

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Lehrbuch der Physik für Mediziner und Biologen

Lecher, Ernst

Leipzig [u.a.], 1912

II. Akustik

II. Akustik

Wellenmechanik.

165. Fortpflanzung einer Schwingung. Alle einzelnen Teile eines elastischen Körpers sind durch elastische Kräfte in ihrer Ruhelage festgehalten. Bringen wir irgendeinen Teil des elastischen Körpers etwas aus seiner Ruhelage, so entsteht eine der Elongation proportionale Kraft der Elastizität gegen die Ruhelage zurück. Lassen wir den aus der Ruhelage gebrachten Teil frei, so muß daher nach § 74 eine Schwingung entstehen.

Wenn aber ein schwingender Punkt mit allen Nachbarpunkten elastisch verbunden ist, so müssen auch diese Nachbarpunkte in Schwingung geraten und es wird sich diese schwingende Bewegung irgendeines Punktes nach allen Seiten in das elastische Medium wellenförmig fortpflanzen.

Das, was bei allen Wellenbewegungen weiterschreitet, ist nicht ponderable Masse, diese bleibt ja (abgesehen von den kleinen Elongationen) an ihrem Platze; es schreitet vielmehr Energie und zwar hier die Energie der Schwingungsbewegung mit einer bestimmten Geschwindigkeit c vorwärts. Um die einfachsten Gesetze dieser Erscheinung kennen zu lernen, wollen wir uns den elastischen Körper in Form eines unendlich langen Zylinders vorstellen, z. B. in Form eines sehr langen Seiles, dessen Ende irgendwo — weit weg — befestigt ist. Wenn wir am Anfang gegen dieses Seil einen kurzen Schlag führen, so pflanzt sich die Erschütterung mit einer gewissen Geschwindigkeit längs des Seiles fort. Bewegen wir hingegen den Anfang des Seiles in einer Pendelschwingung rhythmisch hin und her, so werden nach und nach alle Punkte dieses Seiles gleichfalls solche Sinusschwingungen ausführen; es wird aber die Schwingung an den verschiedenen Punkten um so später beginnen, je weiter diese Punkte von dem Anfangspunkte entfernt liegen.

166. Wellenlänge. Nehmen wir an, daß wir mit dem Anfangspunkte a eines gespannten Seiles ax einmal hinauf, hinunter und zurückgegangen wären, daß wir also eine ganze Schwingung ausgeführt hätten, so wird Fig. 110 in schematischer Annäherung die Form des Seiles darstellen.

Jeder Punkt macht dieselbe Schwingung wie a , aber später. Wenn a seine ganze Schwingung eben vollendet hat, beginnt a' erst mit der Bewegung, d hat $\frac{1}{4}$ der Schwingung hinter sich, c die Hälfte und b schon $\frac{3}{4}$.

Bezeichnen wir die Zeit eines Hin- und Herganges, die Schwingungsdauer, mit τ und nennen wir die Strecke $abcd a'$, die sich aus Wellental b und Wellenberg d zusammensetzt, eine Wellenlänge λ , so erhalten wir für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Schwingung im Seile,



Fig. 110.

d. i. für $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$ die Gleichung $c = \lambda/\tau$, da in

der Zeit τ der Weg λ zurückgelegt wurde. Bedeutet n die Zahl der Schwingungen pro sek (die Schwingungszahl), so ist $1/\tau = n$, also $c = \lambda n$.

Wenn ich den Anfangspunkt a dauernd hin und her schwingen lasse, so geht von hier ein Wellenzug aus, der längs des Seiles weiter läuft. Die Wellenberge und -täler schieben sich in der Richtung der Bewegung mit der Geschwindigkeit c weiter.

Durch die Reibung im Seile einerseits und durch die Erschütterung der Luft andererseits wird aber diese Bewegung immer schwächer, je weiter sie fortgeschritten ist und hört bei einem sehr langen Seil auf, bevor die Welle das Seilende erreicht.

