

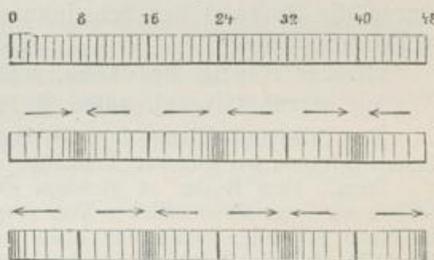
Schwingungen eines elastischen Stabes oder Fadens, wenn die Schwingungsrichtung der einzelnen Teile mit der Längenrichtung des Körpers zusammenfällt; transversal, wenn die Schwingungsrichtung auf der Längenrichtung senkrecht steht. Bei den Torsionsschwingungen endlich vollführen die einzelnen Teilchen drehende Bewegungen um die Längsaxe des schwingenden Körpers. Alle drei Arten von Schwingungen können sowohl bei fortschreitenden, wie bei stehenden Wellen stattfinden.

Die genannten Schwingungsformen können an einer elastischen Spiralfeder aus Messingdraht, welche durch ein angehängtes Gewicht mälsig gespannt ist, leicht nachgewiesen werden. Derselbe Körper kann gleichzeitig in Longitudinal-, Transversal- und Torsionsschwingungen versetzt werden, ohne daß dieselben einander gegenseitig stören. Die im vorigen Paragraphen betrachteten Seilwellen sind Transversalwellen; die Teile des schwingenden Körpers erleiden dabei abwechselnd Ausbiegungen nach entgegengesetzten Richtungen. Bei den Longitudinalschwingungen findet keine Biegung, sondern eine abwechselnde Ausdehnung und Zusammendrückung der Teile in der Längenrichtung statt. An den ruhenden Knotenpunkten treten dabei, durch das von beiden Seiten her gegen den Knoten hin stattfindende Zusammenrücken und Auseinanderweichen der Teile (s. Fig. 110), abwechselnd die stärksten Verdichtungen und Verdünnungen ein. In der Regel ist die Schwingungsdauer der transversalen Schwingungen größer als die der longitudinalen. Bei gespannten Saiten z. B. wird das Verhältnis beider durch die Quadratwurzel aus dem Quotienten der durch das spannende Gewicht bewirkten Verlängerung und der ganzen Länge der Saite ausgedrückt, oder ist $t' = t \sqrt{\delta}$, wenn δ diesen Quotienten bezeichnet. Wird z. B. eine Saite durch ein angehängtes Gewicht um $\frac{1}{100}$ ihrer Länge ausgedehnt, so sind die Longitudinalschwingungen 10 mal schneller als die transversalen.

Wie Saiten und Stäbe, die vorwiegend nach einer Richtung ausgedehnt sind, so können gespannte Membranen oder elastische Platten mit zwei Hauptdimensionen in Transversalschwingungen versetzt werden, bei welchen die Schwingungsrichtung auf der Ebene der Membran oder Platte senkrecht steht. Anstelle der Knotenpunkte treten dann in Ruhe bleibende Knotenlinien auf, die durch aufgestreuten Sand sichtbar gemacht werden können (Chladnis Klangfiguren, siehe unten § 118).

Endlich sind auch nach allen drei Dimensionen gleichmälsig ausgedehnte elastische Körper fähig, longitudinale und transversale Wellen fortzupflanzen, indem in diesem Fall als Longitudinalwellen diejenigen Wellen bezeichnet werden, bei welchen die Schwingungsrichtung der einzelnen Teilchen mit der Fortpflanzungsrichtung zusammenfällt, als Transversalwellen diejenigen, bei welchen sie auf derselben senkrecht steht. Bei ersteren finden abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen, bei letzteren nur seitliche Verschiebungen der in der Fortpflanzungsrichtung auf einander folgenden Schichten statt. Zur ersten Gattung gehören die Luftwellen, welche den Schall (§§ 113, 121), zur letzteren die Ätherwellen, welche das Licht (§ 176) fortzupflanzen.

Fig. 110.



Vierter Abschnitt.

Akustik oder Lehre vom Schall.

§ 113. Schall, Geräusch, Ton. Die gasförmigen Körper sind vermöge ihrer großen Elasticität in vorzüglichem Grade fähig, Wellenbewegungen fortzupflanzen. Jede hinreichend intensive Erschütterung

der Luft veranlaßt ein System von Longitudinalwellen (§ 112), welche aus abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen bestehen und sich von dem Erschütterungsmittelpunkte aus nach allen Richtungen hin mit gleicher Geschwindigkeit, mithin kugelförmig ausbreiten. Wird die Wellenbewegung bis zu unserem Gehörorgan fortgepflanzt, so nehmen wir dieselbe als Schallempfindung wahr. Eine unregelmäßige Lufterschütterung, wie sie z. B. durch eine Explosion, oder durch den Zusammenstoß zweier harten Körper erzeugt wird, wird im allgemeinen als mehr oder minder lautes Geräusch (Knall) empfunden. Von besonderer Wichtigkeit sind aber diejenigen Wellenbewegungen, welche durch die in gleichen Zeitintervallen sich regelmäßig wiederholenden Schwingungen elastischer Körper hervorgerufen werden, und die wir, wenn sie schnell auf einander folgen, als musikalische Töne wahrnehmen. Bei der Tonempfindung sind zu unterscheiden:

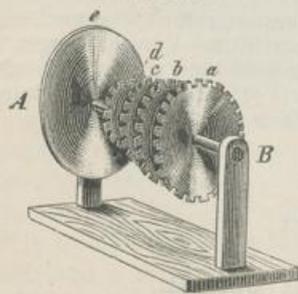
1. die Stärke oder Intensität des Tons, welche von der Schwingungsdauer oder Amplitude abhängt;
2. die Höhe des Tons, welche durch die Schwingungsdauer, oder durch die Anzahl der Schwingungen bedingt wird, die in einer Sekunde vollendet werden;
3. der Klang des Tons, welcher von der verschiedenen Form der Wellen herrührt (vergl. unten § 126).

Verschiedener Klang der Blasinstrumente, Streichinstrumente, der menschlichen Stimme, bei gleicher Tonhöhe.

Damit eine Reihe in gleichen Zeitintervallen auf einander folgender Luftwellen von uns als deutlicher Ton empfunden werde, muß die Anzahl der Wellen in einer Sekunde wenigstens etwa 16, oder die Schwingungsdauer kleiner als $\frac{1}{16}$ Sekunde sein (§ 115). Da demnach die einem bestimmten Ton entsprechende Schwingungsdauer stets nur ein kleiner Bruchteil einer Sekunde ist, so ist es zweckmäßig, anstatt der Schwingungsdauer T stets die Schwingungszahl n anzugeben. Es ist dann $T = \frac{1}{n}$ (§ 109).

§ 114. Musikalische Tonintervalle, Tonleiter, Sirene von Savart. Unter dem Intervall zweier Töne versteht man das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen. Um die den einzelnen Tönen der musikalischen Tonleiter entsprechenden Schwingungszahlen zu ermitteln, bedient man sich verschiedener mechanischer Vorrichtungen, durch welche mittelst schnell auf einander folgender Stöße, deren Zeitintervalle genau bekannt sind,

Fig. 111.



musikalische Töne erzeugt werden können. Eine der einfachsten dieser Vorrichtungen, welche man im allgemeinen Sirenen nennt, ist die von Savart angegebene. Auf einer gemeinschaftlichen Umdrehungsaxe AB (Fig. 111) sind mehrere, an ihrem Umfange mit Zähnen versehene Räder von verschiedenem Durchmesser befestigt. Dieselben lassen sich in schnelle Umdrehung versetzen, und zum Zweck messender Versuche kann die Anzahl der in einer Sekunde vollendeten Umdrehungen durch ein Uhrwerk geregelt und genau bestimmt werden. Eine auf derselben Axe befestigte Bleischeibe e dient dazu, durch ihr Beharrungsvermögen die Umdrehung möglichst gleichförmig zu erhalten. Wird gegen die Zähne eines der Räder ein elastisches Papierblättchen

gehalten, so veranlassen die gegen dasselbe stofsenden Zähne während jeder Umdrehung des Rades ebensoviel Schwingungen des Blättchens, als Zähne vorhanden sind, und erzeugen dadurch einen Ton, dessen Höhe von der Anzahl der Zähne und von der Drehungsgeschwindigkeit des Rades abhängt. Mittelst der verschiedenen, auf derselben Axe befestigten Räder lassen sich nun leicht die Verhältnisse der Schwingungszahlen der Töne der Tonleiter bestimmen. Sind z. B. vier Räder vorhanden, die beziehungsweise mit 40, 50, 60, 80 Zähnen versehen sind, und läßt man den Apparat während einer Sekunde 10 Umdrehungen machen, so werden die Schwingungszahlen der durch die vier Räder erzeugten Töne beziehungsweise 400, 500, 600, 800 sein. Der Versuch lehrt nun, daß die vier Töne bei diesen Schwingungsverhältnissen den musikalischen Grundaccord: Grundton, große Terz, Quinte und Oktave bilden. Wählt man z. B. *C* als Grundton, so ergeben sich die Schwingungsverhältnisse der vier Töne

$$C : E : G : c = 4 : 5 : 6 : 8.$$

Im allgemeinen gilt das schon von Pythagoras erkannte Gesetz, daß diejenigen Tonintervalle, deren Zusammenklingen einen harmonischen Eindruck auf unser Ohr macht, durch die einfachsten Zahlenverhältnisse dargestellt werden, und von Leibnitz († 1716,) rührt der charakteristische Ausspruch her: „*musica est exercitium arithmeticae occultum nescientis se numerare animi.*“

