

1834. Nobili in Florenz construirt den Thermomultiplicator.  
1838. Jacobi in Dorpat und Spencer in England erfinden fast gleichzeitig die Galvanoplastik.  
1838 (?) Wagner in Frankfurt erfindet den electromagnetischen Hammer.  
1845. Faraday bewirkt durch den electricen Strom eine Veränderung (Drehung) des polarisirten Lichtes.  
1851. Ahumforff construirt den nach ihm benannten Inductionsapparat.

## Dritte Abtheilung. Schall, Licht und Wärme.

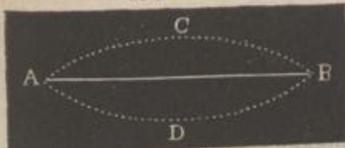
### Achter Abschnitt. Vom Schalle.

#### §. 165. Schwingende Bewegung schallender Körper.

Der Schall entsteht durch die Erzitterungen oder Schwingungen elastischer Körper. An einer tönenden Saite oder Glocke vermögen wir die schwingende Bewegung der einzelnen Theile unmittelbar mit den Augen wahrzunehmen.

Als Beispiel, an welchem wir diese Bewegung näher erörtern wollen, möge eine gespannte Saite AB (Fig. 217) dienen. Sieh selbst überlassen, nimmt dieselbe die Lage einer geraden Linde an. Bringen wir die Saite aus dieser Lage, z. B. durch einen Zug mit der Hand in eine gekrümmte Lage ACB, so strebt sie vermöge ihrer Elasticität beständig in die geradlinige Lage zurückzukehren und zwar mit um so größerer Kraft, je mehr die krumme Linie ACB von der geraden Linie AB abweicht.

(Fig. 217.)



Die Saite kehrt, so wie wir sie los lassen, aus der gekrümmten Lage ACB in die geradlinige Lage AB zurück; und sie bewegt sich hierbei mit wachsender Geschwindigkeit, weil ihre Elasticität fortwährend auf diese Bewegung beschleunigend wirkt, so daß sie in der geradlinigen Lage AB, wo diese Einwirkung aufhört, die größte Geschwindigkeit erlangt. Sie kommt daher in dieser Lage nicht zur Ruhe, sondern fährt vermöge des Trägheitsgesetzes fort sich zu bewegen, aber mit abnehmender Geschwindigkeit, weil jetzt die Elasticität der Saite ihrer Bewegung entgegenwirkt, weshalb sie auch diese Bewegung nur bis zu einer gewissen äußersten Lage ADB fortsetzt und dann in die entgegengesetzte Bewegung übergeht. Denken wir uns zunächst um größerer Einfachheit willen, daß die Saite vollkommen elastisch ist, und abstrahiren wir überdies von allen Hindernissen der Bewegung, so muß die äußerste Lage ADB, welche die Saite erreicht, von der geradlinigen Lage AB genau eben so viel abweichen, als die Lage ACB,

um welche dieselbe ursprünglich von der geraden Linie AB entfernt worden ist, wie leicht daraus hervorgeht, daß während der zweiten Hälfte der besprochenen Bewegung die Geschwindigkeit der Saite durch die Gegenwirkung der Elasticität ganz eben so vermindert wird, als sie vorher durch dieselbe beschleunigt worden ist. — Aus der Lage ADB kehrt die Saite dann auf ganz gleiche Weise in die Lage ACB zurück, und sie würde so ohne Aufhören immer genau gleiche Schwingungen machen müssen, wenn, wie gesagt, ihrer Bewegung keine Hindernisse entgegenständen und sie vollkommen elastisch wäre. Weil aber in der Wirklichkeit diese Bedingungen nie vollständig erfüllt sind, so werden bei einer jeden Saite die auf einander folgenden Schwingungen immer kleiner, bis dieselbe endlich ganz zur Ruhe kommt.

Ein Hin- und Hergang der Saite aus der Lage ACB in die Lage ADB und wieder zurück in die Lage ACB wird eine Schwingung genannt. Man würde dieses beim Pendel eine Doppelschwingung nennen.

Ueberhaupt ergibt sich aus der obigen Darstellung, daß die schwingende Bewegung einer Saite die größte Aehnlichkeit mit der eines Pendels hat. Sie stimmt mit diesem besonders auch noch in dem Umstande überein, daß bei der nämlichen Saite die Dauer einer Schwingung von der Größe derselben fast ganz unabhängig ist. Der empirische Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptung geht aus folgender Erfahrung hervor: Wenn wir eine Saite auf einem Clavier oder Flügel anschlagen, so tönt dieselbe einige Zeit fort; dieser Ton wird allmählich schwächer und verschwindet zuletzt für unsere Wahrnehmung, indem die Schwingungen der Saite immer kleiner werden. Die Höhe oder Tiefe dieses Tones dagegen bleibt, wie lange derselbe auch anhalten mag, unverändert die nämliche. Da nun, wie wir sogleich sehen werden, die Höhe eines Tones allein von der Zahl der in einer Secunde vollendeten Schwingungen abhängt, so folgt hieraus, daß die Saite während der ganzen Dauer ihres Tönens immer gleich viel Schwingungen, also in der letzten Secunde eben so viel kleinere als in der ersten größere Schwingungen macht.

Wie die Schwingungen einer tönenden Saite sich der Luft oder andern mit derselben in Berührung stehenden Körpern mittheilen und nach unserm Ohre fortgepflanzt werden, davon wird weiter unten (§. 175) die Rede sein\*).

Das im Vorhergehenden über die Schwingungen einer elastischen Saite Gesagte gilt im wesentlichen auch von den Schwingungen aller andern einen Schall erzeugenden Körper. Berücksichtigen wir von denselben nur diejenigen, welche in der Musik angewendet werden, so unterscheiden wir zunächst feste und luftförmige Körper, indem flüssige wegen ihrer geringen Elasticität keine Anwendung finden. Daß die Luft der eigentlich schallende Körper in den Blasinstrumenten ist, werden wir weiter unten (§. 170) ausführlicher zeigen. Die festen Körper zerfallen weiter in folgende Abtheilungen:

1) Solche, bei denen eine Dimension, die Länge, die beiden anderen, Breite und Dicke, überwiegt. Diese lassen sich wieder eintheilen

\*) Wir weichen von dem Gange der meisten Lehrbücher ab und handeln in den folgenden Paragraphen zunächst von den Tonverhältnissen, weil mehrere Bestimmungen über die Geschwindigkeit des Schalles, über die absolute Größe der Schwingungszahlen u. a. m. wesentlich auf der Kenntniß dieser Verhältnisse beruhen.

- a) in starre oder Stäbe, welche z. B. in Spieluhren, Stahlgeigen u. dgl. angewendet werden;
- b) in biegsame oder Saiten, welche ihre Elasticität erst äußern, wenn sie gespannt sind.
- 2) Solche Körper, bei denen zwei Dimensionen die dritte überwiegen. Auch hier unterscheiden wir
- a) starre oder Scheiben, welche entweder eben oder gekrümmt sein können, welches letztere bei den Glocken der Fall ist;
- b) gespannte Membranen, z. B. bei den Pauken; ferner die Stimmbänder in dem Organe, durch welches die Stimme der Menschen oder Thiere hervorgebracht wird.

In Hinsicht der Schwingungen, durch welche ein Schall erzeugt wird, unterscheidet man hauptsächlich zwei Arten:

- a) transversale, deren Richtung auf der Hauptausdehnung des schallenden Körpers senkrecht ist, wohin z. B. die oben besprochenen Schwingungen einer Saite gehören;
- b) longitudinale, welche in der Richtung der Hauptdimension des schallenden Körpers erfolgen, wie dies z. B. bei der Luft in den Blasinstrumenten der Fall ist.

Eine Saite kann nicht bloß transversale, sondern auch longitudinale Schwingungen machen. Man erregt diese bei einer Saite auf der Geige, wenn man dieselbe mit dem Bogen unter einem sehr spitzen Winkel streicht, wodurch ein hoher, unreiner Ton entsteht. Elastische Stäbe können sowohl in transversale als auch in longitudinale Schwingungen versetzt werden. Man erregt die letzteren, wenn man den Stab in der Richtung seiner Länge mit einem Lappen reibt, welchen man mit pulverisirtem Bimstein bestreut hat. Endlich kann man bei einem runden Stabe auch noch eine dritte Art von Schwingungen, nämlich drehende, erzeugen, indem man den Stab mit einem solchen Lappen in einer auf seiner Länge senkrechten Richtung reibt.

Im Jahre 1853 hat Savart in Paris (kurz vor seinem Tode) die merkwürdige Entdeckung gemacht, daß auch beim Ausfließen des Wassers aus engen Oeffnungen oder Röhren Töne erzeugt werden können. Das Entstehen und die Stärke dieser Töne wird vorzüglich durch die Höhe des Ausflußröhrchens bedingt. Dieselben sind nur wahrnehmbar, wenn diese Höhe nicht kleiner als der halbe und nicht größer als der doppelte Durchmesser des Röhrchens ist. Die Höhe der Töne aber hängt von der Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers und dem Durchmesser des Röhrchens ab; sie ist der ersteren nahezu direct, dem letzteren umgekehrt proportional. — Indem die Höhe der Wasseräule im Gefäße während des Ausfließens sich vermindert, nimmt die Stärke des Tones in wiederholten Abwechselungen zu und bis zum Verschwinden ab.

### §. 166. Schwingungszahlen der Töne.

Wenn ein Schall eine nicht allzu kurze Dauer hat und wir denselben als etwas Gleichartiges empfinden, so nennen wir ihn Klang oder Ton, das letztere besonders dann, wenn wir die Höhe oder Tiefe berücksichtigen. Geht einem Schall dieses Gleichartige ab, so nennen wir denselben Geräusch. Ein Ton entsteht durch regelmäßige, ein Geräusch durch unregelmäßige Schwingungen eines schallenden Körpers.

Haben die Schwingungen eine sehr kurze Dauer, hören sie gleich nach ihrem Entstehen wieder auf, so vernehmen wir keinen eigentlichen Ton, sondern einen Knall, wie z. B. beim Schlagen eines Hammers gegen einen harten Körper, beim Durchschneiden der Luft mit einer Peitschenschnur u. dgl. Stoßen die Zähne eines Rades gegen einen elastischen Stab, so vernehmen wir bei langsamer Umdrehung des Rades jeden Stoß einzeln. Wird aber das Rad so rasch gedreht, daß wir die einzelnen Stöße nicht mehr zu unter-

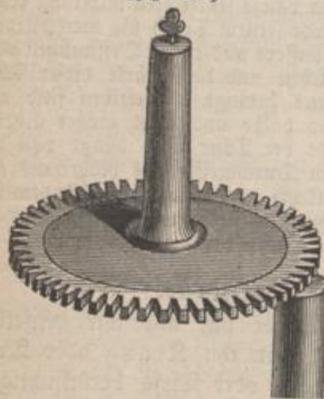
scheiden vermögen, so entsteht die Empfindung eines Tones. Dieser ist um so höher, je rascher das Rad gedreht wird.

Ueberhaupt hängt die Höhe oder Tiefe des Tones von der Geschwindigkeit ab, mit welcher ein schallender Körper schwingt, oder was dasselbe sagen will, von der Anzahl der Schwingungen, welche er in jeder Secunde vollendet. Ein Ton ist um so höher, je größer die Schwingungszahl ist.

Wenn man einen elastischen Stab mit dem einen Ende an einem Schraubstock befestigt und hierauf in Schwingungen versetzt, so wird man, wenn der Stab hinreichend lang ist, leicht im Stande sein, die Schwingungen desselben zu zählen. Verkürzt man den Stab, so nimmt die Zahl der Schwingungen zu und zwar in dem quadratischen Verhältnisse, in welchem die Länge abgenommen hat. Der halb so lange Stab macht also viermal, der auf den dritten Theil verkürzte Stab neunmal so viel Schwingungen u. s. w. Hat man den Stab so weit verkürzt, daß durch die Schwingungen desselben ein deutlich wahrnehmbarer Ton entsteht, so wird man dieselben nicht mehr zu zählen vermögen; das eben angeführte Gesetz aber setzt uns in den Stand, die Zahl derselben zu berechnen. Macht z. B. der Stab ursprünglich zwei Schwingungen in der Secunde, und ist derselbe bis auf den fünften Theil verkürzt worden, so macht er jetzt  $2 \cdot 25 = 50$  Schwingungen in der Secunde.

Dieses Verfahren, dessen sich Chladni (1788?) zur Ermittlung der absoluten Schwingungszahlen der Töne bediente, gewährt jedoch nur einen sehr geringen Grad von Genauigkeit, da man die durch unmittelbare Zählung bestimmten Schwingungszahlen, zumal bei den höheren Tönen, mit sehr großen Zahlen zu multipliciren hat und sich daher auch die mit jenen Bestimmungen unvermeidlich verbundenen Fehler in demselben Verhältnisse vergrößern.

(Fig. 218.)



Eine weit größere Genauigkeit gewährt eine von Cagnard de la Tour (1819) erfundene und Sirene genannte Vorrichtung. Diese besteht nach der einfachsten Einrichtung aus einer um eine senkrechte Aze drehbaren Scheibe, welche am Rande mit zahlreichen Einschnitten versehen ist. Unter der Scheibe befindet sich in der Nähe des gezähnten Randes eine Röhre, in deren oberem, dicht an den gezähnten Rand der drehbaren Scheibe anschließendem Boden eine längliche Oeffnung angebracht ist, welche bei der Umdrehung der Scheibe abwechselnd geöffnet und geschlossen wird, je nachdem eine Lücke oder ein Zahn über dieselbe hinweggeht. Wenn man nun

durch die Röhre einen Luftstrom hindurchgehen läßt, so wird dieser bei der Umdrehung der Scheibe abwechselnd unterbrochen und erneuert. Wird die Scheibe nicht zu langsam gedreht, so vernimmt man in Folge hiervon einen Ton, der um so höher ausfällt, je rascher man dreht. Aus der Zahl der Einschnitte und der Zahl der Umläufe, welche die Scheibe in der Secunde macht, läßt sich die dem erzeugten Tone entsprechende Schwingungszahl mit Leichtigkeit und Sicherheit berechnen.

Man hat auf diese Art gefunden, daß dem Tone a der gewöhnlichen Stimmgabel (ohngefähr) 440 Schwingungen in der Secunde zukommen.