167. Eine fortschreitende Welle ist dadurch charakterisiert, daß jeder Punkt eine vollständige Schwingung ausführt, aber um so später, je weiter er vom Anfange entfernt ist. In ein und demselben Zeitpunkte sind die Schwingungsphasen der verschiedenen Punkte verschieden (Zusammenfassende Definiton § 174).

In Fig. 110 schwingen die Teilchen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung. Wir haben hier eine fortschreitende **Transversalwelle**.

168. Fortschreitende Longitudinalwelle. Denken wir uns jetzt aber einen elastischen, langen Stab und verschieben wir den Anfangspunkt wieder pendelförmig hin und her, doch nun in der Richtung des Stabes, so daß wir den Stabanfang abwechselnd zusammendrücken und auseinanderziehen. Wir werden dann eine ähnliche Erscheinung bekommen wie früher, aber an Stelle des Wellenberges haben wir eine Verdichtung und an Stelle des Wellentales eine Verdünnung. Auch hier gilt alles in § 166 Gesagte, nur schwingt hier jeder Punkt longitudinal, nicht mehr transversal; wir haben also eine fortschreitende Longitudinalwelle vor uns.

169. Sooft eine Wellenbewegung aus einem Medium in ein zweites übergeht, für das die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eine andere ist, findet eine teilweise Zurückwerfung, eine **Reflexion**, statt. Wenn ein beiderseits an einer starren Wand befestigtes Seil an dem einen Ende kurz angeschlagen wird, so sehen wir, wie die Erschütterung an das andere Ende läuft, dann umkehrt, wieder an den Anfang geht und so mehrere Male hin und her eilt.

170. Interferenz. Versetzen wir den Anfang eines Seiles in regelmäßige Schwingungen, so erhalten wir zunächst einen vom Anfang an fortschreitenden kontinuierlichen Wellenzug; infolge der Reflexion kommt dann ein zweiter Wellenzug in entgegengesetzter Richtung gegen den Anfang zurück. In Fig. 111 ist der eine Wellenzug, der nach rechts geht, *a*, punktiert gezeichnet, der entgegengesetzte, *b*, voll gezeichnet. Wir wollen uns zunächst um Anfang und Ende dieses Wellenzuges nicht kümmern und nur die Seilmitte betrachten. Im Zeitmoment Null liegen die Wellenzüge z. B. so, daß sie sich gegenseitig aufheben (oberste Zeichnung in Fig. 111). Irgendein Teil des Seiles bekommt infolge des Wellenzuges *a* z. B. einen Impuls nach aufwärts, infolge des Wellenzuges *b* einen Impuls nach abwärts; diese beiden Beschleunigungen sind überall gleich und die Resultierende wird für jeden Punkt gleich Null sein, d. h. in dem betrachteten Momente wird das Seil gerade sein. Diese Resultierende ist dick gezeichnet.

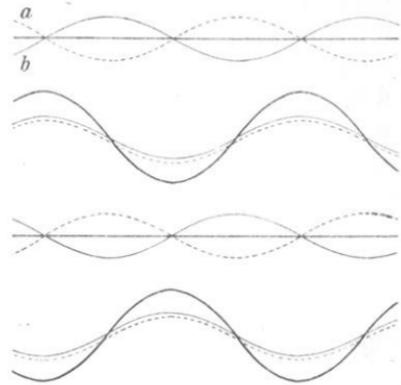


Fig. 111.

Wir wendeten hier das Prinzip der Übereinanderlagerung — Superposition — von Schwingungen an, das ganz allgemeine Gültigkeit hat. Treffen in irgendeinem Punkte mehrere Wellenzüge zusammen, so macht dieser Punkt eine resultierende Exkursion, welche durch geometrische Summierung der einzelnen Exkursionen gefunden wird. Ein in einen ruhigen See fallender Stein erzeugt fortschreitende Wellenringe auf der Wasseroberfläche, dasselbe geschieht aber auch, wenn der See z. B. durch Wind oder einen Dampfer wellenförmig bewegt ist. Die kleinen vom Steinwurf herrührenden Ringe werden von den großen Wellen auf- und abgeschaukelt, die vertikale Erhebung bildet in jedem Punkte die Summe der Einzelerhebungen.