In obigem Grundaccord sind bereits die hauptsächlichsten harmonischen Tonintervalle enthalten, deren Einklang um so vollkommener ist, durch je kleinere Verhältniszahlen ihre Schwingungsverhältnisse ausgedrückt werden, nämlich

$$\begin{array}{ll} \text{die Oktave } C : c = 1 : 2 & \text{die große Terz } C : E = 4 : 5 \\ \text{„ Quinte } C : G = 2 : 3 & \text{„ kleine Terz } E : G = 5 : 6 \\ \text{„ Quarte } G : c = 3 : 4 & \text{„ (kleine) Sexte } E : c = 5 : 8. \end{array}$$

Aus diesen Verhältnissen lassen sich ferner die Schwingungszahlen der übrigen Töne der Tonleiter ableiten. Setzt man, zur Vermeidung von Brüchen, die Schwingungszahl des Grundtons $C = 24$, so wird $E = 30$, $G = 36$, $c = 48$, ferner F als Quarte von $C = 32$, D als tiefe Quarte von $G = 27$, H als Quinte von $E = 45$, A als Quarte von $E = 40$, so daß man, je nachdem die Schwingungszahl des Grundtons = 24 oder = 1 gesetzt wird, folgende Zahlenverhältnisse für die Töne der diatonischen Tonleiter erhält:

<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>c</i>
24	27	30	32	36	40	45	48
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.
	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$

Das Schwingungsverhältnis der im Grundaccord nicht enthaltenen großen Sexte $C : A$ ist also = 3 : 5. Die in der dritten Reihe zwischen je zwei auf einander folgenden Tönen stehenden Brüche drücken die Intervalle dieser Töne aus. Es ist ersichtlich, daß von den drei vorkommenden Tonintervallen zwei sehr nahe gleich sind, indem ihr Quotient $\frac{9}{8} : \frac{10}{9} = \frac{81}{80}$, oder das sogenannte Komma, nur sehr wenig von der Einheit verschieden ist, daß hingegen das Intervall $\frac{10}{15}$ beträchtlich kleiner ist, als die beiden anderen. Man nennt deshalb in der Musik dieses Intervall ein halbes, die beiden anderen ganze Tonintervalle, und zwar unterscheidet man das Intervall $\frac{9}{8}$ als großen, $\frac{10}{9}$ als kleinen ganzen Ton (Major und Minor). Wie die einfachen Tonintervalle, so sind auch die Quintenintervalle der Tonleiter nicht genau gleich. So müßte z. B. *A* als reine Quinte von *D* $40\frac{1}{2}$ Schwingungen, anstatt 40 machen, oder das Quintenverhältnis $D : A$ ist um ein

Komma zu klein ($40 : 40\frac{1}{2} = 80 : 81$). Man unterscheidet deshalb reine Quinten, welche genau das richtige Verhältnis $2 : 3$ haben, und verminderte Quinten. Von der Unmöglichkeit, in einer fortlaufenden Reihe von Tönen gleichzeitig alle Quinten und auch alle Oktaven rein zu stimmen, überzeugt man sich durch den sogenannten Quintenzirkel. Indem man nämlich von einem beliebigen Grundton, z. B. C , ausgehend, immer in Quinten fortschreitet, bis man zu einer höheren Oktave des Grundtons gelangt, erhält man folgende Reihe von Tönen:

C, G, D, A, E, H $\begin{matrix} \text{fis cis' gis' dis'' ais'' f'' c''''} \\ \text{ges des' as' es'' b''} \end{matrix}$

Diese Reihe umfaßt 12 Quinten und 7 Oktaven. Da c'''' die siebente Oktave von C , ist, so stehen die Schwingungszahlen beider Töne, bei reiner Stimmung der Oktaven, im Verhältnis von $1 : 2^7$. Anderenfalls würde sich ihr Verhältnis, wenn man immer in reinen Quinten fortschreitet, gleich $1 : (\frac{3}{2})^{12}$ ergeben. Da nun $(\frac{3}{2})^{12} > 2^7$ ist, so ist beides nicht gleichzeitig möglich. Man muß daher, um die Oktaven rein zu erhalten, entweder, wie im obigen Schema der Schwingungszahlen angenommen ist, nur gewisse Quinten rein stimmen, andere dagegen um ein Komma vermindern, diese Stimmung heißt die reine Temperatur; oder man muß den Fehler auf alle Quinten gleichmäßig verteilen und erhält so die gleichschwebende Temperatur. Der Fehler jeder einzelnen Quinte wird dabei so klein, daß er nur für ein musikalisch feingebühtes Ohr bemerkbar ist. Das Intervall x , welches man der temperierten Quinte anstelle des reinen Verhältnisses $\frac{3}{2}$ zu geben hat,

ergibt sich daraus, daß $x^{12} = 2^7$ sein muß, woraus $x = \sqrt[12]{2^7} = 1,49831$, ein Wert, welcher von 1,5 nur sehr wenig verschieden ist. Alle ganzen Tonintervalle werden dann ebenfalls unter sich gleich und jedes gleich zwei halben Toninter-

vallen. Ein halbes Tonintervall wird durch das Verhältnis $1 : \sqrt[12]{2}$ oder $1 : 1,05946$ ausgedrückt. Die gleichschwebende Temperatur kommt hauptsächlich bei Instrumenten mit festen Tönen (Pianoforte) zur Anwendung, während z. B. bei Streichinstrumenten die Quinten rein gestimmt zu werden pflegen.

Pythagoras leitet die Schwingungsverhältnisse der Töne aus den Längen der Saiten ab. Die Sirene wurde (1819) von Cagniard de la Tour erfunden. Bei der Sirene von Cagniard de la Tour, sowie bei derjenigen von Oppel, wird der Ton durch einen Luftstrom erzeugt, welcher gegen eine rotierende Scheibe geblasen wird, die mit einer oder mehreren kreisförmigen Reihen von Löchern versehen ist. Befinden sich z. B. in einer Reihe 24 Öffnungen, in gleichen Abständen verteilt, so wird der Luftstrom bei jeder Umdrehung der Scheibe 24 mal hergestellt und wieder unterbrochen. Macht also die Scheibe 20 Umdrehungen in jeder Sekunde, so hört man einen Ton von 480 Schwingungen. Die Oppelsche Sirene enthält auf einer Pappscheibe zahlreiche Löcherreihen, welche den harmonischen Tonintervallen entsprechen und zur Erläuterung der Schwingungsverhältnisse der Töne dienen. — Eine Modifikation der Sirene von Cagniard de la Tour, die Brownsche Sirene, bei welcher anstelle der komprimierten Luft Dampf von hoher Spannung zur Anwendung gelangt, wird als sogenanntes Nebelsignal zur Warnung der Schiffer an der Meeresküste benutzt; ihr durchdringender, schriller Ton vermag besser als die Dampfpfeife, oder als Glocken- und Kanonensignale das Getöse der Brandung zu übertönen. Der Schall der auf der Nebelstation Bülk thätigen Sirene ist 11 Kilometer weit zu vernehmen.

Von besonderer Wichtigkeit ist noch eine Reihe von Tönen, deren Schwingungszahlen nach den Verhältnissen der natürlichen Zahlenreihe wachsen, oder unter einander in den Verhältnissen $1 : 2 : 3 : 4 : \dots$ stehen. Diese Reihe ist unter dem Namen der harmonischen Oberreihe bekannt. Geht man vom Grundton C aus, so erhält man folgende Reihe:

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

$C c g c' e' g' i'' c'' d'' e'' k'' g'' \dots$

Die Töne 7, 11, welche in dieser Reihe mit i' , k'' bezeichnet sind, sind in der Tonleiter nicht enthalten, indem i' zwischen a' und b' , k'' zwischen f'' und gis'' liegt. Schwingende Saiten und Pfeifen vermögen außer ihrem Grundton noch eine Anzahl höherer Töne zu geben, welche der harmonischen Oberreihe dieses Grundtons angehören (§§ 116, 119).

§ 115. Absolute Schwingungszahl, Kammerton. Nachdem im vorhergehenden die Verhältnisse zwischen den Schwingungszahlen der

verschiedenen Töne der Tonleiter festgestellt sind, genügt es, die absolute Schwingungszahl eines bestimmten Tons zu kennen, um daraus die Schwingungen aller übrigen Töne ableiten zu können. Als Ausgangspunkt für die Stimmung der musikalischen Instrumente wird in der Regel der sogenannte Kammerton a' gewählt, welcher 440 Schwingungen in einer Sekunde macht und durch die Normalstimmgabel angegeben wird.

Es wird später (§ 125) gezeigt werden, auf welche Weise es möglich ist, eine Stimmgabel mit außerordentlicher Genauigkeit auf eine bestimmte Zahl von Schwingungen abzustimmen. — Solange eine Normalstimmung nicht festgesetzt war, fanden zwischen den Stimmungen der verschiedenen Orchester beträchtliche Differenzen statt, und namentlich erhöhte sich die Stimmung im Lauf der Zeit immer mehr, bis in Deutschland, nach dem Vorschlag von Scheibler, die Schwingungszahl $a' = 440$, während in Frankreich $a' = 435$ vollständigen oder 870 halben Schwingungen festgesetzt wurde. Demnach bildet $C_{11} = 16\frac{1}{2}$ etwa die untere Grenze der hörbaren Töne, während andererseits ein Ton nicht mehr hörbar ist, wenn seine Schwingungszahl größer ist als 40–50 000. Die musikalisch gut brauchbaren Töne mit deutlich wahrnehmbarer Tonhöhe haben nach Helmholtz zwischen 40 und 4000 Schwingungen, liegen also im Bereiche von 7 Oktaven und ihre Wellenlänge (§ 121) zwischen 8 m und 8 cm.

