auch die Platte dieselben Schwingungen machen, und sie wird Luftschwingungen erzeugen, welche die vorher hineingerufenen Worte reproduzieren.

Eine andere sehr wichtige Benutzung der schwingenden Platten, beim Telephon, werden wir bei der Elektrizität besprechen (§ 326).

§ 222. Die Tonhöhe einer Wellenbewegung, welche an unser Ohr gelangt, hängt ab von der Zahl der Schwingungen, welche per Sekunde das Ohr treffen. Daraus ergibt sich die eigentümliche Folgerung, dass wir einen Ton höher oder tiefer hören können, als er wirklich ist, sobald Schallquelle und Beobachter sich gegen einander bewegen.

Von einer Schallquelle gehe eine Bewegung mit der Schwingungszahl n, der Schwingungsdauer T aus, der Beobachter befinde sich in beliebiger Entfernung, dann wird nach je T Sekunden eine Verdichtung von der Schallquelle abgehen, dieselben werden in den gleichen Zwischenräumen den Beobachter treffen und er wird den Ton n hören. Nun entferne sich aber die Schallquelle mit der Geschwindigkeit a vom Beobachter. Zwischen dem Abgang je zweier Verdichtungen wird sich die Quelle um a T entfernt haben, die der Schall noch ausser der ursprünglichen Entfernung zu durchlaufen hat. Ist seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit v, so ist die dazu nötige Zeit $\frac{aT}{v}$; die Schwingungsdauer T wird daher zu

$$T + \frac{a}{v} T = T\left(1 + \frac{a}{v}\right).$$

Nähert sich dagegen die Schallquelle, so wird die Schwingungsdauer $T\left(1 - \frac{a}{v}\right)$. Der Ton wird also erhöht bei Annäherung, vertieft bei Entfernung. Man bezeichnet diese Thatsache als das Dopplersche Prinzip. Man hat leicht Gelegenheit, diese Thatsache experimentell zu beobachten, wenn eine pfeifende Lokomotive vorbeifährt; dann schlägt scheinbar der Ton beim Vorbeifahren plötzlich um.

E. Wasserwellen.

§ 223. Da Flüssigkeiten nur Widerstand gegen Volumänderung besitzen, so sollten in ihnen nur longitudinale Wellen existieren. Das ist auch der Fall im Innern der Flüssigkeiten; an ihrer Oberfläche dagegen finden wir auch transversale Bewegung, die bekannten Wellen auf Wasserflächen. Dieselben sind aber prinzipiell verschieden von den bisherigen; während diese alle ihre Entstehung inneren Kräften, der Elasticität, verdanken, entstehen die Wasserwellen durch äussere Kräfte, nämlich die Schwere.

Wenn wir bei einer Wasserfläche ein Teilchen erheben, lassen es dann los, so wird es durch die Schwere heruntergezogen, erhält Geschwindigkeit und sinkt daher tiefer, als dem Gleichgewicht entspricht. Dabei verdrängt es die rings benachbarten Teilchen, die