Auf den tiefsten überhaupt noch wahrnehmbaren Ton kommen nach Savart etwa 7, auf den höchsten 24,000 Schwingungen in der Secunde. Es versteht sich indeß wohl von selbst, daß diese Zahlen nur als ohngefähre Angaben anzusehen sind, indem dieselben theils durch die Empfindlichkeit des Ohres, theils durch die Größe der Excursionen des schallenden Körpers bedingt werden. Sind diese nur klein, so wird ein Ton weniger leicht vernommen, als bei größeren Excursionen.

Bei dem tiefsten in der Musik gebräuchlichen Tone, welchen eine beiderseits offene Pfeife von ohngefähr 32 Par. (oder 33 Preuß.) Fuß Länge gibt, macht die Luft 16 Schwingungen in der Secunde.

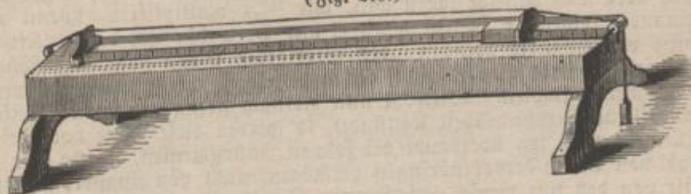
Diese Zahl, so wie auch alle andern im Vorhergehenden angeführten Schwingungszahlen beziehen sich immer auf ganze Schwingungen, von denen jede aus einem Hin- und Hergange des schwingenden Körpers besteht.

Savart bediente sich bei seinen Untersuchungen eines gezähnten Rades, welches an seinem Umfange eine große Zahl ganz gleicher Zähne trug, welche bei der Umdrehung gegen die Kante eines elastischen Blättchens stießen und dasselbe in Schwingungen versetzten. Die Zahl der Zähne multiplicirt mit der Zahl der Umdrehungen, welche das Rad in der Secunde macht, gibt die Zahl der Schwingungen des elastischen Blättchens.

### §. 167. Tonverhältnisse.

Wenn man eine Saite auf die Hälfte oder den dritten oder vierten Theil verkürzt, ohne ihre Spannung zu verändern, so macht dieselbe in der Secunde zwei-, drei-, viermal so viel Schwingungen, als wenn sie in ihrer ganzen Länge schwingt. Ueberhaupt nimmt bei ungeänderter Spannung die Zahl der Schwingungen einer Saite im umgekehrten Verhältnisse ihrer Länge zu. Nennen wir den Ton, welchen die in ihrer ganzen Länge schwingende Saite gibt, den Grundton, so wird der Ton, welchen die auf die Hälfte verkürzte Saite gibt, in der Musik die Octave genannt, weil zwischen ihr und dem Grundtone noch sechs in der Musik gebräuchliche Töne liegen, deren Aufeinanderfolge dem Ohre eine gewisse Befriedigung gewährt. Diese Töne führen nach der Reihe die Namen Secunde, Terz, Quart, Quinte, Sexte, Septime und werden, wenn wir für den Grundton C, für die Octave c setzen, mit D, E, F, G, A, H, bezeichnet. Um das Verhältniß der Schwingungszahlen dieser Töne zum Grundtone zu ermitteln, bedient man sich am einfachsten des Monochords. Dieses besteht aus einer über einen Resonanzboden gespannten Saite (Fig. 219), bei

(Fig. 219.)



welcher sich durch einen beweglichen Steg die Länge des schwingenden Theiles, der sich allemal nur von dem einen Ende bis zum Stege erstreckt, beliebig verkürzen läßt. Verkürzt man diesen Theil so lange, bis irgend ein bestimmter Ton, z. B. die Quinte zum Vorschein kommt, so findet man, daß die Länge des schwingenden Theiles zwei Drittel von der Länge der

Saite beträgt, wenn dieselbe den Grundton gibt. Da sich nun die Schwingungszahlen zweier Saiten bei ungeänderter Spannung umgekehrt wie ihre Längen verhalten, so verhält sich folglich die Schwingungszahl der Quinte zu der des Grundtones wie 3 zu 2.

Auf ähnliche Weise lassen sich auch leicht die Verhältnisse der Schwingungszahlen der übrigen Töne der Tonleiter zu der des Grundtones ermitteln. Man erhält auf diese Art, wenn man, um Brüche zu vermeiden, für die Schwingungszahl des Grundtons 24 setzt, für die einzelnen Töne folgende Verhältniszahlen:

C	D	E	F	G	A	H	c
24	27	30	32	36	40	45	48.

Wenn zwei Töne zugleich gehört werden, so bringen dieselben entweder eine angenehme Empfindung, welche wir Consonanz, oder eine unangenehme Empfindung hervor, welche wir Dissonanz nennen. Mehrere consonirende Töne bilden einen Accord. Zwei Töne consoniren um so vollständiger, in je kleineren Zahlen sich das Verhältniß ihrer Schwingungszahlen ausdrücken läßt, je öfter also die Schwingungen des einen Tones mit denen des anderen zusammentreffen.

Der Grundton, die Terz und die Quinte (C, E und G), deren Schwingungszahlen sich wie 4, 5 und 6 verhalten, werden in der Musik der große Dreiklang genannt. Das Verhältniß E:G = 5:6 heißt die kleine Terz und zum Unterschiede hiervon wird das Verhältniß C:E = 4:5 die große Terz genannt.

Wenn wir in der oben mitgetheilten Tonleiter sämtliche Töne mit dem Grundtone vergleichen, indem wir diesen gleich 1 setzen, so erhalten wir folgende Verhältniszahlen:

C	D	E	F	G	A	H	c
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Diese Zahlen zeigen das umgekehrte Verhältniß der Länge einer Saite an, welche bei ungeänderter Spannung die angegebenen Töne erzeugt. — Dieselben können uns ferner dazu dienen, wenn von einem Tone, welchen wir als Grundton annehmen, die Schwingungszahl gegeben ist, diese Zahl für die Secunde, Terz u. s. w. zu berechnen; wir werden nämlich nur nöthig haben, die Schwingungszahl des Grundtones mit  $\frac{9}{8}$ ,  $\frac{5}{4}$  u. s. w. zu multipliciren.

Dividiren wir in der obigen Tonleiter je zwei auf einander folgende Glieder in einander, so ergeben sich weiter folgende Zahlen

C	D	E	F	G	A	H	c
$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$ .	

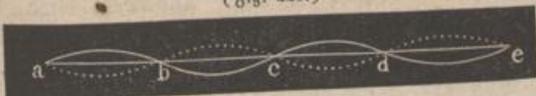
Es findet daher von einem Tone zum andern keineswegs durchgehends derselbe Fortschritt, das nämliche Intervall, sondern ein dreifach verschiedenes Verhältniß statt. Von diesen wird das größte Intervall  $\frac{9}{8}$  das eines großen und das nur wenig kleinere  $\frac{10}{9}$  das eines kleinen ganzen Tones,  $\frac{16}{15}$  aber das eines halben Tones genannt.

Ein Ton wird um einen halben Ton erhöht, wenn man die Schwingungszahl desselben mit  $\frac{16}{15}$  multiplicirt; er wird um eben so viel erniedrigt, wenn man mit  $\frac{16}{15}$  dividirt, oder was dasselbe sagen will, mit  $\frac{15}{16}$  multiplicirt. Wenn man von zwei auf einander folgenden Tönen, z. B. C und D, welche um das Intervall eines ganzen Tones von einander absteigen, den niedrigeren C mit  $\frac{16}{15}$ , den höheren mit  $\frac{15}{16}$  multiplicirt, so erhält man nicht genau dieselbe Zahl, sondern ein wenig von einander abweichende Zahlen: Wiewohl nun hiernach streng genommen zwischen Cis und Des eine kleine Verschiedenheit stattfindet, so werden diese Töne doch bei unsern Klavieren, Orgeln u. s. w., überhaupt bei solchen Instrumenten, welche nur eine beschränkte Zahl von Tönen hervorbringen vermögen, nicht von einander unterschieden. Dasselbe gilt von den nur wenig verschiedenen Verhältnissen eines kleinen und eines großen ganzen Tones. Man sieht schon hieraus, daß die Stimmung unserer Klaviere keine vollkommen reine sein kann. Wollte man ein Klavier oder eine Orgel für eine bestimmte Tonart nach ganz reinen Verhältnissen stimmen, so würden hieraus für andere Tonarten unerträgliche Fehler hervorgehen. Man pflegt daher die Abweichungen von den genauen Verhältnissen in angemessener Weise zu vertheilen, was Temperatur genannt wird. Wir gehen jedoch hierauf nicht näher ein, da dieser Gegenstand mehr der Musik als der Physik angehört.

**§. 168. Schwingende Saiten.**

Eine Saite kann auf zweierlei Arten schwingen; entweder sie schwingt als ein Ganzes in der Art, wie wir dies oben in §. 165 angegeben haben, oder sie theilt sich in aliquote Theile. Fig. 220 stellt eine in vier gleichen Theilen schwingende Saite dar.

(Fig. 220.)



Die Stellen b, c und d, welche die für sich schwingenden Abtheilungen trennen und in Ruhe

bleiben, werden Schwingungsknoten genannt. Zur Bestätigung und Veranschaulichung dieser Verhältnisse dient der folgende Versuch: Auf die Saite des Monochords (Fig. 219) setze man an verschiedenen Stellen kleine Papierstreifen in Form von Reiterchen; soll die Saite z. B. in vier aliquoten Theilen schwingen, so thut man dies am schicklichsten in den Theilungspunkten c und d und dann in der Mitte zwischen b und c, c und d und a und e. Streicht man nun die Saite ohngefähr in der Mitte zwischen a und b mit einem Bogen, während man die Stelle b sanft mit dem Finger berührt, so bleiben die Reiterchen in den Punkten c und d ruhen; die in der Mitte zwischen zwei Schwingungsknoten angebrachten aber werden herabgeworfen.

Man kann die in zwei, drei, vier . . . aliquoten Theilen schwingende Saite als aus zwei, drei, vier . . . einzelnen Seiten bestehend ansehen, welche alle vier gleiche Länge haben und gleichzeitig schwingen, doch so, daß während der eine Theil ab (Fig. 220) aufwärts schwingt, der folgende bc abwärts, der dann folgende cd wieder aufwärts schwingt u. s. f.

Nennen wir den Ton, welchen die in ihrer ganzen Länge schwingende Saite gibt, den Grundton, so vernehmen wir, wenn sich die Saite in zwei gleiche Theile getheilt hat, die Octave. Denn da Spannung und Dicke der Saite dieselben geblieben sind, jeder schwingende Theil aber nur die halbe Länge der ganzen Saite hat, so muß sich die Schwingungszahl verdoppelt haben, also die Octave entstehen. Aus gleichen Gründen vernimmt man, wenn sich die Saite in drei, vier, fünf, sechs . . . gleiche Theile theilt, Töne, deren Schwingungszahlen sich wie die Zahlen 3, 4, 5, 6 . . . verhalten, (nämlich die Quinte der Octave, die doppelte Octave, die Terz der doppelten Octave, die Quinte der doppelten Octave u. s. w.).

Auf dem Angeführten beruhen die sogenannten Flageolet-Töne der Guitarre und anderer Saiten-Instrumente, sowie auch die Einrichtung der Aeolis-Harfe. Diese besteht aus einem schmalen, aber mehrere Fuß langen Resonanzboden, über welchen man mehrere Saiten gespannt hat, welche sämtlich eine ganz gleiche Stimmung haben. Stellt man nun die Aeolsharfe in den Luftzug, z. B. in eine Thür oder ein Fenster, welches man etwas geöffnet hat, so werden die Saiten durch den Luftzug in Schwingungen versetzt und theilen sich zugleich in aliquote Theile. Da alle Saiten eine gleiche Stimmung haben, so harmoniren die entstehenden Töne sämtlich unter einander und bilden sehr schöne und reine Accorde.

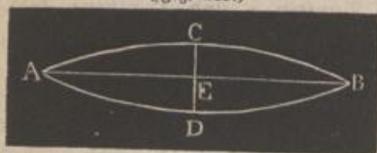
Man vernimmt bei längeren Saiten außer dem Haupttone nicht selten noch einen höheren, mit diesem harmonirenden Nebenton. Es muß daher die Saite zwei Schwingungsarten zugleich machen, als ein Ganzes und auch in aliquoten Theilen schwingen. Ähnliches gilt auch von anderen tönenden

Körpern; auch bei Stäben, Glocken, Blasinstrumenten u. a. m. bemerkt man häufig neben dem tieferen Grundtone noch einen höheren Nebenton.

Wenn eine Saite als ein Ganzes schwingt, so hängt die Tonhöhe zunächst von der Länge ab, und zwar ist sie, wie wir schon öfter angeführt haben, der Länge umgekehrt proportional. Außerdem wird die Höhe des Tones auch durch die Spannung, durch die Dicke und die Dichtigkeit (das spezifische Gewicht) der Materie, aus welcher die Saite besteht, bestimmt. Bei der nämlichen Saite wächst die Tonhöhe, wenn man ihre Spannung vergrößert. Von zwei gleich langen und gleich stark gespannten Saiten, welche aus derselben Materie bestehen, gibt die dickere den tieferen Ton. Wenn zwei Saiten aus verschiedenen Stoffen bestehen, z. B. eine Darmsaite und eine Messingsaite, und eine gleiche Länge, gleiche Dicke und gleiche Spannung haben, so gibt die Messingsaite als die dichtere, den tieferen Ton.

Wenn man eine gespannte Saite AB in der Mitte E mit einem Gewichte belastet, so ist die Weite DE, um welche dieselbe

(Fig. 221.)



hierdurch von der geraden Linie AB entfernt wird, innerhalb der Grenzen der vollkommenen Elasticität (§. 11) der Größe des Gewichtes proportional; umgekehrt ist daher auch die Kraft, mit welcher die Saite, wenn sie durch irgend eine Ursache in die Lage ADB geführt worden ist, in die Lage AEB zurückzulehren strebt, der Weite DE proportional. Kehrt die sich selbst überlassene Saite wirklich aus der Lage ADB in die Lage AEB zurück, so nimmt die Kraft, welche die

Saite während dieser Bewegung in die Lage AEB treibt, in dem nämlichen Verhältnisse ab, in welchem sich der Punkt D dem Punkte E nähert. Wir haben daher hier ganz den in der Anmerkung zu §. 39 behandelten Fall, daß die bewegende Kraft in demselben Verhältnisse sich vermindert, in welchem sich der bewegte Körper einem bestimmten Punkte seiner Bahn nähert.