Die tonerregenden Körper können in drei Gruppen eingeteilt werden:

1. durch Spannung elastische (weich-elastische) Körper — gespannte Saiten und Membranen;
2. durch Steifigkeit elastische (hart-elastische) Körper — elastische Stäbe und Platten;
3. luftförmige und tropfbar flüssige Körper.

§ 116. Gespannte Saiten und Membranen. Die Gesetze der Tonerregung durch gespannte Saiten ergeben sich aus den früher (§ 111) besprochenen, allgemeinen Gesetzen der Schwingungen elastischer Körper. Aus der Taylorsche Formel ergibt sich die Schwingungszahl des Grundtons einer gespannten Saite

$$n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{gP}{k}}$$

Die Schwingungszahl ist also der Länge der Saite umgekehrt proportional. Sie wächst in direktem Verhältnis der Quadratwurzel aus der Spannung und ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus dem Gewicht der Längeneinheit der Saite. Bei gleichbleibender Spannung wird also der Ton durch Verkürzung der Saite, bei gleichbleibender Länge durch vergrößerte Spannung erhöht. Dickere Saiten geben bei gleicher Länge und Spannung tiefere Töne. Darmsaiten geben, da sie leichter sind, höhere Töne als Metallsaiten von gleicher Dicke und Spannung. — Die Tonerregung geschieht durch Anschlagen der Saite mit einem Hämmerchen (Klavier), mit dem Finger (Zither, Gitarre), oder Streichen mit dem durch Kolophonium rauh gemachten Violinbogen (Violine, Cello u. s. w.).

Außer dem Grundton, bei welchem die Saite als Ganzes schwingt, kann dieselbe noch die Reihe von Obertönen geben, welche der harmonischen Oberreihe des Grundtons (§ 114) entsprechen (Flageolettöne), wobei sich die Saite durch Knotenpunkte in eine Anzahl von Abteilungen teilt, welche der Ordnungszahl des Obertons entspricht (§ 111). Die Obertöne werden am besten erregt, indem man die gespannte Saite in $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$... der Länge leise mit dem Finger berührt und dann mit dem Bogen an einer Stelle anstreicht, wo ein Schwingungsbauch liegen muß.

Durch sehr schiefes Anstreichen der Saite mit dem Violinbogen, oder durch Reiben mit einem durch Kolophonium rau gemachten Tuch kann dieselbe in Longitudinalschwingungen versetzt werden. Die Longitudinaltöne der Saiten sind viel höher als die Transversaltöne (§ 112).

Die Gesetze der Schwingungen gespannter Saiten werden am Monochord nachgewiesen, welches aus einer Saite besteht, die an beiden Enden festgeklammert werden kann, nachdem derselben durch ein angehängtes Gewicht von willkürlich abzuändernder Größe eine beliebige Spannung erteilt worden ist. Durch einen beweglichen Steg kann ein Stück der Saite abgegrenzt werden, dessen Länge an einer unter derselben angebrachten Skala abgelesen werden kann. Die Saite ist über einem aus dünnen, elastischen Holzplatten zusammengesetzten hohlen Resonanzkasten aufgespannt. Der Ton einer in freier Luft ausgespannten Saite ist nämlich nur schwach hörbar, weil wegen der geringen Oberfläche der Saite die Schwingungen sich nur in geringem Maße der umgebenden Luft mitteilen. Dadurch aber, daß der Resonanzkasten und die in demselben enthaltene Luftmasse von den Befestigungspunkten der Saite aus in Mitschwingungen versetzt werden, wird die Mitteilung der Schwingungen an die umgebende Luft erleichtert und der Ton lauter hörbar. Es ist deshalb bei allen Saiteninstrumenten ein Resonanzboden oder ein mit Schalllöchern versehener Resonanzkasten angebracht, über welchem die Saiten aufgespannt werden.

Das Stimmen der Saiteninstrumente geschieht in der Regel durch Änderung der Spannung mittelst eines drehbaren Wirbels. Durch erhöhte Temperatur (§ 198), sowie bei Darmsaiten durch Luftfeuchtigkeit (§ 219), wird die Spannung verringert, daher die Tonhöhe vertieft. Bei der Violine, Gitarre u. s. w. werden auf derselben Saite verschiedene Töne erzeugt, indem die Saitenlänge durch den Druck des Fingers auf dem Griffbrett begrenzt wird.

Die Schwingungen gespannter Membranen finden in der Musik eine geringere Anwendung, — z. B. bei Trommeln, Pauken — und befolgen weniger einfache Gesetze als die der Saiten. Im allgemeinen wächst die Tonhöhe auch hier mit der Spannung der Membran und nimmt mit wachsender Ausdehnung und Dicke derselben ab. Doch können die Schwingungen einer Membran mannigfaltigen (nicht der harmonischen Oberreihe angehörigen) Tönen entsprechen, indem sich dieselbe durch Knotenlinien auf sehr verschiedene Weise in schwingende Abteilungen teilen kann. Diese Knotenlinien können durch aufgestreuten Sand sichtbar gemacht werden (vergl. § 118).

§ 117. Elastische Stäbe, Stimmgabel. Elastische Stäbe können in Longitudinal-, Transversal- und Torsionsschwingungen versetzt werden; im allgemeinen entsprechen den Transversalschwingungen die tiefsten, den Torsionsschwingungen die höchsten Töne. — Die Transversalschwingungen befolgen verschiedene Gesetze, je nachdem der Stab an einem

Fig. 112.



Ende oder an beiden Enden frei, angestemmt oder eingeklemmt ist. Der Ton ist um so höher, je kürzer oder dicker der Stab, und je größer die Elasticität seiner Substanz ist. Bei einem an einem Ende eingeklemmten Stab ist die Schwingungszahl dem Quadrat der Länge umgekehrt proportional. — Außer dem Grundton vermag der Stab eine Reihe (nicht harmonischer) Obertöne zu geben.

Eine besondere Anwendung finden die Transversalschwingungen elastischer Stäbe bei der Stimmgabel. Dieselbe besteht aus einem Stahlstab mit zwei parallelen Schenkeln, welche durch eine Uförmige Biegung vereinigt sind. An der Biegungsstelle ist die Stimmgabel mit einem Stiel versehen. Die Schwingungen der Stimmgabel erfolgen so, daß, wie in Fig. 112 angedeutet, beide Schenkel gleichzeitig nach außen oder nach innen schwingen, wobei sich in der Nähe der Biegung, bei *a* und *b*, zwei ruhende Knoten-

punkte bilden. Die Transversalschwingungen der Stimmgabel teilen sich dem Stiel als Longitudinalschwingungen mit. Der Ton der angeschlagenen Stimmgabel ist wenig hörbar, solange dieselbe mit der Hand am Stiel in freier Luft gehalten wird. Er wird laut hörbar, sobald der Stiel auf einen festen Körper aufgesetzt wird, der als Resonanzboden (§ 116) dient. Zweckmäßig wird mit der Stimmgabel ein Resonanzkasten verbunden, dessen Dimensionen der Schwingungszahl der Stimmgabel entsprechend gewählt sind. Außer ihrem Grundton vermag die Stimmgabel noch die Oktave desselben und eine Reihe anharmonischer Obertöne zu geben.

Um die Schwingungen einer Stimmgabel graphisch darzustellen, befestigt man etwa an dem Ende des einen Schenkels der Gabel seitwärts ein Stiftchen und zieht dann, der schwingenden Gabel entlang, berufstes Papier mit gleichförmiger Geschwindigkeit vorüber, so daß das Stiftchen auf dem Papier einen feinen Strich hinterläßt. Das Papier ist dazu am besten über eine Walze gezogen, welche durch ein Uhrwerk in gleichförmige Umdrehung versetzt wird (Kaleidophon).

Die Longitudinaltöne der Stäbe können durch Reiben mit einem feuchten, oder durch Kolophonium rauh gemachten Tuch erregt werden. Die Schwingungszahl des Grundtons ist der Länge des Stabes umgekehrt proportional, im übrigen von der Dicke desselben unabhängig und lediglich von der Elasticität seiner Substanz bedingt (§ 111). Die sogenannte Stabharmonika besteht aus einer Reihe von Rohrstäben, deren Längen den Schwingungszahlen der Töne der Tonleiter umgekehrt proportional abgemessen sind.

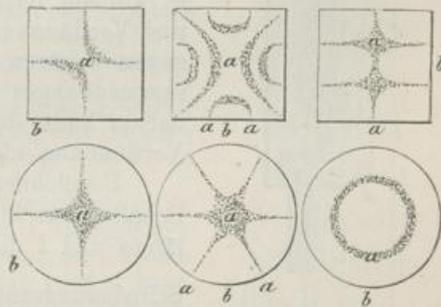
§ 118. Elastische Platten können, wie gespannte Membranen, auf mannigfaltige Weise in Schwingungen versetzt werden, indem sie sich durch Knotenlinien in einzelne schwingende Abteilungen teilen.

Chladni machte (1787) die Knotenlinien dadurch sichtbar, daß er feinen Sand auf die schwingende Platte streute. Die Sandkörnchen wurden von den in Bewegung befindlichen Teilen der Platte fortgeschleudert und sammelten sich auf den ruhenden Knotenlinien an (Fig. 113). Am mannigfaltigsten sind die so entstehenden Chladnischen Klangfiguren bei regelmäßig gestalteten, z. B. quadratischen Platten. Den tiefsten Tönen, welche eine Platte zu geben vermag, entsprechen die einfachsten, den höchsten Tönen die am meisten zusammengesetzten Figuren.