Unter Interferenz versteht man meist die Übereinanderlagerung von Wellen gleicher Schwingungsdauer. Fig. 111 gibt eine Interferenzerscheinung.

Über Interferenzen von Schwingungen, deren Ebenen nicht identisch sind, siehe später § 209.

171. Stehende Transversalschwingung. Nun denke man sich die Welle *a* — oberste Linie in Fig. 111 — gegen rechts und die Welle *b* gegen links fortgeschoben und zwar jede um ein Viertel Wellenlänge. In der zweiten Reihe der Zeichnung ist dieser Zustand der Welle in einem

solchen, um $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer oder $\frac{1}{4}\tau$ späteren Zeitmomente gegeben. Wir müssen hier die beiden gleichgerichteten und überdies gleichgroßen Exkursionen von a und b addieren; die resultierende Schwingung ist wieder durch die dicke Linie charakterisiert.

Betrachten wir die Erscheinung nach einer weiteren $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer, also im Zeitmomente $\frac{3}{4}\tau$, so hat sich wieder a um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge nach rechts und b um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge nach links verschoben, und wir sehen in der dritten Reihe der Fig. 111, wie sich die Impulse wieder aufheben.

Schließlich nach einer Zeit $\frac{3}{4}\tau$ wirken wieder beide Beschleunigungen überall im gleichen Sinne, sie müssen addiert werden, wie dies die unterste Reihe darstellt.

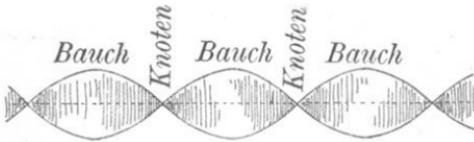


Fig. 112.

Bei dieser stehenden Schwingung, einer Interferenzerscheinung des direkten und reflektierenden Wellenzuges, liegen die Punkte der Ruhe, die Knoten, stets an denselben Stellen; zwischen ihnen liegen Schwingungsbäuche, in welchen sich abwechselnd Wellenberg und Wellental ausbilden. Diese Fig. 112 gibt keinerlei Darstellung der Vorgänge an den Enden des Seiles oder der Saite. Wir ließen dies absichtlich unbestimmt.

172. Einfluß der Reflexionsstellen. Bei einer Saite ist meist jedes Ende an einen starren Körper befestigt, also stets in Ruhe. An jedem Ende einer festgespannten Saite muß also immer ein Knoten sein.

Ein kurzer Schlag auf ein gespanntes Seil von oben her erzeugt eine Art Wellental, nur eine Ausbiegung nach unten, keine Schwingung. Dieses Wellental läuft bis ans starr befestigte Ende des Seiles und wird hier als Wellenberg reflektiert. Am starren Anfange angekommen, wird es wieder als Wellental reflektiert usw. Wir haben also ein wegeilendes Wellental und einen rückkehrenden Wellenberg. Die Reflexion am unfreien Ende erfolgt mit ungleicher, entgegengesetzter Phase; der anschließende Körper hat hier mehr Masse als die Saite.

Wenn wir daher in Fig. 111 rechts und links die Seilenden einzeichnen wollen, dürfen wir dies nicht an beliebigen Stellen tun, sondern nur dort, wo die stehende Welle in Fig. 112 einen Knotenpunkt hat.

Ganz anders aber wird die Sache, wenn wir das Ende des Seiles mittels eines langen dünnen Seidenfadens spannen. Das ans Seilende kommende Wellental wird dann als Wellental reflektiert. Hier hat nämlich die Längeneinheit des anschließenden Seidenfadens weniger Masse als die des Seiles und die Reflexion findet hier an einem sog. freien Ende statt, sie erfolgt mit gleicher Phase.