Ist die halbe Schwingungsweite  $CE = DE$ , welche wir mit  $a$  bezeichnen wollen, nur klein, so werden wir ohne erheblichen Fehler die Bogen  $AC$ ,  $BC$ ,  $BD$  und  $AD$  als Seiten eines Parallelogrammes ansehen können; wir erhalten daher, wenn wir die spannende Kraft der Saite mit  $P$ , die Kraft aber, mit welcher die Saite aus der Lage  $ACB$  oder  $ADB$  in die Lage  $AEB$  zurückzulehren strebt, mit  $Q$  bezeichnen, nach dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte die Proportion

$$1) Q : P = CD : CB = 2a : \frac{1}{2}L,$$

wo  $L$  die ganze Länge der Saite bezeichnet, also

$$Q = \frac{4aP}{L}.$$

Nun ist klar, daß es eine Masse geben muß, welche, wenn sie in der Mitte der Saite angebracht und durch die Kraft  $Q$  zur Bewegung angetrieben würde, den Weg  $DE$  genau in derselben Zeit zurücklegen würde, wie der mittlere Punkt der Saite. Bezeichnen wir das Gewicht dieser Masse mit  $G$ , ferner die Geschwindigkeit, welche ihr die Kraft  $Q$ , welche, wie wir gesehen haben, der Schwingungsweite  $DE = a$  proportional ist, wenn sie während einer Secunde mit unveränderlicher Stärke wirkte, am Ende derselben ertheilen würde, mit  $ak$ , wo  $k$  einen noch näher zu bestimmenden Coefficienten bedeutet, endlich die Geschwindigkeit, welche das Gewicht  $G$  und überhaupt jeder durch die Schwere beschleunigte Körper beim freien Falle am Ende der ersten Secunde erlangt, mit  $g$ , so verhält sich offenbar

$$ak : g = Q : G,$$

folglich

$$k = \frac{gQ}{aG},$$

oder wenn wir den oben in Gleichung (1) für  $Q$  erhaltenen Werth einsetzen:

$$2) k = \frac{4gP}{GL}.$$

Zufolge der in der Anmerkung zu §. 39 abgeleiteten Gleichung ist die Zeit, welche der Punkt D unter den angegebenen Voraussetzungen gebraucht, um den Weg DE zu durchlaufen, also den vierten Theil einer Schwingung zu vollenden, gleich

$$\frac{\pi}{2\sqrt{k}}$$

folglich die Dauer einer ganzen Schwingung

$$t = \frac{2\pi}{\sqrt{k}}$$

oder wenn wir den für k in Gleichung (2) erhaltenen Werth einsetzen:

$$3) t = \pi \sqrt{\frac{GL}{gP}}$$

Haben die Buchstaben G', L', P', t' für eine zweite Saite die nämliche Bedeutung, welche wir für die bisher betrachtete Saite den Buchstaben G, L, P, t beigelegt haben, so ist für diese zweite Saite

$$t' = \pi \sqrt{\frac{G'L'}{gP'}}$$

und folglich, da sich die Schwingungszahlen zweier Saiten, welche wir mit N und N' bezeichnen wollen, umgekehrt wie die Schwingungszeiten verhalten,

$$4) N : N' = \sqrt{\frac{G'L'}{P'}} : \sqrt{\frac{GL}{P}} = \sqrt{G'L'P} : \sqrt{GLP'}$$

In dieser Gleichung bedeuten P und P' die die Saiten spannenden Kräfte, L und L' die Längen dieser Saiten und G und G' zwei Gewichte, welche, in der Mitte der Saiten angebracht, zu ihrer schwingenden Bewegung die nämliche Zeit erfordern würden, als die auf die ganze Länge vertheilten Massen der Saiten. Nun sind zwar diese Gewichte keineswegs den Gewichten der Saiten selbst gleich, aber offenbar proportional\*). Da sich nun die Gewichte zweier Saiten offenbar wie ihre Längen L und L', wie die Quadrate ihrer Durchmesser D und D' und wie ihre specifischen Gewichte S und S' verhalten, so verwandelt sich hiernach die Proportion (4) in

$$N : N' = D'L\sqrt{PS'} : DL\sqrt{P'S}$$

oder

$$5) N : N' = \frac{VP}{DL\sqrt{S}} : \frac{VP'}{D'L\sqrt{S'}}$$

d. h. die Tonhöhen oder Schwingungszahlen zweier Saiten verhalten sich direct wie die Quadratwurzeln aus den spannenden Kräften und umgekehrt wie ihre Längen, ihre Durchmesser und die Quadratwurzeln ihrer specifischen Gewichte.

### §. 169. Schwingende Scheiben.

Wir haben im vorhergehenden Paragraphen gesehen, daß eine Saite als ein Ganzes und in aliquoten Theilen schwingen kann. Dies letztere ist bei schwingenden Scheiben immer der Fall; die ruhenden Stellen, durch welche die nach entgegengesetzten Richtungen schwingenden Theile von einander getrennt werden, bilden zusammenhängende Linien, welche man Knotenlinien nennt. Bestreut man eine gläserne Scheibe mit feinem Sande, hält dieselbe in der Mitte oder an einer anderen Stelle in einiger Entfernung vom Rande fest und streicht sie dann irgendwo am Rande mit einem Violinbogen, so wird der Sand von den schwingenden Stellen weggeworfen und sammelt sich an den ruhenden an, wodurch eine regelmäßige Figur entsteht. Man nennt dergleichen Figuren, von denen Fig. 222 einige Beispiele liefert, Chladni'sche oder Klangfiguren, indem Chladni dieselben erfunden und zuerst (1787) bekannt gemacht hat. Jeder Figur entspricht bei derselben Scheibe auch ein

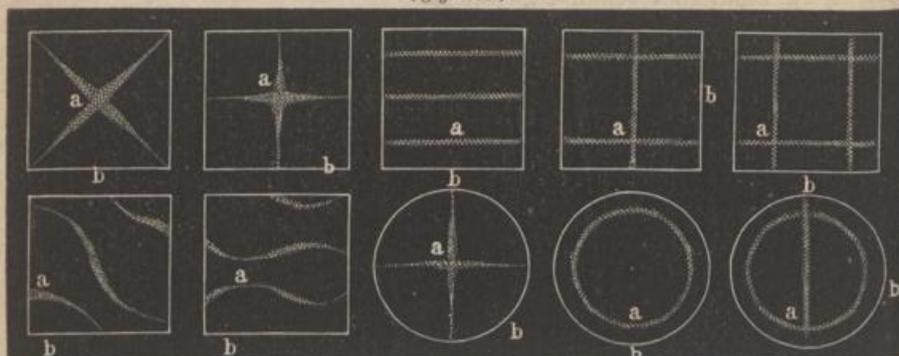
\*) Bezeichnet M das Gewicht einer Saite, so läßt sich zeigen, worauf wir jedoch hier nicht näher eingehen können, daß  $G = 4M$  ist, wonach die oben erhaltene Gleichung

(3) in  $t = 2\pi \sqrt{\frac{LM}{gP}}$  übergeht.

bestimmter Ton; die Figur ist im allgemeinen um so einfacher, je tiefer, und um so verwickelter, je höher der Ton ist.

Auch gekrümmte Scheiben, Glocken, schwingen niemals als ein Ganzes, sondern theilen sich hierbei jederzeit in aliquote Theile. Wird eine Glocke

(Fig. 222.)



irgendwo am Umfange angeschlagen oder mit einem Bogen gestrichen, so theilt sie sich in vier Theile, welche durch zwei sich im Knopfe der Glocke kreuzende Knotenlinien getrennt werden. Auch die den Knopf umgebenden Theile bleiben in Ruhe. Man kann diese Verhältnisse leicht sichtbar machen, wenn man die Glocke bis zu einer gewissen Höhe mit Wasser füllt. Die wellenförmige Bewegung, in welche dieses während des Tönens der Glocke geräth, gibt die Lage der schwingenden und ruhenden Theile an.

Die Glocke kann auch mit mehr als vier aliquoten Theilen schwingen; man bewirkt dieses leicht, wenn man dieselbe an zwei Stellen in passenden Abständen von einander sanft mit den Fingern berührt und dann in der Mitte zwischen beiden berührten Stellen mit dem Bogen streicht. Der Ton ist bei der nämlichen Glocke natürlich um so höher, in je mehr aliquote Theile sich dieselbe theilt.

Zur Erzeugung der Chladni'schen Figuren bedient man sich am bequemsten dünner Scheiben von etwa fünf Zoll Durchmesser von gemeinem, möglichst ebenem und gleichförmig dickem Fensterglase, deren scharfe Kanten am Rande man auf einem Sandsteine abschleift. Man hält dieselben mit dem Daumen und Zeigefinger der linken Hand fest und streicht sie mit einem Geigenbogen, welchen man in der rechten Hand hält und vorher stark mit Colophonium gestrichen hat. Zum Bestreuen wendet man feinen und trockenen Quarzsand an, welchen man durch öfteres Uebergießen mit Wasser vom Staube gereinigt hat. Statt gläserner Scheiben kann man auch metallene oder beliebige andere elastische, selbst hölzerne Scheiben anwenden.

Zu Versuchen mit gekrümmten Scheiben eignen sich besonders die kleinen gläsernen Glocken der Luftpumpen von etwa zwei Zoll Durchmesser und vier Zoll Höhe; doch können für denselben Zweck auch gewöhnliche Wasser- oder Weingläser dienen.

#### §. 170. Tönende Schwingungen der Luft.

Da die Luft von allen Körpern die vollkommenste Elasticität besitzt, so muß sie auch vorzüglich geeignet sein, durch regelmäßige Schwingungen Töne zu erzeugen. Daß die Luft wirklich der tönende Körper in unsern Blasinstrumenten ist, geht schon daraus hervor, daß der Ton einer Pfeife sich nicht ändert, wenn man die Wände derselben anfaßt, und daß diese Wände selbst häufig aus einem unelastischen Material, wie z. B. Blei bestehen, — ferner ganz besonders daraus, daß die Höhe und Tiefe des Tones lediglich

durch die Dimensionen der eingeschlossenen Luftsäule bedingt wird, dagegen von der Beschaffenheit des Materials der dieselbe einschließenden Wände der Pfeife unabhängig ist. Obwohl nun die Verschiedenheit des Materials auf die Höhe und Tiefe des Tones keinen Einfluß hat, so wird doch das Eigenthümliche des Klanges, welches wir nicht näher zu definiren vermögen, durch die verschiedene Beschaffenheit des Materials, aus welchem die Wände einer Pfeife bestehen, bedingt. So hat z. B. bei einer silbernen Trompete der nämliche Ton einen anderen Klang, als bei einer messingenen u. dgl., was ohne Zweifel von der größeren oder geringeren Fähigkeit der die schwingende Luftsäule begrenzenden Wände, an diesen Schwingungen selbst Theil zu nehmen, abhängt, (wie wir weiter unten [S. 181] bei der Resonanz noch näher erörtern werden).

Die tönenden Schwingungen der Luft in den Blasinstrumenten sind Longitudinalschwingungen und bestehen in abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, wie wir sogleich ausführlicher zeigen werden. Sie können durch sehr verschiedene Mittel hervorgerufen werden, von denen wir uns auf die Ausführung der beiden folgenden beschränken: erstens durch das Einblasen eines schmalen Luftstromes, was bei den sogenannten Lippenpfeifen der Fall ist, zweitens durch die schwingende Bewegung eines elastischen Blättchens, welches durch einen eingeblasenen Luftstrom in Schwingungen versetzt wird und seine schwingende Bewegung der in der Pfeife eingeschlossenen Luftsäule mittheilt, wie dies in den so genannten Zungenpfeifen geschieht.

Bei den Hörnern und Trompeten wird die eingeschlossene Luftsäule in tönende Schwingungen versetzt, indem man die Luft an einem Ende durch Einblasen verdichtet. — Eine Orgelpfeife kann zum Tönen gebracht werden, wenn man eine Stimmgabel, welche nahe denselben Ton gibt, vor das offene Ende hält u. dgl. m.

### §. 171. Lippenpfeifen.

Wir fassen unter diesem Namen alle diejenigen Pfeifen zusammen, bei welchen die schwingende Bewegung der eingeschlossenen Luftsäule durch das Einströmen eines schmalen Luftstromes hervorgebracht wird. Dieses ist z. B. der Fall, wenn wir auf einem hohlen Schlüssel blasen, ferner bei hölzernen Pfeifen, welche den Kindern zum Spielwerk dienen, oder bei den Pfeifen, welche sich dieselben aus der Rinde junger Weidenzweige verfertigen, ferner bei den Flöten, bei den Orgelpfeifen, welche man Flötenwerke nennt, u. dgl. m. — Fig. 223, welche einen Längsdurchschnitt einer solchen Orgelpfeife zeigt, kann dazu dienen, eine ohngefähre Vorstellung von der Einrichtung derselben zu geben. Die bei c eingeblasene Luft trifft bei a gegen eine die Pfeife fast ganz verschließende Platte und entweicht zum Theil durch die Oeffnung a, welche das Mundloch genannt wird, während ein anderer Theil der eingeblasenen Luft als ein schmaler Strom in den cylindrischen Raum aabb eindringt und die zwischen a und b enthaltene Luftsäule in eine schwingende Bewegung versetzt.

Hat die Pfeife überall (zwischen a und b) eine gleiche Weite, schwingt die eingeschlossene Luftsäule in ihrer ganzen Ausdehnung, ohne sich in mehrere gleiche Theile zu theilen, und ist die Pfeife nicht allzu kurz (wenigstens sechsmal so lang als breit), so ist die Höhe des Tones oder die

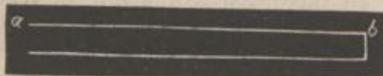


Zahl der in einer Secunde gemachten Schwingungen der Länge der Pfeife ab umgekehrt proportional. (Eine Pfeife, welche nur die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel u. s. w. von der Länge einer andern hat, gibt die Octave, die Quinte von der Octave, die doppelte Octave u. s. w.) Es stimmt also dieses Gesetz ganz mit dem oben (§. 167) über schwingende Saiten angeführten Hauptgesetze überein. — Die Tonhöhe ist dagegen von der Weite der Pfeife, von der Gestalt derselben, ob sie viereckig oder rund, gerade oder krumm ist u. dgl., unabhängig. Der Ton, welchen dieselbe Pfeife gibt, ist in wärmerer Luft etwas höher als in kälterer, dagegen der nämliche in dichter, wie in dünnerer Luft. Es wächst nämlich die Tonhöhe oder die Geschwindigkeit der Schwingungen nicht mit der absoluten, sondern mit der specifischen Elasticität der Luft. (Vergl. unten §. 176, Anm.)