Die Töne werden am besten durch Anstreichen mittelst des Violinbogens (bei *b*) erzeugt, während die Platte an solchen Punkten, durch welche die Knotenlinien gehen sollen (bei *a*), eingeklemmt oder mit dem Finger berührt wird. Auch gekrümmte elastische Platten (Gläser, Glocken) teilen sich durch Knotenlinien in einzeln schwingende Abteilungen. An einem zur Hälfte mit Wasser gefüllten Weinglase können diese durch die Wirbelbewegungen des Wassers sichtbar gemacht werden. Einen eigentümlichen, spiralförmigen Verlauf zeigen die Knotenlinien auf Glasröhren, welche durch Kombination von longitudinalen mit transversalen oder Torsionsschwingungen erzeugt werden.

Eine andere Art von Klangfiguren erzeugte Faraday, indem er Bärlappsaamen auf die schwingende Platte streute. Infolge der durch die Schwingungen erzeugten wirbelförmigen Luftbewegung sammelt sich dieser in rundlichen, wirbelnden Häufchen an den Stellen der stärksten Schwingungen an.

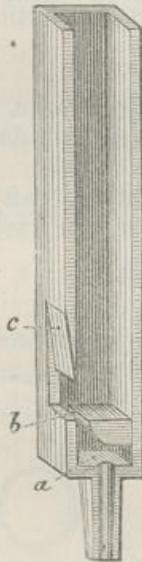
Fig. 113.



§ 119. Tonerregung durch luftförmige Körper, offene und gedeckte Pfeifen (D. Bernoulli, 1762). Die luftförmigen Körper sind vermöge ihrer großen Elasticität nicht nur zur Fortpflanzung der Schallwellen, sondern auch zur Tonerregung durch stehende Schwingungen in hohem Grade geeignet. Jede durch die Wände eines Gefäßes begrenzte Luftmasse ist solcher stehenden Schwingungen fähig, welche in derselben durch Resonanz (z. B. durch eine über die Öffnung des Gefäßes gehaltene, auf den entsprechenden Ton abgestimmte Stimmgabel), durch Anblasen mittelst eines gegen den Rand des Gefäßes gerichteten Luftströmes, oder auf andere Weise erzeugt werden können. Besonders häufig kommen zur Anwendung die stehenden Schwingungen der Luft in röhrenförmigen Gefäßen oder Pfeifen. Bei den Lippenpfeifen wird der Ton mittelst des an einem Ende des Rohres angebrachten Mundstückes erregt, und man unterscheidet offene und gedeckte (gedackte) Pfeifen, je nachdem das andere Ende der Röhre offen oder verschlossen ist.

Bei den Lippenpfeifen der Orgel gelangt die Luft aus der Windlade in den sogenannten Fuß *a* (Fig. 114), aus welchem dieselbe durch einen schmalen Spalt *b* ausströmt*). Der aus dem Spalt austretende Luftstrom bricht sich an der gegenüberstehenden Kante *c*, welche die Lippe genannt wird. Der Zwischenraum *bc* zwischen Spalt und Lippe heißt die Mundöffnung. — Ganz ähnlich ist das Flötenmundstück eingerichtet.

Fig. 114.



Für die Bestimmung der Tonhöhe der Pfeifen gilt die Regel, daß sich am geschlossenen Ende einer Pfeife stets ein Schwingungsknoten, am offenen Ende ein Schwingungsbauch befinden muß. Am geschlossenen Ende sind nämlich die Luftteilchen durch die die Röhre begrenzende Gefäßwand an der Bewegung gehindert, es können daselbst nur abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen stattfinden. Am offenen Ende hingegen besitzen die Luftteilchen wegen des freien Zusammenhanges mit der Atmosphäre volle Beweglichkeit, darum kann dort eine beträchtliche Verdichtung oder Verdünnung nicht stattfinden.

Bezeichnet *c* die Geschwindigkeit, mit welcher die Schallwellen in der Luft fortschreiten, λ die Wellenlänge und *l* die Länge der Pfeife, so ist (§ 109) die Schwingungszahl $n = \frac{c}{\lambda}$. Wenn eine offene Pfeife

ihren tiefsten Ton oder Grundton giebt, so ist nur ein Schwingungsknoten vorhanden, welcher in der Mitte der Pfeife liegt, also von jedem der Schwingungsbäuche an den offenen Enden der Pfeife um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge oder $\frac{1}{4} \lambda$ entfernt ist (§ 111). Es ist demnach

$$l = \frac{1}{2} \lambda, \quad \lambda = 2l, \quad n_1 = \frac{c}{2l}$$

Beim zweiten Ton der Pfeife sind zwei Schwingungsknoten vorhanden,

*) Der Spalt ist in der Figur absichtlich zu breit gezeichnet worden.

welche unter sich um $\frac{1}{2} \lambda$ und von jedem offenen Ende der Pfeife um $\frac{1}{4} \lambda$ entfernt sind. Es ist daher $l = \lambda$ und $n_2 = 2 \frac{c}{2l}$; ebenso ergeben sich für die folgenden Obertöne der offenen Pfeife die Schwingungszahlen $3 \frac{c}{2l}$, $4 \frac{c}{2l}$. . . , oder die offene Pfeife vermag alle Töne der harmonischen Oberreihe zu geben.

Bei der gedeckten Pfeife liegt ein Schwingungsknoten am geschlossenen Ende. Beim Grundton der Pfeife ist dieser der einzige, mithin:

$$= \frac{1}{4} \lambda, \quad \lambda = 4l, \quad n_1 = \frac{c}{4l},$$

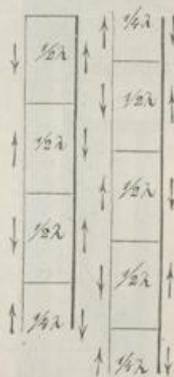
woraus folgt, daß der Grundton der gedeckten Pfeife die tiefere Oktave des Grundtons einer offenen Pfeife von gleicher Länge ist, oder daß eine gedeckte Pfeife denselben Grundton giebt, wie eine offene Pfeife von doppelter Länge. Beim ersten Oberton der gedeckten Pfeife ist außer dem Schwingungsknoten am Ende ein zweiter Schwingungsknoten vorhanden, dessen Abstand vom geschlossenen Ende mithin $\frac{1}{2} \lambda$, vom offenen Ende der Pfeife hingegen $\frac{1}{4} \lambda$ beträgt; es ist daher $l = \frac{3}{4} \lambda$, $\lambda = \frac{4}{3} l$ und $n_2 = 3 \frac{c}{4l}$, ebenso ergeben sich für die folgenden Obertöne die Schwingungszahlen $5 \frac{c}{4l}$, $7 \frac{c}{4l}$. . . oder die gedeckte Pfeife giebt nur die ungeraden Töne der harmonischen Oberreihe.

Das Ansprechen des Grundtons oder der verschiedenen Obertöne einer Pfeife kann durch die verschiedene Weite des Spaltes b und der Mundöffnung bc , sowie die verschiedene Stärke des Luftstromes bewirkt werden. Die in Fig. 115 angezeichnete Lage der Knoten und Schwingungsbäuche kann nach Hopkins in einer Glaspfeife dadurch sichtbar gemacht werden, daß man eine über einen Ring gespannte, dünne Membran, auf welche Sand gestreut ist, mittelst eines Drahtes in der Pfeife auf und ab bewegt. Der Sand bleibt in Ruhe, wenn die Membran sich an einem Knotenpunkt befindet — auch klingt der Ton der Pfeife nur in diesem Fall rein, da sonst die Luftschwingungen durch die Membran gehemmt werden. Die Erfahrung hat übrigens gelehrt, daß die Entfernung des letzten Knotens vom offenen Ende der Pfeife etwas kleiner ist als $\frac{1}{4} \lambda$.

Für eine annähernde Schätzung der Tonhöhe kann in atmosphärischer Luft $c = 332$ m (1024 par.) angenommen werden (§ 121), und da außerdem näherungsweise die Schwingungszahl des Tons $C_1 = 16$ gesetzt werden kann (§ 115), so ist C_1 , der Grundton einer offenen 32füßigen, oder einer gedeckten 16füßigen Orgelpfeife. Da die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen der Quadratwurzel aus der Dichtigkeit umgekehrt proportional ist, so hängt auch die Tonhöhe einer Pfeife von der Beschaffenheit des darin enthaltenen Gases ab (s. unten § 122).

Für die stehenden Schwingungen der Luftsäule ist es unwesentlich, ob die Röhre gerade oder gebogen, weit oder eng ist, wenn nur scharfe Biegungen vermieden werden, und der Durchmesser des Rohres hinreichend klein ist im Verhältnis zur Länge. Man giebt deshalb den Röhren der Blasinstrumente (Trompete, Waldhorn) bei größerer Länge eine gewundene Gestalt. Das Material des Rohres (Holz, Metall) ist nicht auf die Tonhöhe, wohl aber auf den Klang des Tons von Einfluß. — Die Tonhöhe der Blasinstrumente kann abgeändert werden, entweder durch Verlängerung und Verkürzung des Rohres durch Auszüge oder Ventile

Fig. 115.