Denken wir uns einen längeren Stahlstab, der an passenden Punkten leicht aufliegt und dessen Enden ganz frei beweglich sind, und erschüttern

wir diesen transversal, so laufen hier genau wie beim Seile direkte und reflektierte Wellenzüge. Bei den sich ausbildenden stehenden Wellen haben wir aber hier im Auge zu behalten, daß nun die Enden des Stabes frei schwingen können. An diesen Stellen muß sich stets ein Schwingungsbau bilden.

173. Wellenzahl. Wie viele solcher Wellen in einer transversal schwingenden Saite oder einem transversal schwingenden Stabe sich bilden, hängt ganz von der Schwingungsdauer und sonstigen physikalischen

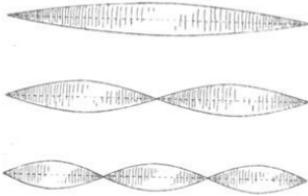


Fig. 113.

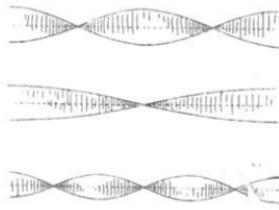


Fig. 114.

Bedingungen ab. Fig. 113 gibt einige Schwingungsmöglichkeiten einer gespannten Saite oder eines elastischen Stabes, dessen Enden fest sind. Fig. 114 liefert hingegen einige Schwingungsmöglichkeiten eines an beiden Enden freien Stabes.

174. Auch stehende Longitudinalwellen entstehen durch Interferenz des direkt fortschreitenden und des reflektiert zurückschreitenden Wellenzuges. Auch hier bleiben die Knoten und Schwingungsbäuche an derselben Stelle.

Wir können direkt die Figg. 111, 112, 113, 114, hier aber nur „symbolisch“ verwenden. Die Knoten sind die Stellen, wo alles in Ruhe bleibt und die Schwingungsbäuche die Stellen, wo die größten Bewegungen stattfinden. Diese sind symbolisch in solcher Weise aufzufassen, wie es Fig. 115 darstellt, wobei wir uns wieder zunächst um die beiden Enden rechts und links nicht kümmern. Die oberste Punktreihe sei z. B. eine longitudinale

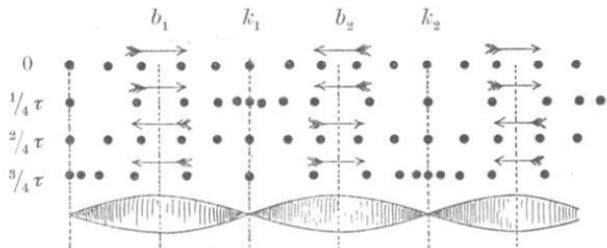


Fig. 115.

Schwingung einer Luftsäule oder einer Stahlstabes od. dgl. in natürlichem Zustande. Die Punkte stellen die einzelnen Partien des Stabes dar. Nach $\frac{1}{4}$ Schwingung ist der Zustand $\frac{1}{4}\tau$ in der zweiten Horizontalreihe erreicht.

Die Massen von b_1 und b_2 bewegen sich in der darüber stehenden Pfeilrichtung von links und rechts her gegen den Knoten k_1 hin, wo eine Verdichtung entsteht. Im Knoten k_2 entsteht aus analogen Gründen eine Verdünnung. Beim Zurückschwingen der Massen wird nach der Zeit $\frac{3}{4}\tau$ der Gleichgewichtszustand passiert (wie in Ruhe); die Schwingung geht aber weiter und die Luft strömt dann von k_1 weg, wo Verdünnung entsteht, nach k_2 , wo Verdichtung auftritt. Die Darstellung durch eine Punktreihe ist zeichnerisch unbequem und unübersichtlich, die unterste Transversalschwingung in Fig. 115 ergibt symbolisch alles, was für die longitudinale Welle wissenswert ist: die Lage der Knoten k und der Schwingungsbäuche b . Bei der stehenden Longitudinalwelle bedeuten also in der symbolisch zeichnerischen Darstellung durch Transversalwellen die Knoten Ruhelagen, wo nach je $\frac{1}{2}$ Schwingung zeitlich abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen stattfinden, während die Wellenbäuche die normale Dichte, aber größte Bewegung darstellen.