Die Wände einer Pfeife sind entweder mit Oeffnungen versehen, z. B. bei der Flöte, oder dieses ist nicht der Fall. — Die Lippenpfeifen ohne Seitenöffnungen zerfallen wieder in zwei Klassen, in solche, welche an beiden Enden offen, und in solche, welche am unteren b (Fig. 223) geschlossen sind. Erstere werden offene, letztere gedeckte Pfeifen genannt.

Wir betrachten zuerst die Schwingungen der Luft in einer gedeckten Pfeife ab (Fig. 224). Indem der eingeblasene schmale Luftstrom seine Bewegung der in der Pfeife eingeschlossenen Luftsäule mittheilt, wird diese gegen

(Fig. 224.)

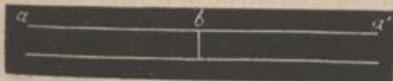


den Boden hingedrängt und immer mehr verdichtet, bis diese Verdichtung ein gewisses Maximum erreicht, worauf sich die Luft in der entgegengesetzten Richtung von b nach a hin bewegt und allmählich in b wieder ihre natürliche Dichtigkeit erlangt. Vermöge des Trägheitsgesetzes fährt sie jedoch fort, von b nach a sich zu bewegen, wodurch jetzt in b eine Verdünnung erzeugt wird. Hat diese Verdünnung eine gewisse Größe erreicht, so bewegt sich die Luft wieder von a nach b hin u. s. w., wobei die Dichtigkeit der Luft in a, wo sie mit der äußeren in Verbindung steht, beständig dieselbe bleibt.

Bei der hier besprochenen Schwingungsart gibt die Pfeife den tiefsten Ton. Höhere Töne entstehen, wenn sich die schwingende Luftsäule in aliquote Theile theilt, wovon weiter unten die Rede sein soll.

Wenn eine beiderseits offene Pfeife mit einer gedeckten gleiche Länge hat, so ist der tiefste Ton derselben die Octave vom tiefsten Tone der gedeckten. Soll die offene Pfeife denselben Ton, wie die gedeckte geben, so muß sie die doppelte Länge derselben haben. Wir schließen hieraus, daß in einer offenen Pfeife schon bei der einfachsten Schwingungsart in der Mitte ein Schwingungsknoten entsteht, so daß dieselbe also als aus zwei gedeckten Pfeifen ab und a'b (Fig. 225) bestehend anzusehen ist. Die Richtigkeit dieser Ansicht kann der folgende Versuch bestätigen. Eine gläserne Pfeife wird lotrecht

(Fig. 225.)



gestellt; über einen Ring wird ein Häutchen gespannt und mit feinem Sande bestreut; hängt man nun den Ring, wie eine Wagschale, an drei Fäden auf und senkt denselben in die zum Tönen gebrachte Pfeife, so geräth der Sand da, wo die Luft am stärksten schwingt, in die heftigste Bewegung, bleibt aber an der Stelle des Schwingungsknotens völlig in Ruhe.

Befinden sich in den Seitenwänden einer Pfeife Oeffnungen, welche willkürlich geöffnet und geschlossen werden können, so hat man die erste nicht geschlossene Oeffnung, wenn dieselbe nicht zu klein ist, als das offene Ende der Pfeife und den Abstand derselben vom Mundloche als die Länge der Pfeife anzusehen. Man begreift hiernach leicht, wie sich durch Oeffnen und Schließen der Seitenlöcher der Ton erhöhen und erniedrigen läßt.

Wir haben im Vorhergehenden angenommen, daß die Seitenwände einer Pfeife parallel laufen. Eine beiderseits offene Pfeife, deren Wände vom Mundloche noch dem offenen Ende hin sich erweitern, gibt einen höheren Ton, dagegen eine Pfeife, deren Wände nach dem offenen Ende hin sich verengern, wodurch sich dieselbe gleichsam einer gedeckten Pfeife nähert, einen tieferen Ton als eine offene Pfeife mit parallelen Wänden von gleicher Länge.

Eine am Ende zum Theil gedeckte Pfeife gibt einen tieferen Ton als eine ganz offene und einen höheren Ton als eine ganz gedeckte Pfeife von gleicher Länge. Hierauf beruht die Methode des Stimmens hölzerner offener Orgelpfeifen. Man bringt nämlich am offenen Ende eine bewegliche Klappe an, welche man mehr oder weniger öffnet oder schließt, je nachdem man den Ton erhöhen oder erniedrigen will.

Bei den gedeckten Pfeifen erhöht man den Ton, indem man einen das Ende verschließenden Pfropf tiefer hineintreibt und so die Pfeife verkürzt; man erniedrigt dagegen den Ton, wenn man diesen Pfropf mehr herauszieht.

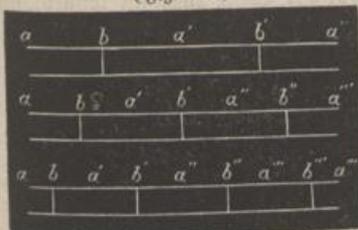
Bleierne offene Pfeifen werden gestimmt, indem man sie am offenen Ende erweitert oder verengt, je nachdem man den Ton erhöhen oder erniedrigen will.

In Hinsicht der Flöte wollen wir noch anführen, daß wegen des transversalen Anblasens die Tonhöhen nicht so der Länge proportionirt sind, wie dieses bei dem longitudinalen Anblasen für andere Pfeifen der Fall ist. Auch hat bei derselben das Verhältnis der Weite zur Länge einen Einfluß auf die Höhe des Tones u. dgl. m.

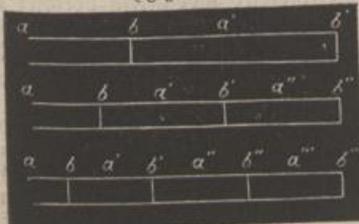
### §. 172. Fortsetzung.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Höhe oder Tiefe des Tones, welchen eine Pfeife gibt, übt die Stärke des Anblasens aus. Eine beiderseits offene Pfeife, welche bei schwachem Anblasen den Grundton gibt, gibt bei verstärktem Anblasen höhere Töne, deren Schwingungszahlen, wenn wir die Schwingungszahl des Grundtones gleich 1 setzen, sich zu dieser wie die Zahlen 2, 3, 4 . . . verhalten, indem nämlich statt eines Schwingungsknotens deren auch 2, 3, 4 . . . entstehen können, wie

(Fig. 226.)



(Fig. 227.)



dieses Fig. 226 zeigt. (In der ersten der abgebildeten Pfeifen liegen die Schwingungsknoten um  $\frac{1}{4}$  und  $\frac{3}{4}$  der Länge, in der zweiten um  $\frac{1}{6}$ ,  $\frac{3}{6}$  und  $\frac{5}{6}$ , in der dritten um  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{3}{8}$ ,  $\frac{5}{8}$  und  $\frac{7}{8}$  der Länge vom offenen Ende.)

Man begreift hiernach, wie auch bei einer Pfeife ohne Seitenöffnungen durch verschiedenes Anblasen verschiedene Töne hervorgebracht werden können.

Ähnliches gilt auch von einer gedeckten Pfeife, jedoch mit dem Unterschiede, daß man hier bei verschiedener Stärke des Anblasens Töne erhält, deren Schwingungsmengen sich wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5 . . . verhalten, indem die Schwingungsknoten die in Fig. 227 angezeigte Lage

haben. (In der ersten dieser Figuren liegt der Schwingungsknoten um  $\frac{1}{3}$  der Länge, in der zweiten liegen dieselben um  $\frac{1}{5}$  und  $\frac{3}{5}$  und in der dritten um  $\frac{1}{7}$ ,  $\frac{3}{7}$  und  $\frac{5}{7}$  vom offenen Ende).

Während die in den Figuren 224 bis 227 mit b bezeichneten Stellen, in welchen die Luft fast ganz in Ruhe bleibt, Schwingungsknoten heißen, werden die mit a bezeichneten Stellen, in denen die Luft die stärkste Bewegung hat, Schwingungsbäuche genannt. In den Schwingungsknoten wechselt die Dichtigkeit der Luft am stärksten, in den Schwingungsbäuchen aber bleibt dieselbe unverändert. Dagegen findet in den Schwingungsknoten, wie schon gesagt, die geringste, in den Schwingungsbäuchen die stärkste Bewegung statt. Die Hin- und Herbewegung der Theile der zwischen zwei Schwingungsknoten enthaltenen Luftsäule, in Folge deren die Luft in den Schwingungsknoten aus der größten Verdichtung in die größte Verdünnung und dann wieder aus der größten Verdünnung in die größte Verdichtung übergeht, wird eine ganze Schwingung genannt. Während die Lufttheilchen zwischen dem ersten und zweiten Schwingungsknoten b und b' (Fig. 226 und 227) sich in der Richtung von b nach b' hinbewegen, findet diese Bewegung zwischen dem zweiten und dritten Schwingungsknoten in der entgegengesetzten Richtung also von b'' nach b' hin, aber zwischen dem dritten und vierten Schwingungsknoten wieder in der nämlichen Richtung, wie zwischen dem ersten und zweiten, also von b'' nach b''' hin u. s. w. statt, in ähnlicher Art, wie wir früher bei einer in aliquoten Theilen schwingenden Saite (Fig. 220) gesehen haben, daß je zwei auf einander folgende Abtheilungen nach entgegengesetzten Richtungen schwingen. — Der Abstand von einem Schwingungsknoten zum nächstfolgenden wird eine halbe, bis zum zweitfolgenden eine ganze Wellenlänge, auch Wellenbreite genannt. Jede ganze Welle besteht also aus zwei nach entgegengesetzten Richtungen schwingenden Hälften. —

Man kann im allgemeinen annehmen, daß die in einer Pfeife eingeschlossene Luftsäule sich leichter in aliquote Theile theilt und daher leichter die höheren Töne hervorgehen, wenn dieselbe im Verhältniß zu ihrer Länge nur eine geringe Dike hat, wie dies z. B. beim Horn der Fall ist. — Die Töne, welche bei einer offenen Pfeife durch Theilung in aliquote Theile überhaupt möglicher Weise entstehen können, sind, wenn wir den Grundton mit C bezeichnen:

1 = C	7 = ais +	13 = as +
2 = C	8 = $\bar{c}$	14 = ais +
3 = G	9 = $\bar{d}$	15 = $\bar{h}$
4 = c	10 = $\bar{e}$	16 = $\bar{c}$
5 = e	11 = $\bar{fis}$ +	17 = $\bar{des}$
6 = g	12 = $\bar{g}$	18 = $\bar{d}$ u. s. w.

Die beigesezten (+) Zeichen zeigen an, daß der wirklich hervorgehende Ton etwas höher als der angegebene ist. Horn- und Trompetenbläser modificiren überdies die Höhe des Tons durch das Einführen der Hand in das offene Ende.

Da die Pfeifen der Orgel immer den Grundton geben sollen, sich also die schwingende Luftsäule bei denselben nicht in mehrere aliquote Theile theilen darf, so darf ihre Weite im Verhältniß zur Länge nicht zu klein sein.

In Betreff des oben (§. 171) angeführten Hauptgesetzes über die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Länge der schwingenden Luftsäule haben wir noch anzuführen, daß, wenn man den Abstand eines Schwingungsknotens vom nächstfolgenden mißt, dieser Abstand zwar vollkommen genau dem obigen Gesetze entspricht, daß dagegen die Entfernung des dem Mundloche zunächst liegenden Schwingungsknotens von dem Mundloche sich

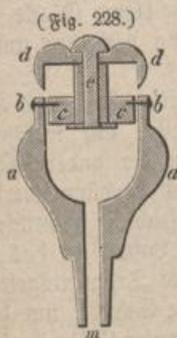
etwas kleiner als diese Größe herausstellt. Wir werden daher annehmen müssen, daß die Dichtigkeit der schwingenden Luftsäule an dem Mundloche nicht, wie wir oben (§. 171) angegeben haben, gänzlich unverändert bleibt, sondern schon eine kleine Aenderung erleidet und daher die volle Länge der schwingenden Luftsäule sich noch etwas über das Mundloch hinaus erstreckt. Die Größe dieses Unterschiedes ändert sich mit der Gestalt und Größe des Mundloches. — Man benützt diesen Umstand für die Stimmung der Orgelpfeifen, welche nahezu, aber nicht ganz genau den verlangten Ton geben, indem man neben dem Mundloche zwei Lappen anbringt, durch deren verschiedene Biegung sich der Ton etwas erhöhen oder erniedrigen läßt, bis derselbe genau in der verlangten Weise erhalten wird. Ähnliches gilt bei Instrumenten, welche mit dem Munde geblasen werden, von den Lippen des Spielers.

**§. 173. Zungenpfeifen.**

In den Zungenpfeifen wird zunächst durch einen eingeblasenen Luftstrom ein elastisches Blättchen in Bewegung gesetzt, welches seine schwingende Bewegung der in der Pfeife eingeschlossenen Luftsäule mittheilt. Es gehören hierher die Clarinette, die Hoboe, das Fagott, die Pfeifen an der Orgel, welche man Schnarrwerke nennt, die kleinen blechernen Trompeten und Hörner, welche den Kindern zum Spielwerke dienen, u. dgl. m.

Ist der Ton, welchen das für sich allein schwingende elastische Blättchen gibt, von der Art, daß auch die in der Röhre eingeschlossene Luftsäule, indem sie sich in mehr oder weniger aliquote Theile theilt, denselben Ton geben kann, so geht auch in der Verbindung beider der nämliche Ton hervor, d. h. derjenige Ton, welchen das elastische Blättchen, wenn es für sich allein schwingt, erzeugt. Findet aber ein solches Verhältniß nicht statt, so modificiren sich die Schwingungen des Blättchens und der Luft in der Pfeife gegenseitig und zwar allemal in der Art, daß dieselben vollkommen gleichzeitig erfolgen. — Eine umfassendere Auseinandersetzung dieses verwickelten Gegenstandes würde uns jedoch hier zu weit führen.