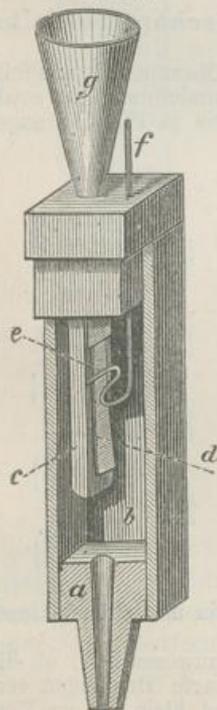
(Posaune, Waldhorn), oder durch Seitenöffnungen des Rohres, welche mit den Fingern, oder durch Klappen verschlossen werden (Flöte, Klarinette), wobei die Länge des Rohres jedesmal bis zur ersten unverschlossenen Seitenöffnung zu rechnen ist. Durch verschiedenes Anblasen werden die Obertöne zum Ansprechen gebracht (Trompete, Waldhorn), durch teilweises Decken (Stopfen) einer offenen Pfeife (Einführen der Hand in den bei den meisten Blasinstrumenten am Ende des Rohres angebrachten, erweiterten Schalltrichter) wird der Ton vertieft.

Beträgt der Röhrendurchmesser mehr als etwa $\frac{1}{20}$ der Länge, so ist derselbe von wesentlichem Einfluß auf die Tonhöhe, indem der Ton desto tiefer wird, je größer der Querschnitt der Pfeife.

Eine eigentümliche Art der Tonerzeugung in Röhren findet bei der von Higgins (1777) entdeckten, sogenannten Gasharmonika (chemischen Harmonika) statt. Über eine kleine Gasflamme, welche aus einem Glasrohr mit enger Öffnung kommt, wird eine weitere Glasröhre gestülpt. Die in dieser Glasröhre enthaltene Luftsäule wird dadurch in laut tönende Schwingungen versetzt. Der Eintritt dieser Schwingungen ist von einer eigentümlichen Veränderung im Aussehen der Flamme begleitet, deren Grund man erkennt, sobald man das Bild der Flamme in einem rotierenden, oder schnell hin und her bewegten Spiegel betrachtet. Dasselbe erscheint dann in eine Reihe getrennter Flammenbilder aufgelöst, deren Anzahl den Schwingungen der Luftsäule entsprechend ist. Durch Änderung der Röhrenlänge kann die Tonhöhe abgestimmt werden, und man kann mehrere solche tonangebende Flammen zu einem Accord vereinigen.

§ 120. Zungenpfeifen. Bei den Zungenpfeifen geschieht die Tonerregung mittelst einer elastischen, metallischen oder membranösen Zunge, durch deren Schwingungen ein durch eine Öffnung geblasener Luftstrom abwechselnd unterbrochen und wiederhergestellt wird.

Fig. 116.



Die im Ansatzrohr enthaltene Luftsäule wird dadurch in regelmäßige Schwingungen versetzt, deren Anzahl einerseits von der Beschaffenheit der Zunge, andererseits von der Länge der mitschwingenden Luftsäule abhängig ist, indem die Schwingungen beider innerhalb gewisser Grenzen auf einander Einfluß ausüben vermögen. Zur Gattung der Zungenpfeifen gehören die Klarinette, Oboe, Harmonika, die Schnarrwerke der Orgeln u. s. w. Auch Trompete und Waldhorn sind als Zungenpfeifen zu betrachten, indem bei denselben die auf das Mundstück aufgesetzten, gespannten Lippenränder die Stelle der vibrierenden Zunge vertreten; dasselbe gilt von den Stimmbändern des menschlichen Kehlkopfes (§ 127).

Die Mundstücke der Klarinette, Oboe und des Fagotts haben aus Rohrblättchen gebildete Zungen, die Harmonika und die sogenannten Schnarrwerke der Orgeln Metallzungen. Das Mundstück der Zungenpfeifen einer Orgel hat z. B. folgende Einrichtung. Durch das Rohr *a* (Fig. 116) tritt der aus der Windlade eingeblasene Luftstrom in den Fuß *b*. Dieser ist durch einen Deckel verschlossen, in welchen eine Blechkapsel *c* von der Form eines Halbcylinders eingesetzt ist. Letztere ist an der vorderen, ebenen Fläche mit einem rechteckigen Schlitz versehen, der durch eine elastische Stahllamelle *d* verschlossen ist. Diese ist nur an ihrem oberen Ende befestigt, im übrigen frei beweglich, so daß sie in ihrer Ruhelage die rechteckige Öffnung fast genau

verschließt, ohne jedoch beim Hindurchschlagen an die Ränder der Öffnung anzustreifen. Die in *b* eingeblasene Luft drückt gegen die Lamelle, öffnet sich dadurch den Ausweg nach dem Innern des Halbcylinders, von wo sie durch eine am oberen Ende des letzteren angebrachte Öffnung in das konische oder cylindrische Ansatz-

rohr g gelangt. Sobald durch das Entweichen der Luft der Druck im Fuß b vermindert ist, schwingt die Stahllamelle d vermöge ihrer Elasticität rückwärts und verschließt die Öffnung von neuem. Indem sich dieser Vorgang wiederholt, wird die Feder und durch den intermittierenden Luftstrom zugleich die Luftsäule im Ansatzrohr g in regelmäßige Schwingungen versetzt, deren Dauer einerseits von der Elasticität der Stahllamelle, andererseits von der Länge der schwingenden Luftsäule abhängt. Durch die mittelst des Drahtes f verstellbare Krücke e kann die Länge des schwingenden Teiles der Feder abgeändert und dadurch der Ton der Pfeife innerhalb gewisser Grenzen abgestimmt werden. — Der Klang des Tons der Zungenpfeifen ist ein mehr oder minder schnarrender, besonders wenn die Zunge nicht, wie bei dem beschriebenen Mundstück, eine durchschlagende, sondern eine auf die Ränder der Öffnung aufschlagende ist.

§ 121. Fortpflanzung des Schalles in der Luft. Die Verbreitung des Schalles in der Luft geschieht durch Longitudinalwellen, welche aus auf einander folgenden Verdichtungen und Verdünnungen bestehen und sich kugelförmig vom Erschütterungsmittelpunkt ausbreiten. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Schallwellen sich fortpflanzen, wird durch Kanonensignale bestimmt, indem an zwei Stationen von genau bekannter Entfernung Kanonen aufgestellt und auf beiden Stationen abwechselnd die Zeitintervalle beobachtet werden, welche beim Abfeuern der Kanonen zwischen der Wahrnehmung des Pulverblitzes und des Schalles der Explosion verfließen. Die zur Fortpflanzung des Lichts erforderliche Zeit ist dabei als verschwindend klein zu betrachten (§ 133). Die genauesten Beobachtungen, welche auf diese Weise von Moll und van Beek (1823) in der Nähe von Utrecht angestellt wurden, haben für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, bei der Temperatur von 0° , den Wert von 332,15 m (1022,5 par.) ergeben.

Die Beobachtungen werden am zweckmäßigsten bei Nacht angestellt, weil die Luft zu dieser Zeit am ruhigsten ist, und die Signale am weitesten hörbar sind. Um einen möglichen Einfluß der Windesrichtung auf die Geschwindigkeit der Fortpflanzung des Schalles zu vermeiden, werden die Signale abwechselnd auf beiden Stationen gegeben und aus beiden so erhaltenen Bestimmungen das Mittel genommen. Die Geschwindigkeit des Schalles ist unabhängig vom Luftdruck, daher auf Bergen ebenso groß, wie in der Ebene, und aufwärts oder abwärts ebenso groß, wie in horizontaler Richtung. Die Intensität des Schalles dagegen ist in verdünnter Luft geringer, als in dichter Luft, und im luftleeren Raum ist die Fortpflanzung des Schalles nicht möglich (§ 98, 12). Von Thal zu Berg verbreitet sich der Schall leichter, als von Berg zu Thal, weil die dünneren Luftschichten leichter durch die dichteren in Schwingungen versetzt werden als umgekehrt. — Durch ungleichförmige Beschaffenheit der Luftschichten, Wolken, Nebel u. dergl. wird die Fortpflanzung des Schalles erschwert. — Hohe und tiefe Töne werden mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzt, was schon daraus hervorgeht, daß der Rhythmus einer aus der Entfernung gehörten Musik durch die Fortpflanzung nicht gestört wird. — Bei höherer Temperatur ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles größer, als bei niedriger Temperatur; um daher bei verschiedenen Temperaturen angestellte Beobachtungen vergleichbar zu machen, müssen sie auf eine und dieselbe Normaltemperatur, z. B. 0° , zurückgeführt werden. — Nach Untersuchungen von Kundt nimmt die Schallgeschwindigkeit der Luft in Röhren ab mit dem Durchmesser des Rohres, jedoch erst von einem gewissen Durchmesser an in merklicher Weise. Baille hat 1887 für die Schallgeschwindigkeit in einer Röhre von 6 cm Durchmesser den Wert 309 m, in einer Röhre von 5 mm Durchmesser den Wert 281 m gefunden.

Über die theoretische Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles, zu welcher die Wärmelehre erforderlich ist, vergl. § 230 a.