Von den im Vorhergehenden behandelten sind in ihrer Entstehung diejenigen Töne verschieden, welche erzeugt werden, wenn ein Luftstrom an den Rändern fester Körper vorbeigeht. Nach den von *Sondhaus* in *Reise* (1853) angestellten Untersuchungen ist die Schwingungszahl dieser Töne nahezu der Geschwindigkeit des bewegten Luftstromes proportional. Wahrscheinlich werden dieselben dadurch hervorgerufen, wegeten Lufttheilchen durch die Reibung an den festen Körpern, an denen sie vorübergehen, in Schwingungen gerathen. Es gehören hierher die Töne, welche durch den Wind bei seinem Durchgange durch Spalten oder runden



öffnungen erzeugt werden, ferner die Töne, welche entstehen, wenn man mit dem Munde gegen die Schneide eines Messers oder den Rand eines Papierblattes bläst u. dgl. m. Eine praktische Anwendung findet dieses Prinzip in der Dampfpfeife, deren Einrichtung *Fig. 228* darstellt\*). An dem Ende einer sich bauchig erweiternden Röhre *aa* ist eine kreisförmige Scheibe *cc* angebracht und mit den Wänden der Pfeife durch einige Schrauben *bb* fest verbunden. Da die Scheibe einen etwas kleineren Durchmesser hat, als das Ende der bauchförmigen Erweiterung, so bleibt zwischen den Wänden der letzteren und der Scheibe ein ringsförmiger Spalt, durch welchen die bei *m* eingeblasene Luft oder der Dampf entweichen kann. Indem die Luft oder der Dampf bei seinem Austritte aus dem Spalte auf den scharf zulaufenden Rand eines hohlen

\*) Die Zeichnung ist nach einem dem Verfasser durch die Güte des Herrn Professor *Knoblauch* in Halle mitgetheilten Modelle entworfen. Die Dampfpfeife der *Locomotiven* hat eine etwas complicirtere Einrichtung zum Behufe des Zulassens und Absperrens der Dämpfe, was jedoch für unsere Zwecke unwesentlich ist.

Deckels *ad* trifft, welcher mit der Scheibe *cc* durch die Säule *e* fest verbunden ist, wird in der oben angegebenen Weise ein Ton erzeugt.

Umgekehrt müssen auch Töne entstehen, wenn ein fester Körper rasch in ruhender Luft bewegt wird, so z. B. die pfeifenden Töne, welche abgeschossene Kugeln erzeugen.

Vielleicht ist auch das Pfeifen mit dem Munde hierher zu rechnen, bei welchem zugleich die eingeschlossene Luftsäule mitschwingt und den Ton verstärkt.

**§. 174. Die menschliche Stimme.**

Das Hauptorgan, in welchem die menschliche Stimme erzeugt wird, ist der oberste Theil der Luftröhre, welche der Kehlkopf genannt wird. Dieser besteht aus vier übereinander liegenden knorpeligen Ringen, welche durch verschiedene Muskeln in Bewegung gesetzt werden können. Der Kehlkopf ist inwendig mit einer Haut ausgekleidet, welche eine Fortsetzung der Luftröhre bildet, und ist oben durch zwei elastische Bänder, die Stimmbänder, welche nur eine schmale Spalte, die Stimmritze, zwischen sich lassen, geschlossen. Für gewöhnlich ist der Kehlkopf mit dem Kehlschleim bedeckt, wodurch bewirkt wird, daß die Speise beim Schlucken nicht durch die Stimmritze in den Kehlkopf und die Luftröhre, sondern in die dahinter liegende Speiseröhre gelangt.

Beim bloßen Athmen sind die Stimmbänder schlaff und die Luft strömt durch die Stimmritze in den Kehlkopf, die Luftröhre und die beiden Lungensäcke aus und ein, ohne die Stimmbänder in Bewegung zu setzen. Beim Sprechen oder Singen dagegen sind die Stimmbänder angespannt und gerathen durch die ausströmende Luft in Schwingungen, welche sich der im Kehlkopfe und in der Mundhöhle eingeschlossenen Luft mittheilen. Das Stimmorgan scheint daher die meiste Aehnlichkeit mit den Zungenpfeifen zu haben. Je stärker die Stimmbänder angespannt sind, und je enger die Stimmritze ist, um so höher ist der erzeugte Ton. — Die Stimme umfaßt bei den meisten Menschen ohngefähr zwei Oktaven. — Das Artikulirte des Tones, daß wir bestimmte Laute vernehmen, wird durch die Stellung der Zunge, der Zähne, der Lippen u. s. w. hervorgebracht. Worin diese Modification des Tones, daß er zu einem bestimmten Laute wird, eigentlich besteht, darüber fehlt uns noch die genaue Kenntniß.

**§. 175. Fortpflanzung des Schalles in der Luft.**

Das gewöhnliche und vermöge des hohen Grades von Elasticität vollkommenste Fortpflanzungsmittel des Schalles ist die Luft.

Wenn man unter dem Recipienten einer Luftpumpe eine kleine Glocke aufhängt und dieselbe zum Tönen bringt, so wird der Klang derselben um so schwächer vernommen, je stärker man die Luft verdünnt.

Indem der tönende Körper eine ganze Schwingung, einen Hin- und Hergang, vollendet und so einerseits die benachbarten Lufttheile, auf welche er stößt, aus der Stelle getrieben und verdichtet werden, an der andern Seite aber die hinter ihm liegenden Lufttheile sich ausdehnen und verdünnt werden, entsteht in der den tönenden Körper zunächst umgebenden Luftschicht abwechselnd eine Verdichtung und Verdünnung. Indem nun in dieser Luftschicht das gestörte Gleichgewicht nicht bloß hergestellt, sondern vermöge des Trägheitsgesetzes noch überschritten wird, bildet sich um die erste eine zweite Schicht, um diese eine dritte Schicht von abwechselnd verdichteter und verdünnter Luft, in ähnlicher Art, wie bei den Schwingungen, welche die Luft in einer tönenden Pfeife macht, wenn die in derselben eingeschlossene Luftsäule in aliquoten Theilen schwingt, — nur mit dem Unterschiede, daß die abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, welche den Schall fortpflanzen, von einer

Schicht zur andern fortschreiten, sich also immer weiter ausbreiten und von dem tönenden Körper entfernen, weshalb man dieselben auch fortschreitende nennt, während die einen Schall erzeugenden Schwingungen, da sie in dem nämlichen begrenzten Raume geschehen, stehende genannt werden.

Ein anschauliches Bild von der sich immer mehr ausbreitenden Bewegung in der Luft, durch welche der Schall fortgepflanzt wird, gibt uns die fortschreitende Bewegung der Wellen im Wasser. Während aber diese sich kreisförmig in derselben Ebene ausbreiten, erweitern sich die Schallwellen nach allen Richtungen im Raume und hüllen, wie Kugelschichten, den tönenden Körper als Mittelpunkt ein.

So wie jede ganze Welle im Wasser aus einem erhöhten und einem vertieften Theile besteht, so unterscheidet man an der Schallwelle den verdichteten und den verdünnten Theil und nennt den ersteren nach der Analogie der Wellen im Wasser den Wellenberg und den letzteren das Wellenthal.

### §. 176, a. Geschwindigkeit des Schalles in der Luft.

Die Geschwindigkeit, mit welcher der Schall sich in der Luft fortpflanzt, ist, verglichen mit der des Lichtes, eine sehr mäßige, wie eine Menge bekannter Erfahrungen lehrt. So vernimmt man von einem in der Entfernung einiger tausend Schritte abgefeuerten Schießgewehre den Knall erst mehrere Secunden später, als man den Blick gewahrt. — Die Geschwindigkeit des Schalles ist für starke und schwache, für hohe und tiefe Töne dieselbe, wie schon daraus hervorgeht, daß bei einer Musit, welche man in der Ferne hört, die Harmonie nicht gestört wird, während dieselbe doch ganz aufgehoben werden müßte, wenn z. B. die höheren Töne früher zum Ohre gelangten, als die tieferen.

Die Geschwindigkeit des Schalles ist ferner von der Dichtigkeit oder vielmehr von der absoluten Elasticität der Luft unabhängig; sie wächst dagegen mit der specifischen Elasticität der Luft. Der Schall bewegt sich daher in wärmerer Luft schneller als in kälterer, eben so in feuchter Luft etwas rascher als in trockener. Außerdem ist auch die Richtung des Windes auf die Geschwindigkeit des Schalles von Einfluß. Man nimmt gewöhnlich an, daß der Wind den Schall um seine eigene Geschwindigkeit beschleunigt oder verzögert, wenn er in der Richtung weht, in welcher sich der Schall fortpflanzt, oder wenn er die entgegengesetzte Richtung hat; jedoch fehlt es zur Zeit noch an entscheidenden Versuchen, durch welche sich die Größe dieses Einflusses direkt nachweisen ließe.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles in der Luft sind zuerst 1738 von den Mitgliedern der Pariser Akademie entscheidende Versuche angestellt und später mit großer Genauigkeit von anderen Physikern in den verschiedensten Gegenden der Erde, in der heißen und kalten Zone eben sowohl als in den gemäßigten wiederholt worden. Man mißt zu diesem Zwecke den geradlinigen Abstand zweier mehrere tausend Fuß von einander abstehenden Punkte mit größter Genauigkeit, feuert an dem einen mehrmals nach einander ein Geschütz ab und beobachtet an dem anderen Orte die Zwischenzeit zwischen der jedesmaligen Wahrnehmung des Blickes und des zugehörigen Knalles. Man hat auf diese Art gefunden, daß der Schall sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegt und bei mäßiger Feuchtigkeit der Luft und einer Temperatur von 10° C., welches

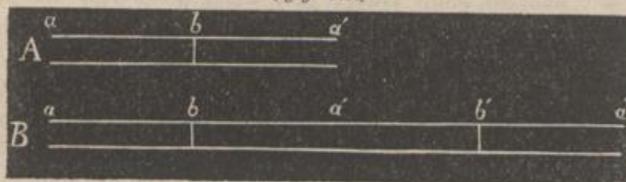
ohngefähr die mittlere Jahreswärme im mittleren Deutschland ist, ohngefähr 1044 par. (1080 preuß.) Fuß in der Secunde durchläuft. Eine Zu- oder Abnahme der Temperatur von 1° vermehrt oder vermindert die angegebene Geschwindigkeit um beinahe 2 Fuß.

Um den Einfluß des Windes und anderer Nebenumstände auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles von einem Stationspunkte zum andern zu eliminiren, pflegt man auf beiden Punkten nahezu gleichzeitig Geschütze abzufeuern, an jedem die Zwischenzeit zwischen der Wahrnehmung des Blüses und des Knalles des am andern Stationsorte abgefeuerten Geschützes zu beobachten und aus diesen Beobachtungen das Mittel zu nehmen.

**§. 176, b. Fortsetzung.**

Durch die Kenntniß der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft werden wir auch in den Stand gesetzt, die Länge der fortschreitenden Luftwellen, durch welche der Schall fortgepflanzt wird, mit der Wellenlänge der in einer tönenden Pfeife eingeschlossenen Luftsäule zu vergleichen. Wir wollen als Beispiel den tiefsten in der Musik gebräuchlichen Ton annehmen, welchen (zufolge §. 166) eine beiderseits offene Pfeife von (ohngefähr) 32 pariser (oder 33 rheinl.) Fuß Länge bei der einfachsten Schwingungsart gibt, wenn die in derselben eingeschlossene Luftsäule mit einem Schwingungsknoten in der Mitte (Fig. 229 A) schwingt. Der nämliche Ton geht, wie wir oben (§. 172) gesehen haben, auch hervor, wenn wir uns — was für die folgende Vergleichung noch mehr Bequemlichkeit gewährt — eine Pfeife von der doppelten, also von 64 pariser Fuß Länge vorstellen und annehmen, daß in derselben die Luft mit 2 Schwingungsknoten schwingt (Fig. 229 B).

(Fig. 229.)



Der in dieser Pfeife eingeschlossenen und in der angegebenen Art schwingenden Luftsäule haben wir oben den Namen einer ganzen Welle beigelegt, woraus sich dann für diese ganze Welle die Länge von (ohngefähr) 64 Fuß ergibt. — Nach §. 166 macht die Luft sowohl in der Pfeife A als auch in der Pfeife B 16 Schwingungen in der Secunde bei der Temperatur von Null Grad. Da nun, wie wir im vorhergehenden §. gesehen haben, bei dieser Temperatur die den Schall in der Luft außerhalb der Pfeife fortplanzenden Wellen 1044 — 2 · 10 = 1024 Fuß in der Secunde zurücklegen und in einer Secunde 16 Schwingungen erfolgen, so muß die Länge dieser letzteren Wellen offenbar den 16. Theil von 1024 Fuß, d. h. 64 Fuß betragen. Es haben daher in dem behandelten Beispiele die fortschreitenden Wellen, durch welche der Schall in der Luft fortgepflanzt wird, dieselbe Länge wie die stehenden Wellen in der tönenden Pfeife, durch welche der Schall erzeugt wird.

Die nämliche Beziehung muß aber auch bei jeder andern Pfeife stattfinden, welches auch immer die Länge derselben oder die Theilung der in derselben schwingenden Luftsäule sein mag, da in demselben Verhältniß die Zahl der Schwingungen wächst, in welchem die Länge der schwingenden Luftsäule

abnimmt. Es geht daher aus der vorstehenden Entwicklung das wichtige Gesetz hervor:

In einer jeden tönenden Pfeife haben die den Schall erzeugenden stehenden Schallwellen die nämliche Länge wie die fortschreitenden Wellen, durch welche der Schall in der Luft fortgepflanzt wird.

Bermöge dieses merkwürdigen Gesetzes kann die Schwingungszahl des Tones, welchen eine Pfeife gibt, gefunden werden, wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft durch die Länge der Luftwellen dividirt\*). Bezeichnen wir also die gesuchte Schwingungszahl mit  $n$ , die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft mit  $a$  und die Wellenlänge mit  $\lambda$ , so ist

$$n = \frac{a}{\lambda}.$$

(Wir werden diesem Gesetze auch weiter unten in der Lehre vom Lichte wieder begegnen, wo uns dasselbe die wichtigsten Dienste leisten wird).