§ 122. Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in anderen Gasen, sowie in flüssigen und festen Körpern. Die direkte Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles in anderen Gasen als atmosphärischer Luft ist darum nicht ausführbar, weil Gasmassen von hinreichender Ausdehnung nicht

hergestellt werden können. Dieselbe kann jedoch leicht auf indirektem Wege bestimmt werden, indem man dieselbe Pfeife nach einander mit atmosphärischer Luft und mit verschiedenen Gasen gefüllt anbläst (§ 119). Wird z. B. die Pfeife in Wasserstoffgas angeblasen, so erhält man als Grundton die Doppeloktave des Tons, welchen dieselbe Pfeife in Sauerstoff giebt, woraus folgt, daß bei gleicher Wellenlänge die Schwingungszahl in Wasserstoff 4mal so groß ist, als in Sauerstoff, oder da $c = n \cdot \lambda$, daß die Geschwindigkeit des Schalles in Wasserstoffgas die vierfache ist. Durch derartige Versuche bestimmten Dulong und später Masson die Geschwindigkeit des Schalles in verschiedenen Gasen. Für die chemisch einfachen Gase (O, H, N) und Gemenge derselben fand sich das Gesetz bestätigt, daß die Schallgeschwindigkeit der Quadratwurzel aus der Dichtigkeit umgekehrt proportional ist. Bei zusammengesetzten Gasen ist dieses Gesetz nur in dem Fall richtig, wenn die chemische Vereinigung der Grundstoffe ohne Volumenverminderung stattfindet (z. B. bei HCl); es erfährt dagegen eine Änderung, wenn die chemische Verbindung von einer Kontraktion begleitet ist (z. B. bei NH_3 , CO_2), indem aus Gründen, welche der Wärmetheorie angehören, der Laplacesche Koeffizient k (§ 230a) für diese Gase einen anderen Wert besitzt.

Die Geschwindigkeit des Schalles in Wasser ist von Colladon und Sturm (1827) durch direkte Versuche im Genfer See bestimmt worden. Mittelst unter Wasser gegebener Glockensignale fanden dieselben, daß der Schall im Wasser $4\frac{1}{2}$ mal schneller fortgeleitet wird, als in atmosphärischer Luft.

Auch durch feste Körper wird der Schall mit größerer Geschwindigkeit und häufig auch durch den festen Erdboden auf größere Entfernungen fortgepflanzt, als durch die Luft. So ist Kanonendonner öfter auf mehr als 200 Kilometer Entfernung gehört worden.

Die Geschwindigkeit des Schalles in festen Körpern kann aus der Dauer der Longitudinalschwingungen elastischer Stäbe mittelst des Gesetzes abgeleitet werden, daß die Schwingungsdauer des Grundtones eines Stabes derjenigen Zeit gleich ist, welche die Schallwelle braucht, um den Stab hin und zurück zu durchlaufen, oder daß $c = 2nl$ ist, wenn l die Länge des Stabes bezeichnet. Auf diese Weise fand z. B. Chladni, daß die Schallgeschwindigkeit in Eichenholz oder Messing $10\frac{2}{3}$, in Glas $16\frac{2}{3}$ mal größer ist, als in Luft, und Wertheim fand für gezogene Metalle bei $15-20^\circ$ folgende Werte, die Geschwindigkeit in Luft = 1 gesetzt:

Blei 4,3	Silber 8,1	Kupfer 11,2
Gold 6,4	Platin 8,2	Gußstahl 15,1.
Zinn 7,5	Zink 11,0	

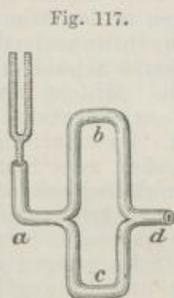
§ 123. Reflexion der Schallwellen. Echo. Auf der Zurückwerfung der Schallwellen durch feste Körper beruht das Echo (Wiederhall, Nachhall), welches daher in gebirgigen Gegenden mit senkrecht abfallenden Felswänden häufig vorkommt. Bei geringer Entfernung der reflektierenden Wand, z. B. in großen Sälen, ist die Zwischenzeit zwischen der Wahrnehmung der ursprünglichen und der zurückgeworfenen Welle so klein, daß dieselben nicht getrennt wahrgenommen werden, sondern daß letztere nur einen störenden Nachhall bewirkt, welcher durch zweckmäßige Unterbrechung der Wände durch Nischen, Vorhänge u. s. w. vermindert werden kann. Da wir in einer Sekunde etwa 8—10 Silben deutlich getrennt zu hören imstande sind, so ist zur Erzeugung eines sogenannten einsilbigen Echos eine solche Entfernung der reflektierenden Wand erforderlich, daß der Hin- und Rückweg von der Schallwelle in $\frac{1}{10}$ Sekunde durchlaufen wird, d. i. etwa 50' (16,6 m), für ein zweisilbiges Echo 100' (33,2 m), u. s. w. Mehrfache Echos können durch mehrere reflektierende Wände, die sich in verschiedener Entfernung befinden, oder durch wiederholte Reflexion an zwei gegenüberstehenden Wänden erzeugt werden.

Bekannte, teils vielsilbige, teils mehrfache Echos sind z. B. bei Adersbach in Böhmen, welches 7 Silben 3mal, beim Schloß Simonetta bei Mailand, welches einen Pistolenschuß 56mal, am Rhein zwischen Koblenz und Bingen, welches ein Wort 17mal wiederholt.

Auf der regelmässigen Zurückwerfung der Schallwellen beruhen die Erscheinungen der sogenannten Flüstergewölbe in Kirchen u. s. w. Infolge einer in § 57a erwähnten Eigenschaft der Ellipse werden alle in einem Brennpunkt eines elliptischen Gewölbes erregten Schallwellen so zurückgeworfen, daß sie sich im andern Brennpunkt vereinigen, so daß in einem Brennpunkt leise gesprochene Worte für ein im andern Brennpunkt befindliches Ohr hörbar sind, während ein dazwischen stehender Beobachter nichts zu hören vermag. Ähnliches kann bei zwei gegenüberstehenden, halbkreisförmigen Nischen u. dergl. stattfinden.

Durch ein in die Wände eines Hauses eingemauertes Kommunikationsrohr kann der Schall auf grössere Entfernung ungeschwächt fortgeleitet werden, indem durch Zurückwerfung an den Wänden des Rohres die seitliche Ausbreitung gehindert wird. In gleicher Weise werden durch die Wände eines konischen Sprachrohrs die vom Munde ausgehenden Schallwellen so zurückgeworfen, daß sie sich beim Austritt aus dem Sprachrohr vorzugsweise in einer der Axe des Rohres parallelen Richtung fortpflanzen und darum in dieser Richtung weiter hörbar sind. Umgekehrt sammelt das Hörrohr die durch die weite Öffnung einfallenden Schallwellen und führt dieselben verstärkt durch die enge Öffnung zum Ohr.

§ 124. Interferenz der Schallwellen. Wie im allgemeinen zwei Wellensysteme sich durch Interferenz gegenseitig verstärken oder aufheben können, je nachdem sie mit gleichen oder mit entgegengesetzten Schwingungsphasen zusammentreffen (§ 110), so gilt dies insbesondere von den Schallwellen, was durch verschiedene Versuche nachgewiesen werden kann. Hopkins wendete zu diesem Zwecke ein an seinem unteren Ende gabelförmig in zwei Schenkel geteiltes und am oberen Ende durch eine Membran verschlossenes Rohr an. Dieses Rohr wird über eine schwingende, elastische Platte gehalten, nachdem auf die Membran feiner Sand gestreut ist. Je nachdem beide Schenkel sich über Teilen der Platte befinden, welche in gleichen oder in entgegengesetzten Schwingungsphasen begriffen sind, verstärken oder vernichten sich die Wellen im oberen Teil des Rohres, was aus der Bewegung oder Ruhe der auf die Membran gestreuten Sandkörner erkannt wird. Quincke befestigte, um die Interferenz der



Schallwellen hörbar zu machen, den Stiel einer Stimmgabel in einem Kautschukrohr *a* (Fig. 117), welches mit einem in zwei Zweige von ungleicher Länge *b*, *c* geteilten Rohr in Verbindung stand, so daß die durch *a* eintretenden Schallwellen, nachdem sie die ungleichen Wege *abd*, *acd* durchlaufen hatten, sich in *d* wieder vereinigten. Das Ende des Rohres *d* wird in die Ohröffnung gesteckt. Ist nun der Längenunterschied der Schenkel *b* und *c* so abgemessen, daß er einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen des Grundtons der Stimmgabel entspricht, so treffen im Rohr *d* stets entgegengesetzte Schwingungsphasen zusammen, und der Ton ist durch das Rohr *d* nicht hörbar. Er wird aber sofort hörbar, wenn der Längenunterschied der beiden Zweige abgeändert, oder wenn einer von beiden verschlossen wird.

§ 125. Schwebungen und Kombinationstöne. Befinden sich die Schwingungen zweier tönenden Körper, z. B. zweier Stimmgabeln, in genauem Einklang, so wird ihr Ton nur wie ein einziger hörbar. Werden aber die Schwingungen der einen von beiden durch auf die Zinken geklebte Wachsstückchen ein wenig verzögert, so wird ein in regelmäßigen Intervallen sich wiederholendes Anschwellen und Abnehmen der Intensität des Tons hörbar. Diese periodischen Schwankungen der Tonstärke, welche mit dem Namen der Schwebungen bezeichnet werden, rühren von der Interferenz der von beiden Tonquellen erregten Schallwellen her. Dieselben folgen um so schneller auf einander, je größer die Differenz der Schwingungszahlen beider Töne ist, und zwar ist die Anzahl der Schwebungen, welche in einer Sekunde gehört werden, gleich der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne.