Zufolge der obigen Darstellung ist für den tiefsten in der Musik gebräuchlichen Ton, welchen eine Orgelpfeife von 32 par. Fuß Länge gibt, die Länge der zugehörigen Schallwelle = 64 par. Fuß und für den höchsten in der Musik anwendbaren Ton, welchen eine Pfeife von  $\frac{1}{8}$  Fuß Länge gibt, =  $\frac{1}{4}$  Fuß oder 3 Zoll. Nach §. 166 und 171 kommen dem ersteren Ton 16, dem letzteren 4096 Schwingungen in der Secunde zu. Wenn man ferner für den tiefsten überhaupt wahrnehmbaren Ton etwa 8, für den höchsten Ton 24000 Schwingungen annimmt, so ergibt sich hieraus für ersteren eine Länge der Schallwellen von 128 Fuß, für letzteren von ohngefähr  $\frac{1}{2}$  Zoll. Die verschiedenen Töne unterscheiden sich daher sowohl durch die Zahl ihrer Schwingungen als auch durch die verschiedene Länge der Wellen, durch welche sie in der Luft fortgepflanzt werden.

Bezeichnet  $C$  die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft bei Null Grad,  $C'$  diese Geschwindigkeit bei  $t^\circ$  C., so ist

$$C' = C \cdot \sqrt{1 + 0,00366t}.$$

Nach den genauesten Bestimmungen ist  $C = 332,3$  Meter oder 1022,8 Par. Fuß. Umfaßt  $t$  nur eine geringe Zahl von Graden, so wird man annähernd setzen können

$$C' = C \cdot (1 + 0,00183t^{**}).$$

Es wächst also die Geschwindigkeit des Schalles bei einer Temperaturzunahme von  $1^\circ$  ohngefähr um 2 pro mille. In dem nämlichen Verhältnisse muß auch bei einer tönenden Pfeife die Schwingungszahl zunehmen, indem, wie wir oben gesehen haben, die den Schall erzeugenden stehenden Wellen in derselben die nämliche Länge haben, wie die fortschreitenden Wellen, durch welche der Schall in der Luft fortgepflanzt wird, und bei gegebener Wellenlänge die Fortpflanzungsgeschwindigkeit offenbar der Schwingungszahl proportional ist. Bei fortgesetztem Blasen erhöht sich daher der Ton einer Pfeife ein wenig in Folge der Erwärmung der in derselben eingeschlossenen Luftsäule.

In verhältnismäßig engen Pfeifen, deren innerer Durchmesser kleiner ist, als  $\frac{1}{4}$  der Wellenlänge des erzeugten Tones, erleidet die Wellenlänge, wie Kundt (1868) gezeigt hat, in Folge der Reibung an den Wänden eine Verringerung, die um so beträchtlicher ist, je rauher die Wände sind, und je größer die Wellenlänge des erregten Tones ist.

**\*§. 177. Geschwindigkeit des Schalles in Gasen.**

Das zu Ende des vorhergehenden §. angeführte Gesetz, daß die stehenden Schallwellen in einer tönenden Pfeife dieselbe Länge haben, wie die den Schall fortpflanzenden Wellen in der Luft außerhalb der Pfeife, gibt uns, da dasselbe nicht bloß für atmosphärische Luft, sondern auch für alle anderen Gase gilt, ein

\*) Man kann daher einer Orgelpfeife so zu sagen sofort ansehen, wie viel Schwingungen dem Tone derselben in der Secunde zukommen, indem bei einer beiderseits offenen Pfeife die Wellenlänge der doppelten, bei einer gedeckten Pfeife der vierfachen Länge der Pfeife gleich ist.

\*\*\*) Arithm. u. Alg. §. 225, b.

geeignetes Mittel, dessen sich Chladni zuerst bedient hat, um auch für andere Gase die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Schalles in denselben zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wird ein weites Gefäß A (Fig. 230) mit der zu prüfenden

(Fig. 230.)



Gasart gefüllt und in dasselbe eine Pfeife B luftdicht so eingesetzt, daß das Mundloch C sich innerhalb des Gefäßes befindet. Der aus dem Gefäße hervorragende Theil der Pfeife ist mit einem Hahne D versehen und am Ende mit einer Blase E verbunden, welche mit der nämlichen Gasart gefüllt ist. Wird nun nach Deffnung des Hahnes auf die Blase ein Druck ausgeübt und so die Pfeife zum Tönen gebracht und die Höhe dieses Tones durch Vergleichung mit einem Monochord genau bestimmt, so gibt das Verhältniß zwischen der Schwingungszahl dieses Tones und des Tones, welchen die Pfeife gibt, wenn der ganze Apparat mit atmosphärischer Luft gefüllt ist, zugleich das Verhältniß der Geschwindigkeiten an, mit denen sich der Schall in der angewendeten Gasart und in der atmosphärischen Luft fortpflanzt. Da nämlich beide Töne in der nämlichen Pfeife entstehen und folglich die Schall-

wellen in beiden Fällen eine gleiche Länge haben, (vorausgesetzt, daß beidemal sich nur in der Mitte ein Schwingungsknoten bildet, was bei offenen Pfeifen in der Regel stattfindet), so müssen sich offenbar die von den Schallwellen in gleichen Zeiten zu durchlaufenden Wege wie die Schwingungszahlen verhalten. — Man hat auf diese Art gefunden, daß die Geschwindigkeit des Schalles in Gasen mit der specifischen Elasticität derselben wächst und daher unter allen Gasarten im Wasserstoffgase am größten, ohngefähr dreimal größer als in der atmosphärischen Luft ist.

Für gleich hohe Töne ist folglich auch die Wellenlänge im Wasserstoffgase dreimal größer als in der atmosphärischen Luft.

Uebrigens weichen die Angaben verschiedener Physiker über die Geschwindigkeit des Schalles in den Gasen sehr von einander ab, was wohl von der Reinheit der angewendeten Gase herrühren dürfte.

**\*§. 178. Geschwindigkeit des Schalles in festen und flüssigen Körpern.**

Der Schall wird jedoch nicht bloß durch luftförmige, sondern auch durch flüssige und feste Körper fortgepflanzt, und zwar insbesondere durch letztere bei weitem stärker als durch die Luft, wie viele bekannte Erfahrungen lehren. So werden z. B. der Donner sehr entfernter Geschütze, die Tritte in der Ferne marschirender Truppen, welche durch die Luft nicht mehr vernommen werden, noch gehört, wenn man das Ohr an die Erde legt.

Um die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit welcher sich der Schall durch feste Körper fortpflanzt, hat Chladni ein ähnliches Verfahren angewendet, wie dasjenige, welches wir oben in Hinsicht der Gase beschrieben haben. Er

verfestete nämlich Stäbe aus verschiedenen Substanzen, Glas, Eisen, Kupfer, Holz u. s. w., indem er sie mit einem mit Kolophonium bestreuten wollenen Lappen rieb, in longitudinale Schwingungen und bestimmte die Höhe des auf diese Art erzeugten Tones. Das Verhältniß zwischen der Schwingungszahl dieses Tones und des Tones, welchen eine offene Pfeife von gleicher Länge gibt, zeigt zugleich das Verhältniß der Geschwindigkeit, welche der Schall in dem festen Körper hat, zu der Geschwindigkeit des Schalles in der Luft an. Aus diesen Versuchen ergab sich, daß der Schall durch feste Körper nicht bloß stärker, sondern auch weit schneller als durch die Luft fortgepflanzt wird.

Daß auch das Wasser den Schall fortpflanze, läßt sich schon daraus schließen, daß Fische und andere im Wasser lebende Thiere mit Gehörwerkzeugen versehen sind, und wird bestätigt durch die bekannte Erfahrung, daß abgerichtete Fische durch den Ton einer Glocke oder Pfeife herbeigeloct werden können. Nach direkten Versuchen mit einer ins Wasser eingesenkten Glocke, deren Ton in einer genau bestimmten Entfernung gehört wurde, pflanzt sich der Schall durch das Wasser langsamer als durch feste Körper, aber mehrmals (etwa viermal) schneller als in der Luft fort.

Es muß daher für gleich hohe Töne auch die Wellenlänge im Wasser viermal größer, als in der Luft sein.

Nach Chladni ist die Geschwindigkeit des Schalles im Zinn  $7\frac{1}{2}$ , im Silber 9, im Kupfer beinahe 12, im Eisen und Glase 17, in verschiedenen Holzarten 11 bis 17mal so groß als in der Luft. Bei den weiter unten (S. 289) näher anzuführenden Versuchen, welche Biot in Paris an einer längeren Röhrenleitung angestellt hat, wurde jeder an dem einen Ende der Röhrenleitung hervorgebrachte Schall an dem andern Ende doppelt gehört, indem derselbe sich sowohl durch die in den gußeisernen Röhren eingeschlossene Luft als auch durch diese selbst fortpflanzte. Für die letztere Art der Fortpflanzung ergab sich eine Geschwindigkeit, welche die durch die Luft 10 $\frac{1}{2}$ mal übertraf, während nach Chladni's Versuchen die Geschwindigkeit des Schalles im Eisen 17mal größer ist, als in der Luft. Diese Verschiedenheit erklärt sich jedoch genügend daraus, daß die Röhrenleitung nicht aus einem einzigen Stücke Eisen, sondern aus mehreren, überdies durch andere Metalle verbundenen Theilen bestand.

Nach den von Colladon und Sturm im Genfer See angestellten Versuchen beträgt die Geschwindigkeit des Schalles im Wasser 4420 par. Fuß.

Die genannten Physiker machten bei dieser Gelegenheit die Bemerkung, daß der durch das Wasser fortgepflanzte Ton einer in der Ferne angeschlagenen Glocke nur ganz kurz und abgestoßen vernommen wurde und nicht, wie bei der Fortpflanzung durch die Luft, mit einem anhaltenden Klingen verbunden war.

#### \* §. 179. Stärke des Schalles.

Bei der Fortpflanzung des Schalles betrachten wir außer der Geschwindigkeit, mit welcher sich derselbe verbreitet, auch noch die Stärke. Wir beschränken uns hierbei jedoch auf die atmosphärische Luft, da uns über andere Fortpflanzungsmittel des Schalles in Beziehung auf die Stärke desselben nur eine sehr geringe Zahl von Beobachtungen zu Gebote steht.

Indem der Schall sich in der Luft immer mehr ausbreitet, muß der Unterschied zwischen dem verdichteten und verdünnten Theile einer Schallwelle immer kleiner werden, in ähnlicher Art, wie bei der Ausbreitung der Wellen im Wasser die Höhe und Tiefe des Wellenberges und Thales sich immer mehr vermindern. Es muß daher die Stärke des Schalles mit der Entfernung abnehmen und zwar, wie aus der Analogie mit dem Lichte so wie auch aus mathematischen Prinzipien folgt, im umgekehrten quadratischen Verhältniß der Entfernung. Der Schall muß also in der doppelten, dreifachen Entfernung viermal, neunmal schwächer u. s. w. sein, als in der

einfachen Entfernung. Da uns zur Zeit noch geeignete Mittel zur Abmessung der Stärke des Schalles fehlen, so ist es kaum möglich, diesen theoretisch allerdings wohl begründeten Satz durch directe Versuche zu bestätigen.

Obgleich der Schall sich um die Körper, durch welchen er erzeugt wird, nach allen Richtungen ausbreitet, so geschieht dies doch nicht ganz gleichförmig. Der Schall hat bei gleicher Entfernung vom schallenden Körper eine größere Stärke in der Richtung, in welcher dieser seine Schwingungen macht. Der Ton einer Trompete, der Knall eines Geschützes wird in der Richtung des Rohres stärker forgepflanzt, als seitwärts. Wir verstehen einen Sprechenden deutlicher, wenn das Gesicht desselben uns zugewendet ist, u. dgl. m.

Die Stärke des Schalles hängt ferner von der Größe des schallenden Körpers, von der Größe und Geschwindigkeit der Schwingungen, welche derselbe macht, und von der Dichtigkeit der Luft ab.

Je größer die schwingende Oberfläche des schallenden Körpers ist, je größere Excursionen derselbe macht, und je rascher dieselben aufeinander folgen, um so stärker ist der erzeugte Schall. Hohe Töne werden daher unter übrigens gleichen Umständen weiter gehört, als tiefe.

Die Schwächung, welche der Schall in verdünnter Luft erleidet, zeigt schon der zu Anfang von S. 175 angegebene Versuch mit der Luftpumpe. Eben so lehrt die Erfahrung, daß man auf hohen Bergen lauter sprechen muß, wenn man verstanden werden will, daß eine Pistole auf hohen Bergen einen schwächeren Knall gibt, als im Thale, u. dgl. m. Umgekehrt durften Personen, welche sich in einer Taucherglocke zu einer beträchtlichen Tiefe ins Meer hinabgelassen hatten, nur leise sprechen, wenn ihre Stimme nicht als ein übermäßig lautes Rufen vernommen werden sollte. — An kalten Tagen wird wegen der größeren Dichtigkeit der Luft der Schall weiter gehört, als an warmen.

Auf die Stärke des Schalles hat ferner der Wind einen wesentlichen Einfluß. Im allgemeinen wird der Schall durch den Wind geschwächt, am stärksten in der Richtung, welche der Richtung des Windes entgegengesetzt ist.

Der Schall kann durch die Luft bis zu viel größeren Entfernungen ohne beträchtliche Schwächung fortgepflanzt werden, wenn die Luft in einer Röhre eingeschlossen und so die Ausbreitung des Schalles nach allen Seiten hin verhindert wird. Biot fand bei Versuchen, welche er bei Anlegung einer durch gußeiserne Röhren gebildeten Wasserleitung in Paris zur Nachtzeit anstellte, daß jedes an dem einen Ende der eine halbe Meile langen Röhrenleitung leise gesprochene Wort deutlich am anderen Ende verstanden wurde. Man macht von dieser leichten Fortpflanzung des Schalles in Röhren nützliche Anwendungen. So erhält z. B. der Matrose im Mastkorbe eines Schiffes Befehle vom Capitän durch eine aus der Kajüte bis in den Mastkorb geführte Röhre und theilt auf demselben Wege diesem Nachricht mit. Zu gleichem Zwecke werden in Fabriken die oft weit entlegenen Zimmer der Arbeiter durch blechene Röhren, Communicationsröhren, etwa von der Dicke eines Fingers, mit dem Geschäftszimmer des Dirigenten verbunden.

Der Schall kann auch aus einem Fortpflanzungsmittel in ein anderes übergehen; hierbei erleidet derselbe jedoch allemal eine Schwächung. Der Schall wird also um so mehr geschwächt werden, je öfter er genöthigt ist, aus einem Mittel in ein anderes überzugehen. Hieraus erklärt es sich, warum Wolle, Federn, überhaupt solche Körper, welche Luft zwischen sich

enthalten, den Schall so sehr schwächen. Auch dürfte es zum Theil hierauf beruhen, daß ein Schall bei Tage, wo in der Luft beständige Strömungen kälterer und wärmerer Luftschichten stattfinden, nicht so weit gehört wird, als zur Nachtzeit, wo die Luft gleichmäßiger erwärmt ist.

Andererseits ist auch die Empfindlichkeit des Ohres in der Stille der Nachtzeit größer als am Tage, wo unser Gehör durch mannigfaches Geräusch gleichsam abgestumpft ist, so wie wir auch in einem dunkeln Raume nach längerem Aufenthalte besser sehen, als wenn wir in denselben plötzlich aus der Tageshelle versetzt werden, zur Nachtzeit die Sterne sehen, welche wir am Tage nicht wahrzunehmen vermögen u. dgl. m. Hierzu dürfte auch noch der Umstand treten, daß, je weniger zur Nachtzeit das Auge beschäftigt wird, um so mehr die Thätigkeit des Gehörsinnes hervortritt, wie dies durchgehend bei Blinden der Fall ist.

Als die größte Entfernung, bis zu welcher eine kräftige Mannesstimme noch verstanden wird, kann man etwa 800 Fuß annehmen. Doch konnte sich Foster zu Port Bowen im nördlichen Amerika zur Nachtzeit bei  $-28^{\circ}$  C. und großer Stille noch sehr gut mit einem  $\frac{1}{4}$  Meile entfernten Manne unterhalten.

Außerordentlich groß sind die Entfernungen, bis zu welchen in einzelnen Fällen der Donner der Geschütze gehört worden ist; so hörte man 1792 die Kanonade von Mainz auf einer Höhe bei Gimbeck in einer Entfernung von 33 Meilen, 1809 die Kanonenschüsse auf Helgoland in Hannover 33 Meilen und die Kanonade von Antwerpen 1832 im sächsischen Erzgebirge 80 Meilen weit. Die Explosionen des Vulkans auf St. Vincent sind bis auf 75 Meilen weit gehört worden. In allen diesen Fällen ist jedoch der Schall nicht bloß durch die Luft, sondern auch durch die Erde oder das Wasser in so weite Entfernungen fortgepflanzt worden.

Endlich wollen wir noch anführen, daß der Schall sich im allgemeinen leichter aus niedriger gelegenen Punkten nach höheren fortpflanzt, als umgekehrt, was sich leicht daraus erklärt, daß die Luft in der Höhe eine geringere Dichtigkeit besitzt, also schon an sich der hier erregte Schall eine geringere Stärke hat.

### §. 180. Zurückwerfung des Schalles.

Wenn die Schallwellen bei ihrer Ausbreitung in der Luft auf einen in derselben befindlichen Körper treffen, so werden sie zurückgeworfen. Ist die Richtung der Schallwellen auf der zurückwerfenden Fläche senkrecht, so werden sie auch in derselben Richtung zurückgeworfen; fallen sie dagegen unter einem schiefen Winkel auf, so werden sie unter dem nämlichen Winkel an der andern Seite zurückgeworfen, wie aus den Gesetzen der Wellenbewegung überhaupt (vergl. oben §. 57 und weiter unten §. 197 Anm.) hervorgeht.

Wenn das Ohr von der zurückwerfenden Fläche nur wenig entfernt ist, so vermag es bei der bedeutenden Geschwindigkeit des Schalles (1044 par. Fuß in der Secunde) den zurückgeworfenen Schall nicht von dem direct angekommenen zu unterscheiden. Der erstere fällt fast ganz mit dem letzteren zusammen und bewirkt daher eine Verstärkung desselben. Dieses ist z. B. bei jedem in einer mäßig großen Stube erregten und von den Wänden derselben reflectirten Schalle der Fall. Es wird daher ein Sprechender in einem Zimmer leichter als im Freien verstanden, wozu auch die Resonanz der Wände des Zimmers (vergl. den folg. §.) beiträgt.

Befindet sich die zurückwerfende Wand in größerer Entfernung von dem Ohre, so kann es geschehen, daß der reflectirte Schall zum Theil, aber nicht mehr ganz mit dem direct ankommenden zusammenfällt und daher denselben theils verstärkt, theils verlängert, wodurch der Nachhall entsteht.

Ist die reflectirende Wand aber so weit vom Ohre entfernt, daß der zurückgeworfene Schall von dem direct ankommenden deutlich unterschieden werden kann, so entsteht der Wiederhall oder das Echo. — Man kann ohngefähr annehmen, daß das Ohr in der Secunde 9 Töne zu unterscheiden vermag.

Soll also der reflectirte Schall von dem direct ankommenden deutlich unterschieden werden, so muß er  $\frac{1}{9}$  Secunde später am Ohr anlangen, als jener. Wenn daher der Schall von dem Hörenden ausgeht, so muß die reflectirende Wand, wenn ein Echo entstehen soll, wenigstens so weit von demselben entfernt sein, daß der Schall zum Hin- und Hergange  $\frac{1}{9}$  Secunde braucht. Nun durchläuft aber der Schall in einer ganzen Secunde 1044, also in  $\frac{1}{9}$  Secunde 116 Fuß, und da derselbe sowohl den Weg nach der reflectirenden Wand hin als von derselben zurück zu machen hat, so ergeben sich hieraus 58 Fuß als die kleinste Entfernung der reflectirenden Wand von dem Sprechenden, wenn ein Echo entstehen soll. Es versteht sich indeß wohl von selbst, daß diese 58 Fuß nur als eine ohngefähre Bestimmung anzusehen sind, welche durch die verschiedene Fähigkeit des Ohres, rasch auf einander folgende Töne noch von einander zu unterscheiden, bedingt wird.

Uebrigens ist nicht nothwendig, daß die reflectirenden Wände fest sind; selbst Wolken, wie Beobachtungen auf dem Meere gezeigt haben, vermögen den Schall zurückzuwerfen.

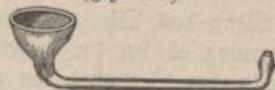
Aus den Gesetzen der Zurückwerfung des Schalles ergibt sich auch noch leicht die Erklärung der sogenannten Flüstergalerien oder Sprachgewölbe. In Zimmern oder Gebäuden mit gewölbten Decken ist es nämlich nicht selten der Fall, daß das an einer bestimmten Stelle leise Gesprochene an einer andern ziemlich entfernten Stelle deutlich verstanden wird. Diese Erscheinung erklärt sich dadurch, daß die von dem einen Punkte ausgehenden Schallwellen von dem Gewölbe so reflectirt werden, daß sie sich, wenn nicht sämmtlich, doch größtentheils in dem andern Punkte vereinigen. In den meisten Fällen ist die Erscheinung zufällig ohne besondere Absicht des Baumeisters entstanden. Um dieselbe absichtlich hervorzubringen, würde man für das Gewölbe eine elliptische Gestalt und als die beiden betreffenden Punkte die Brennpunkte der Ellipse zu wählen haben. (Vergl. oben S. 57.)

Besondere Vorrichtungen, welche auf der Zurückwerfung des Schalles beruhen, sind das Sprachrohr (Fig. 231) und das Höhrrohr (Fig. 232).

(Fig. 231.)



(Fig. 232.)



Bei dem ersteren, welches aus einer mehrere Fuße langen kegelförmigen Röhre besteht, wird der am engeren, mit einem kurzen Mundstück versehenen Ende erregte Schall von den Wänden des Rohres theils zusammengehalten, theils so zurückgeworfen, daß die Schallwellen ziemlich parallel mit der Aze des Rohres austreten und daher am stärksten in dieser Richtung fortgepflanzt werden.

Das Höhrrohr hat gerade die umgekehrte Einrichtung. Die von dem weiteren Ende aufgefangenen Schallwellen werden nach dem engeren Ende hin reflectirt und von hier durch ein gebogenes Rohr dem Ohre zugeführt.

Man unterscheidet ein- und mehrsylbige Echo's. Ein dreisylbiges Echo z. B. wiederholt die drei zuletzt gesprochenen Silben und erfordert natürlich eine dreimal größere Entfernung der reflectirenden Wand als ein einsylbiges. — Uebrigens leuchtet von selbst ein, daß die Zahl der Sylben, welche ein Echo wiederholt, nicht bloß von der Entfernung der reflectirenden Wand, sondern auch davon abhängt, in wie rascher Folge die Sylben nach einander ausgesprochen werden.

Man unterscheidet ferner einfache und mehrfache Echo's, je nachdem ein Schall nur ein- oder mehrmals wiederholt wird. Ein mehrfaches Echo entsteht, wenn der Schall von mehreren Wänden in verschiedenen Entfernungen reflectirt wird und daher die zurückgeworfenen Wellen bei dem Ohre zu verschiedenen Zeiten nach einander ankommen, wobei es auch geschehen kann, daß dieselbe Welle eine mehrfache Reflexion an verschiedenen Wänden erfahren hat.

Zu den ausgezeichneten Echo's gehören außer vielen anderen folgende: An dem Lurleifelsen zwischen Bingen und Coblenz gibt es ein Echo, welches ein Wort siebenzehnmahl wiederholt. Bei Adersbach in Böhmen unsern der schlesischen Grenze ist in dem sogenannten Felsenmeere ein Echo, welches sieben Sylben dreimal wiederholt. — An dem Schlosse Simonetta bei Mailand entsteht durch zwei Flügel desselben ein Echo, durch welches ein aus einem Fenster des Hauptgebäudes abgefeuerter Pistolenschuß gegen fünfzigmal wiederholt wird.

Zu den berühmten Sprachgewölben gehört die Kuppel der St. Paulskirche in London, in welcher man das leise Flüstern oder das Ticken einer Taschenuhr an einer Seite der Gallerie an der entgegengesetzten Seite hört; ferner die Kirche zu Gloucester, in welcher sich zwei ganz leise redende Personen auf der Gallerie in dem Abstände von 150 Fuß unterhalten können. — In der Sternwarte zu Paris befindet sich ein absichtlich elliptisch gewölbtes Zimmer, welches in seinen beiden Brennpunkten die beabsichtigte Erscheinung zeigt. — Auch gehört hierher das im Alterthume berühmte Ohr des Dionysius in den Steinbrüchen bei Syrakus, welches zum Gefängniß gebient haben soll, und in dessen Gewölben ebenfalls die angeführte akustische Erscheinung sich zeigt.

Das Sprachrohr ist 1670 von Morland in England erfunden worden und wird gewöhnlich aus Blech verfertigt, wofür man jedoch auch Pappe nehmen kann, da die Beschaffenheit der Wände, aus denen dasselbe besteht, auf die Wirkung selbst ohne Einfluß ist. Die auf Schiffen gebräuchlichen sind selten länger als 4 bis 6 Fuß und haben am engeren Ende etwa 2, am weiteren 6 bis 10 Zoll Durchmesser. Man hat indeß auch Sprachrohre von 24 Fuß Länge hergestellt. Mit einem solchen kann eine kräftige Stimme etwa auf eine Viertelmeile weit verstanden und auf drei Viertelmeilen überhaupt noch gehört werden.

Der Gebrauch des Hörrohrs für Harthörige wird dadurch sehr beschränkt, daß durch die wiederholte Reflexion des Schalles an den Wänden des Rohres und durch das Mittonen derselben ein den beabsichtigten Effect störendes Brausen und Summen entsteht.

#### \*§. 181. Mittönende Schwingungen, Resonanz.

Durch die Schwingungen eines tönenden Körpers kann auch ein anderer mit demselben verbundener Körper in Schwingungen versetzt und so zum Mittönen gebracht werden.

In dieser Hinsicht sind besonders von Savart in Paris (1819) sehr lehrreiche Versuche angestellt worden, von denen wir insbesondere den folgenden herausheben:

Savart verband zwei einander ganz gleiche hölzerne Scheiben in der Mitte durch einen ebenfalls hölzernen Stab, so daß die Ebenen der Scheiben auf der Axe des Stabes senkrecht standen. Wenn er nun die eine dieser Scheiben durch Streichen mit dem Violinbogen in Schwingungen versetzte, so gerieth auch die andere Scheibe in Schwingungen und gab den nämlichen Ton, und wenn er beide Scheiben vor dem Versuche mit feinem Sande bestreut hatte, so entstand auf beiden die nämliche Klangfigur. — In diesem Versuche wurden zunächst durch die transversalen Schwingungen der gestrichenen Scheibe in dem Stabe longitudinale Schwingungen und durch diese in der mittönenden Scheibe wieder transversale Schwingungen hervorgerufen.

Durch die Schwingungen eines festen Körpers können jedoch nicht bloß andere mit demselben unmittelbar verbundene feste Körper, sondern auch die Luft, ferner durch die in der Luft sich fortpflanzenden Schwingungen andere in derselben befindliche feste Körper zum Mittönen gebracht werden. In dem

letzten Falle muß jedoch der Körper, welcher mittönen soll, schon für sich allein oder durch Theilung in aliquote Theile den nämlichen Ton geben.

Wenn man z. B. eine tönende Stimmgabel der Oeffnung einer Pfeife gegenüber hält, welche für sich nahe den nämlichen Ton zu geben vermag, wie die Stimmgabel, so wird die in der Pfeife enthaltene Luftsäule zum Mittönen gebracht.

Spannt man zwei Saiten in einiger Entfernung von einander auf und stimmt dieselben auf den nämlichen Ton, streicht die eine mit einem Bogen, so tönt auch die andere Saite mit. Dieses ist jedoch nicht mehr der Fall, wenn die Saiten eine solche Stimmung haben, daß auch nicht durch Theilung in aliquote Theile sich der Ton der einen in den Ton der andern verwandeln kann. — Man kann diese Verhältnisse dadurch sichtbar machen, daß man auf die eine Saite ein kleines etwas gebogenes Streifchen Papier legt und dann die andere Saite mit dem Bogen streicht. Haben beide Saiten eine gleiche Stimmung, so wird das Streifchen Papier abgeworfen; dieses geschieht nicht, wenn die Saiten verschiedene Stimmung haben.