Der Grund dieser Interferenzerscheinung ist leicht ersichtlich. Macht z. B. die eine Stimmgabel 200 Schwingungen, die andere dagegen 202 Schwingungen in einer Sekunde, und befinden sich zu einer bestimmten Zeit beide in gleichen Schwingungsphasen, so hat nach einer halben Sekunde die eine Gabel 100, die andere 101 Schwingungen gemacht, und die Phasen sind wieder in Übereinstimmung, ebenfalls nach 1, $1\frac{1}{2}$, 2, $2\frac{1}{2}$, . . . Sekunden; dagegen ist nach $\frac{1}{4}$ Sekunde nach $\frac{3}{4}$ Sekunden, u. s. w. die eine Gabel der anderen um $\frac{1}{2}$ Schwingung vorgeeilt, daher findet während jeder Sekunde zweimal eine Verstärkung und zweimal eine Schwächung des Tons durch Interferenz statt. Wird die Differenz der Schwingungszahlen so weit vergrößert, daß mehr als 10 — 12 Schwebungen in einer Sekunde stattfinden, so sind dieselben nicht mehr einzeln wahrnehmbar, sondern es erhält der Klang des Tons dadurch eine gewisse Rauigkeit, welche auf unser Ohr den unangenehmen Eindruck einer Dissonanz macht.

Eine andere Interferenzerscheinung verwandter Art, welche durch das Zusammenwirken zweier Töne erzeugt wird, bilden die sogenannten Kombinationstöne oder Tartinischen Töne (1714). Wird z. B. ein Ton *c* gleichzeitig mit seiner Quinte *g* angegeben, so hört man einen tieferen Ton *C* leise mitklingen, dessen Schwingungszahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne ist. Die Töne *c* und *f* geben ebenso den Kombinationston *F*. Außer diesen Differenztönen ist von Helmholtz eine andere Gattung von Kombinationstönen nachgewiesen worden, die Summationstöne, deren Schwingungszahl gleich der Summe der Schwingungszahlen der ursprünglichen Töne ist; doch sind dieselben weit schwächer und schwieriger wahrnehmbar, als die Differenztöne.

Mittelst der Schwebungen ist es möglich, die Töne zweier musikalischen Instrumente in außerordentlich genauen Einklang zu bringen, indem man mit dem Abstimmen so lange fortfährt, bis die Schwebungen verschwinden. Um Stimmgabeln auf die normale Zahl von 440 Schwingungen abzustimmen, bedient man sich einer Hilfsstimmgabel, welche z. B. 436 Schwingungen macht. Jede der zu stimmenden Gabeln muß dann mit dieser Hilfsgabel 4 Schwebungen in der Sekunde geben, was mit großer Genauigkeit ermittelt werden kann. Scheibler verfertigte eine Reihe von Stimmgabeln, deren jede mit der vorhergehenden 4 Schwebungen gab, und welche durch das Intervall einer Oktave aufstiegen. Mittelst dieses Tonometers war es möglich, die Schwingungszahl jedes Tons innerhalb des Intervalls der Oktave durch Schwebungen genau zu bestimmen. Da eine Stimmgabel außer ihrem Grundton die Oktave als Oberton giebt, so geben zwei Stimmgabeln, welche sich fast genau um eine Oktave unterscheiden, ebenfalls Schwebungen, mittelst deren das genaue Oktavenintervall mit außerordentlicher Schärfe ermittelt werden kann. War z. B., um die Oktave zu erreichen, eine Reihe von 32 Stimmgabeln erforderlich, von denen jede mit der vorhergehenden 4 Schwebungen gab, so betrug die Differenz der Schwingungszahlen von Grundton und Oktave 128, mithin die absolute Schwingungszahl des Grundtons 128, die der Oktave 256. — Einfacher als der Scheiblersche Apparat ist der von Appunn konstruierte Tonmesser, in welchem die Stimmgabeln durch Metallzungen ersetzt sind, die durch einen aus einer Windlade kommenden Luftstrom zum Tönen gebracht werden.

Andere Methoden, die Schwingungsverhältnisse zweier Stimmgabeln durch optische Hilfsmittel mit großer Genauigkeit zu bestimmen, sind von Lissajous angegeben worden.

§ 126. Klang der Töne. Die durch verschiedene musikalische Instrumente, z. B. durch Streichinstrumente, Blasinstrumente, die menschliche Stimme, erzeugten Töne besitzen auch bei gleicher Tonhöhe und Intensität einen verschiedenen Klang, welcher den Tönen jedes Instrumentes ihren eigentümlichen Charakter giebt; ja das menschliche Stimmorgan vermag einem und demselben Ton nach Willkür den verschiedenen Klang der Vokale *a*, *e*, *i*, *o*, *u* zu geben. Durch Helmholtz ist (1862) auf das bestimmteste nachgewiesen worden, daß der verschiedene Klang der Töne davon herrührt, daß fast kein Instrument den Grundton allein hören läßt, sondern daß dieser fast stets von einer Reihe von Obertönen begleitet ist, welche der harmonischen Oberreihe des Grundtons (§ 114) angehören, und durch deren verschiedene Zahl und Intensität eben der eigentümliche Charakter der Töne, oder der Klang jedes Instrumentes bedingt ist. So erscheinen namentlich diejenigen Töne scharf, schmetternd und schrillend, welche zahlreiche und intensive Obertöne enthalten.

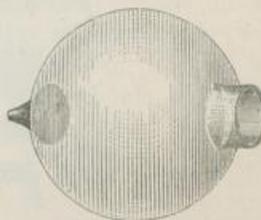
Die in einem Klange enthaltenen Töne, den Grundton miteingeschlossen, bezeichnet Helmholtz als die Teiltöne oder Partialtöne des Klanges und zwar den Grundton als den ersten Teilton, den ersten, zweiten, . . . Oberton bezüglich als den zweiten, dritten, . . . Teilton, so daß die Ordnungszahl jedes Teiltönen zugleich das Verhältnis seiner Schwingungszahl zu der des Grundtons angiebt. (Der Obertonapparat von Appunn.)

Gewohnheitsmäßig fassen wir die aus Kombinationen der Grundtöne mit gewissen Obertönen zusammengesetzten Klänge wie einfache Töne auf, so daß wir nur den Grundton mit der eigentümlichen Klangfarbe des Instruments zu hören glauben und das Vorhandensein der Obertöne in dem Klang nur dann wahrnehmen, wenn unsere Aufmerksamkeit besonders auf dieselben gerichtet ist, oder wenn ihre Wahrnehmung durch geeignete Hilfsmittel (z. B. „Resonatoren“), welche die Obertöne stärker hervortreten lassen, erleichtert wird. Insbesondere gilt dies von den durch alltägliche, fortdauernde Gewohnheit uns bekannten Vokalklängen der menschlichen Stimme. Die Zusammensetzung der Vokalklänge aus Obertönen hat Helmholtz unzweifelhaft durch zwei verschiedene Methoden nachgewiesen, die als die synthetische und analytische Methode bezeichnet werden können. Die erstere beruht auf der wirklichen Zusammensetzung der Vokalklänge aus den einfachen Grundtönen einer Reihe von Stimmgabeln, deren Schwingungsverhältnisse den Tönen der harmonischen Oberreihe entsprechen, welche Zusammensetzung einfacher vermittelt des Vokalapparates von Appunn durch Holzpfifen mit Ventilen herzustellen ist; die letztere beruht darauf, daß aus den auf eine bestimmte Note gesungenen Vokalklängen die in ihnen enthaltenen Obertöne mittelst ins Ohr gesteckter Resonatoren von kugelähnlicher Gestalt (Fig. 118), die auf einen bestimmten Ton abgestimmt sind und daher nur diesen verstärken, deutlich herausgehört werden. Mittelst dieser Methoden fand Helmholtz z. B., daß der Vokal *U* durch den Grundton *B* mit nur schwachem Mitklingen des zweiten und dritten Teiltönen *b* und *f'* erzeugt wird, daß bei *O* der Ton *b'* stark, daneben *b*, *f'*, *d''* schwächer mitklingen, während *A* und namentlich *E* und *I* eine größere Zahl hoher Obertöne enthalten. Die verschiedenen Vokalklänge werden durch die menschliche Stimme erzeugt, indem wir durch veränderte Gestalt der Mundhöhle — Verlängerung, Verkürzung derselben, verschiedene Weite der Mundöffnung — die Resonanz des in ihr enthaltenen Luft-raumes für die verschiedenen Töne abändern.

Singt man in ein Klavier, von dessen Saiten die Dämpfer durch den Fortezug gehoben sind, der Reihe nach die Vokale *a*, *e*, *i*, *o*, *u*, so tönen aus dem Klavier deutlich dieselben Vokalklänge zurück, indem durch jeden Vokal die seinen Obertönen entsprechenden Saiten zum Mitklingen gebracht werden und so denselben Klang zusammensetzen.

Daß auch die Klänge der Saiten u. s. w., die durch Anstreichen oder An-

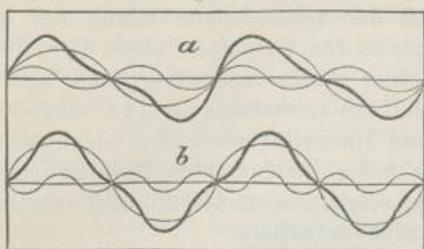
Fig. 118.



schlagen an verschiedenen Stellen erzeugt werden, durch die verschiedenen in ihnen enthaltenen Obertöne bedingt sind, läßt sich teils durch Resonatoren, teils durch optische Hilfsmittel nachweisen.

Durch das Mittönen der Obertöne eines Grundtons wird die Form der Tonwellen beeinflusst, und man kann deshalb auch sagen, daß der Klang eines Tons von der Form der Wellen abhängt. So stellt z. B. Fig. 119a die Form der Wellen vor, welche durch die Kombination eines Grundtons mit seiner

Fig. 119.



Oktave, Fig. 119b die Form, welche durch Kombination des Grundtons mit dem dritten Teilton oder der Quinte der Oktave erzeugt wird.

Umgekehrt läßt sich auf mathematischem Wege zeigen, daß jede beliebige periodische Schwingungsform in eine Reihe einfacher Schwingungen zerlegt werden kann, welche den Tönen der harmonischen Oberrreihe entsprechen.

Man kann die verschiedenen Schwingungsformen einer Saite sichtbar machen, indem man einen leichten Schreibstoff, z. B. ein Stückchen Federbart, mit etwas Wachs an der Saite befestigt, und nachdem man dieselbe in Schwingungen versetzt hat, ein berufenes Papierblatt schnell an dem Stift vorbeiführt; dieser zeichnet dann auf der Rufschrift die aus den zusammenklingenden Obertönen resultierende Schwingungsform der Saite auf (§ 117).

§ 127. Das menschliche Stimmorgan. Der zur Erzeugung der menschlichen Stimme dienende Kehlkopf bildet das obere Ende der Luft-röhre. Der Kehlkopf selbst besteht aus mehreren Knorpeln, welche durch Bänder mit einander verbunden und durch besondere Muskeln beweglich und mit einer Schleimhaut überzogen sind. Fig. 120 a stellt den Kehlkopf von der Seite, Fig. 120 b von hinten gesehen dar. Der Ringknorpel *a* bildet

Fig. 120a.

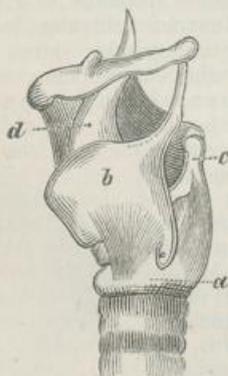
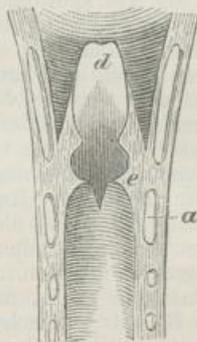


Fig. 120b.



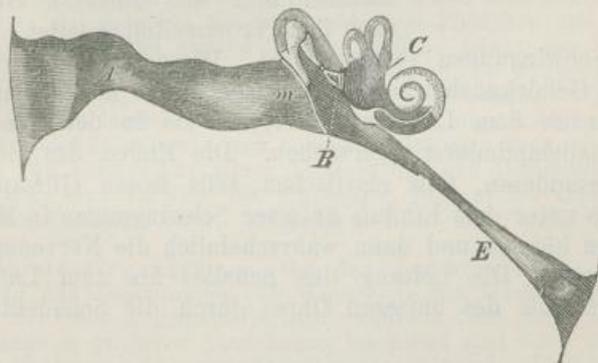
einen Ring, welcher hinten höher ist als vorn und auf welchem vorn der Schildknorpel *b*, hinten die Giefsbeckenknorpel *c* befestigt sind. Bei *d* ist auf dem Schildknorpel der Kehildeckel befestigt, welcher beim Schlingen den Eingang zum Kehlkopf verdeckt. Zwischen dem Schildknorpel und den beiden Giefsbeckenknorpeln sind die elastischen Stimmbänder *e* ausgespannt, welche, von der Schleimhaut des Kehlkopfes überzogen, zwischen sich einen schmalen Spalt, die Stimmritze, lassen. Durch die Muskeln des Kehlkopfes können die Knorpel gegen einander bewegt, und kann insbesondere durch veränderte Stellung der Giefsbeckenknorpel

gegen einander und gegen den Schildknorpel die Stimmritze erweitert, oder verengt und die Spannung der Stimmbänder geregelt werden. Beim ruhigen Atmen findet die Luft durch die geöffnete Stimmritze ungehinderten Durchgang. Beim Sprechen oder Singen versetzt der zwischen den einander genäherten Rändern der Stimmbänder hindurchgepresste Luftstrom diese in Schwingungen nach Art der Zungenpfeifen, wobei die Schwingungszahl hauptsächlich durch die Spannung der Stimmbänder bedingt, aber wie bei den Zungenpfeifen, auch von der mitschwingenden Luftmasse beeinflusst wird.

Brust- und Falsettöne. Bei letzteren schwingen nur die inneren Ränder der Stimmbänder. Über die Entstehung der Vokalklänge s. oben § 126. Die Konsonanten werden durch die Bewegungshindernisse gebildet, welche die Organe der Mundhöhle, Gaumen, Zunge, Zähne, Lippen, dem Luftstrom darbieten.

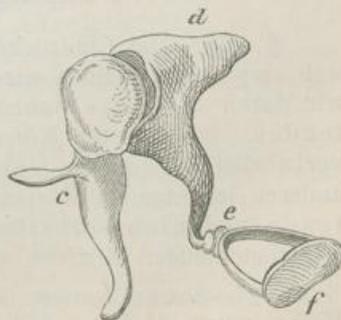
§ 128. Das Gehörorgan. Das Ohr zerfällt in das äußere und innere Ohr. Ersteres besteht aus der zum Auffangen der Schallwellen dienenden Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang *A* (Fig. 121 in natürlicher Größe), welcher an seinem Ende durch eine schräg gestellte Membran, das Trommelfell *m*, verschlossen ist. Das innere Ohr ist in

Fig. 121.



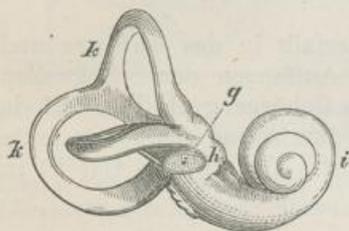
einem der festesten Knochen des Schädels, dem Felsenbein, eingeschlossen, welches einen Teil des Schläfenbeins bildet. Dasselbe zerfällt in die Trommelhöhle *B* und das Labyrinth *C*. Die Trommelhöhle wird durch das Trommelfell vom äußeren Gehörgang geschieden; sie ist mit Luft gefüllt und steht mit dem hinteren Teil der Nasenhöhle durch die Eustachische Röhre *E* in Verbindung, durch welche das Gleichgewicht des Druckes zwischen der in der Trommelhöhle enthaltenen Luft und der äußeren Atmosphäre hergestellt wird. Die Trommelhöhle enthält die Gehörknöchelchen, die in Fig. 122 in vierfacher (linearer) Vergrößerung besonders dargestellt sind und von ihrer Gestalt die Namen Hammer *c*, Ambos *d*, Linsenkörperchen *e*, und Steigbügel *f* erhalten haben. Der Stiel des Hammers ist an dem Trommelfell festgeheftet, während der Tritt des Steigbügels das nach dem Labyrinth führende

Fig. 122.



ovale Fenster *g* verschließt. Das Labyrinth (in Fig. 123 ist ein Abgufs seiner Höhlung dargestellt) besteht aus dem Vorhof *h*, der Schnecke *i* und den drei halbkreisförmigen Kanälen *k*. Dasselbe ist mit der Gehörfeuchtigkeit angefüllt und mit den Membranen des häutigen Labyrinths ausgekleidet, auf welchen sich die Fasern des Gehörnerven ausbreiten, namentlich zahlreich auf den sogenannten Ampullen der halbkreisförmigen Kanäle und in der spiralförmigen Scheidewand, welche das Innere der Schnecke in eine obere und eine untere Windung teilt. Erstere mündet an der Basis der Schnecke in den Vorhof, letztere endet in dem runden Fenster, welches durch eine Membran, das kleine Trommelfell, verschlossen ist und nebst dem ovalen Fenster des Vor-

Fig. 123.



hofs die Verbindung mit der Trommelhöhle herstellt. Die spiralförmige Scheidewand der Schnecke zeigt einen sehr zusammengesetzten Bau und die in derselben enthaltenen, erst in neuerer Zeit vom Marchese Corti entdeckten und nach ihm benannten Cortischen Fasern scheinen insbesondere zur Wahrnehmung der musikalischen Töne zu dienen. Die Schallwellen werden durch die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang bis nach dem Trommelfell geleitet, welches durch dieselben in Schwingungen versetzt wird. Diese pflanzen sich teils durch die Reihe der Gehörknöchelchen, teils durch die in der Trommelhöhle enthaltene Luft nach dem Labyrinth fort, wo sie in den Fasern des Hörnerven die Schallempfindung verursachen. Die Enden des Hörnerven sind überall mit besonderen, teils elastischen, teils festen Hilfsapparaten verbunden, welche unter dem Einfluß äußerer Schwingungen in Mitschwingung versetzt werden können und dann wahrscheinlich die Nervenmasse erschüttern und erregen. Die Leitung des Schalles bis zum Labyrinth kann auch mit Ausschluß des äußeren Ohres durch die Schädelknochen stattfinden.

Fünfter Abschnitt.

Optik oder Lehre vom Licht.

Vom Ursprung und der Ausbreitung des Lichtes.

§ 129. Die Eindrücke, welche wir durch das Auge von der Außenwelt empfangen, nennen wir Lichtempfindungen. Jeder Körper, welchen wir durch das Auge wahrnehmen, sendet Licht aus, ist also ein leuchtender. Die meisten Körper vermögen aber nicht selbständig Licht hervorzubringen, sondern werfen nur das Licht zurück, welches sie von anderen leuchtenden Körpern empfangen. Man hat danach selbstleuchtende und nichtselbstleuchtende Körper zu unterscheiden. Zu den selbstleuchtenden Körpern gehören:

1. Die Sonne, unsere hauptsächlichste Lichtquelle, und die Fixsterne. Weiter unten (§§ 150 u. 239) zu erörternde Erscheinungen machen es in hohem