Durch das Mittönen anderer Körper wird in vielen Fällen eine bedeutende Verstärkung des Tones hervorgebracht. Dies ist insbesondere der Zweck des Resonanzbodens bei musikalischen Instrumenten. Das Mittönen des Resonanzbodens für Töne, welche verschiedene Höhe haben, wird dadurch ermöglicht, daß sich derselbe auf verschiedene Weise durch Knotenlinien in aliquote Theile theilt.

Eine angeschlagene Stimmgabel, frei in der Hand gehalten, gibt nur einen schwachen Ton; dieser wird bedeutend verstärkt, wenn man den Stiel der Stimmgabel auf einen Resonanzboden stellt.

Die Mauern und Pfeiler einer Kirche erzittern mehr oder weniger beim Läuten der Glocken.

Daß eine Stimme in einem Zimmer stärker vernommen wird, als im Freien, beruht, wie wir oben gesehen haben, theils auf der Reflexion des Schalles von den Wänden des Zimmers, zum großen Theile aber auch auf der Resonanz dieser Wände.

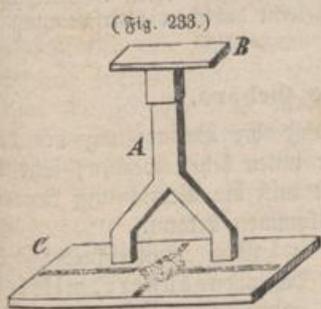
Die Resonanz bewirkt jedoch nicht bloß eine Verstärkung, sondern in vielen Fällen auch eine eigenthümliche Modification des Tones, welche wir Klang nennen. So beruht z. B. die Eigenthümlichkeit, durch welche sich bei gleicher Höhe der Ton einer Flöte, einer Clarinette und anderer Blasinstrumente von einander unterscheiden, wesentlich auf dem Mittönen der festen Wände derselben.

#### §. 182. Interferenz der Schallwellen.

So wie zwei im Wasser gleichzeitig erregte Wellen sich über die Oberfläche desselben ausbreiten, ohne sich zu stören, so können auch in der Luft mehrere Töne sich zugleich fortpflanzen. An den Durchkreuzungsstellen zweier im Wasser fortschreitenden Wellen findet da, wo Berg und Berg oder Thal und Thal zusammentreffen, eine Vergrößerung des Wellenberges oder Wellenthales, und da, wo ein Berg der einen Welle mit einem Thale der andern zusammentrifft, eine Verminderung oder ein ganzliches Aufheben statt. Eben so müssen zwei in der Luft zugleich sich fortpflanzende Schallwellen bei ihrem Zusammentreffen sich entweder verstärken oder schwächen, je nachdem die schwingende Bewegung der zusammentreffenden Theile nach gleicher oder entgegengesetzter Richtung hin erfolgt.

Wenn man an den entgegengesetzten Seiten der drehbaren Scheibe einer Sirene (S. 166) zwei Röhren so anbringt, daß die Mündung der einen sich gleichzeitig einer Lücke der Scheibe gegenüber befindet, wenn die Mündung der andern irgend einer andern Lücke, etwa der nächstfolgenden, gegenübersteht, so vernimmt man, wenn man bald durch die eine, bald durch die andere Röhre einen Luftstrom gehen läßt, bei gleich rascher Umdrehung der Scheibe in beiden Fällen denselben Ton. Dieser verschwindet aber und man vernimmt nur ein Säusen, wenn gleichzeitig durch beide Röhren mit gleicher Stärke geblasen wird.

Man sieht hieraus, daß zwei gleich hohe Töne sich nicht allemal verstärken, sondern unter Umständen sich auch schwächen und aufheben können. Man nennt diese Erscheinung Interferenz\*).



Ueber die Interferenz der Schallwellen führen wir noch folgenden Versuch an: Eine Röhre A (Fig. 233) von Pappe oder Holz spaltet sich unten gabelförmig in zwei Äste, welche nicht verschlossen sind. Das obere breitere Ende der Röhre ist mit einer schwach gespannten Membran überzogen, auf welche feiner Sand aufgestreut ist. Eine gläserne oder metallene Scheibe C wird durch Streichen mit einem Violinbogen in tönende Schwingungen versetzt, in derselben Art, wie man dies bei Erzeugung der Schladni'schen Figuren zu thun pflegt. Hält man nun die Röhre mit dem einen offenen Ende der Gabel über die Mitte eines schwingenden Theiles der Scheibe, so geräth der auf die Membran gestreute Sand

in lebhafteste Bewegung; dasselbe ist ferner der Fall, wenn man beide offene Enden über zwei nach gleicher Richtung schwingende Theile der Scheibe hält; der Sand bleibt dagegen in Ruhe, wenn man die beiden Enden der Gabel über zwei symmetrische Stellen der Scheibe hält, welche nach entgegengesetzten Richtungen schwingen, d. h. zwei solche Stellen, welche durch eine einfache Knotenlinie getrennt sind, wie dies Fig. 233 zeigt. Während nämlich der eine schwingende Theil eine Verdichtung der Luft in der Röhre hervorbringt, bewirkt der andere nach der entgegengesetzten Richtung schwingende Theil eine Verdünnung und eben so umgekehrt, und indem diese Verdichtung und die Verdünnung sich aufheben, bleibt die Luft im oberen Theile der Röhre so wie die Membran und der aufgestreute Sand in Ruhe.

Auf der Interferenz der Schallwellen beruht auch das abwechselnde Stärker- und Schwächerwerden des Tones, welchen man vernimmt, wenn man zwei Saiten oder noch besser zwei Orgelpfeifen, welche in ihrer Stimmung ein wenig von einander abweichen, gleichzeitig tönen läßt. Die Erklärung dieser Erscheinung, welcher man den wenig bezeichnenden Namen Stöße gegeben hat, ist folgende: Nehmen wir an, daß der eine tönende Körper in derselben Zeit genau 100 Schwingungen vollende, in welcher der andere 101 Schwingungen macht, so werden sich dieselben nach je 100 Schwingungen des ersten und je 101 Schwingungen des andern in ganz gleichen Schwingungszuständen befinden und daher die größte Verstärkung des Tones bewirken. In der Mitte dieser Zeit schwingen beide nach gerade entgegengesetzten Richtungen, und es muß daher jetzt die größte Schwächung des Tones eintreten. Braucht daher der eine tönende Körper zu 100 Schwingungen, der andere zu 101 Schwingungen eine Secunde Zeit, so wird in jeder Secunde ein Stoß erfolgen. Wenn dagegen der eine tönende Körper in der Secunde 100, der andere 103 Schwingungen macht, so entstehen in jeder Secunde drei Stöße, weil nach je  $33\frac{1}{3}$  Schwingungen des einen und  $34\frac{1}{3}$  Schwingungen des andern die Schwingungszustände derselben übereinstimmen u. s. w. Ueberhaupt ist die Anzahl der in einer bestimmten Zeit erfolgenden Stöße gleich dem Unterschiede in der Zahl der Schwingungen, welche die beiden tönenden Körper in dieser Zeit vollenden.

\* Von dem englischen Worte to interfere zusammentreffen, ein zuerst von Young in die Wissenschaft eingeführter Ausdruck.

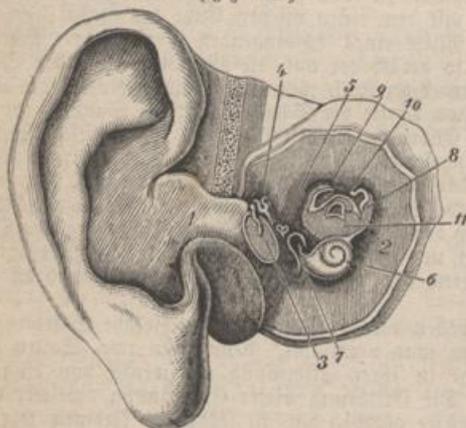
Wenn die Stöße sehr rasch auf einander folgen, so vermögen sie selbst die Empfindung eines besonderen Tones hervorzurufen. Man nennt dergleichen Töne *Combinationstöne*. Wenn man z. B. auf einer Orgel zwei Pfeifen zugleich tönen läßt, welche um eine Quinte aus einander liegen, so hört man zugleich die untere Octave des tieferen Tones. Macht nämlich dieser in der Secunde 240, also die Quinte desselben 360 Schwingungen, so müssen in der Secunde 120 Stöße erfolgen, welche die untere Octave des ersteren Tones erzeugen.

Man bemerkt die Erscheinung der Stöße, das abwechselnde Anschwellen und Nachlassen des Tones auch sehr deutlich an Glocken, welche einen längere Zeit anhaltenden Ton geben. Wie wir oben in §. 169 gesehen haben, schwingt eine tönende Glocke allemal in aliquoten Theilen. Wenn nun die Glocke keine vollkommen symmetrische Gestalt hat oder nicht aus einer ganz gleichförmigen Masse besteht, wie dies fast bei allen Glocken der Fall ist, so werden auch die Theile derselben nicht genau gleichzeitig schwingen, sondern ein wenig von einander abweichen, also aus den nämlichen Gründen, welche wir oben überhaupt für zwei tönende Körper, deren Schwingungszahlen sich um ein geringes unterscheiden, kennen gelernt haben, die Erscheinung die Stöße hervorbringen.

§. 133. Das Organ des Gehörs.

Während wir über den Bau des Auges und die Bestimmung der dasselbe zusammensetzenden Theile, wie wir weiter unten sehen werden, sehr befriedigende Rechenschaft zu geben vermögen, ist uns die Verrichtung der einzelnen Theile des Gehörorgans nur unvollkommen bekannt.

(Fig. 234.)



Man unterscheidet bei diesem das äußere, mittlere und innere Ohr. Fig. 234 stellt einen Durchschnitt desselben dar.

Zu dem äußeren Ohre rechnet man die Ohrmuschel und den etwa  $\frac{3}{4}$  Zoll langen und  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  Zoll weiten Gehörgang (1), welcher durch eine Haut, das Trommelfell (3), geschlossen und von dem mittleren Ohre geschieden wird.

Das mittlere Ohr oder die Paukenhöhle ist eine etwa  $\frac{1}{4}$  Zoll im Durchmesser haltende Höhlung, welche so wie das innere Ohr in dem Felsenbeine (2) liegt, mit einer feinen Haut ausgefüttert und mit Luft angefüllt ist.

In der Paukenhöhle liegen vier mit einander verbundene kleine Knöchelchen, der Hammer, der Amboss, das

(Fig. 235.)



(Fig. 236.)



Pinna (4) und der Steigbügel (5) (Fig. 234). In Fig. 235 und 236 sind dieselben etwas vergrößert abgebildet; Fig. 235 zeigt dieselben verbunden, Fig. 236 getrennt; (1) ist der Hammer, (2) der Amboss, (3) das Pinna (4) und (5) der Steigbügel. Die Paukenhöhle steht durch einen Kanal, die eustachische Röhre, mit der Mundhöhle in Verbindung,

wodurch die Luft in der Paukenhöhle erneuert und im Gleichgewichte mit der äußeren Luft erhalten werden kann.

Auf das mittlere Ohr folgt das innere Ohr oder Labyrinth, welches aus verschiedenen knöchernen Höhlungen besteht. Es gehören hierher die Schnecke (6) und die drei halbcirkelförmigen Kanäle (8, 9, 10). Diese vereinigen sich in eine gemeinschaftliche Höhle (11), in welche sich der Gehörnerv ausbreitet, welcher zuletzt ganz weich und flüssig wird. Das Labyrinth steht mit der Paukenhöhle durch zwei mit einer feinen Haut überzogene Oeffnungen in Verbindung.

Ueber die Verrichtung dieser Theile vermögen wir nur im allgemeinen anzugeben, daß die in der Luft erregten Schallwellen von der Ohrmuschel aufgefangen werden, durch den Gehörgang zum Trommelfell gelangen, welchem sie so wie der in der Paukenhöhle eingeschlossenen Luft und den vier Gehörknöchelchen ihre schwingende Bewegung mittheilen und sich so bis zum Labyrinth fortpflanzen, in welches sich der Gehörnerv ausbreitet. Bemerken müssen wir jedoch, daß Personen, welche die Ohrmuschel verloren hatten, seltenen Fällen sogar Taubheit durch Durchbohrung des Trommelfells geheilt worden ist. Dieses dürfte daher wohl hauptsächlich dazu bestimmt sein, die Paukenhöhle gegen das Eindringen fremdartiger Körper zu schützen, ohne jedoch die Fortpflanzung der Schallwellen zu hindern.

Endlich wollen wir noch anführen, daß auch andere Theile des Kopfes, insbesondere die Zähne dazu beitragen können, den Schall nach dem Gehörnerven fortpflanzen, wie man sich leicht überzeugt, wenn man einen tönenden Stab oder einen andern schallenden Körper an die Zähne hält, wodurch die Wahrnehmung des Schalles bedeutend verstärkt wird.

#### \*S. 184. Historische Uebersicht.

- Vor Christus. Die alten Griechen kannten das Gesetz, daß die Tonhöhe einer Saite unter übrigens gleichen Umständen ihrer Länge umgekehrt proportional ist.
- 1636 nach Chr. Mersenne in Frankreich ermittelt die Gesetze, nach denen die Tonhöhe einer Saite mit der Spannung und Dicke sich ändert.
1670. Der Engländer Morland erfindet das Sprachrohr.
1700. Sauveur in Frankreich erklärt die Erscheinungen der Combinationstöne und benutzt dieselben zur Bestimmung der Schwingungszahl der Luft in tönenden Pfeifen.
1730. Euler sucht die absoluten Schwingungszahlen der Töne aus theoretischen Betrachtungen herzuleiten.
1738. Die Mitglieder der Pariser Akademie stellen Versuche über die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft an.
1787. Chladni entdeckt die Klangfiguren.
1800. Derselbe sucht durch directe Versuche die absoluten Schwingungsmengen der Töne, ferner die Geschwindigkeit des Schalles in Gasen und festen Körpern zu bestimmen.
1819. Caignard de la Tour erfindet die Sirene, und Savart in Paris unterwirft die Erscheinung der Resonanz einer näheren Untersuchung.
1825. Die Gebrüder Weber in Göttingen erweitern und begründen die Theorie der Wellen und erklären die Erscheinungen der Interferenz der Schallwellen.