Bei transversalen sowohl als auch bei longitudinalen fortschreitenden Wellen haben, wenn keine Dämpfung da ist, alle Punkte dieselbe Amplitude, aber ihre Phase ist verschieden, bei stehenden Wellen hingegen haben alle Punkte einer halben Welle dieselbe Phase, aber ihre Amplitude ist verschieden.

175. Wellenzahl. Eine bestimmte Strecke, z. B. eine Luftsäule, kann analog § 173 in verschiedener Weise longitudinal schwingen, je nach-

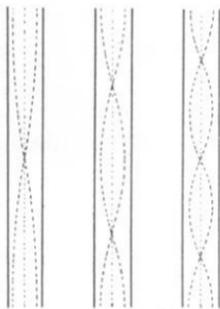


Fig. 116.

dem das Ende festgehalten ist oder nicht. Fig. 116 stellt symbolisch eine Luftsäule in einer Röhre dar, die beiderseits offen ist (also z. B. Luft in einer beiderseits offenen Pfeife) und Fig. 117 eine Luftsäule in einer Röhre, die an einer Seite geschlossen ist (also z. B. Luft in einer einseitig geschlossenen, andererseits offenen Pfeife, § 190).

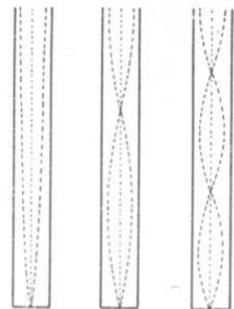


Fig. 117.

Fig. 117 gilt, wenn das untere Ende an ein dichteres Medium grenzt und das obere Ende an ein dünneres. Letztere Bedingung gilt für beide Enden von Fig. 116.

Tonhöhe.

In den folgenden Kapiteln wollen wir alle mechanischen Vorgänge behandeln, welche Veranlassung zu einer normalen Gehörsempfindung geben. Es gibt auch sog. entotische Gehörsempfindungen, deren Ursachen

meist krankhafter Natur sind, Ohrensausen u. dgl.; diese wollen wir ausschließen.

176. Wir teilen die **Gehörsempfindungen** ein in Knalle, Geräusche und Töne. Ein Knall entsteht durch einen plötzlichen Luftstoß, Geräusche sind eine Reihe von kleinen Knallen; jede Sprache besitzt für die verschiedenen Formen von Geräuschen kaum zählbare Ausdrücke: Zischen, Sausen, Knistern usw.

Wir haben die Empfindungen von Tönen oder Klängen immer dann, wenn die Erschütterungen unseres Gehörorganes in periodischer Weise erfolgen, wenn also eine von einem regelmäßig schwingenden Schallerreger ausgehende Luftwelle unser Gehörorgan trifft. Es können auch andere Medien ausnahmsweise an Stelle von Luft treten; wir hören z. B. auch unter Wasser.

177. Tonhöhe und Intervall. Wenn wir gegen die Zähne eines rasch rotierenden Zahnrades eine kleine Feder halten, so wird die Luft so oft pro sek erschüttert als Zähne pro sek auf diese Feder aufschlagen. Diese regelmäßig aufeinanderfolgenden Luftstöße erzeugen die Empfindung eines Tones. Drehen wir das Zahnrad rascher, so ändert sich die Empfindung; wir nennen den Ton höher. Die Tonhöhe nimmt also mit der Schwingungszahl zu.

Von der Schwingungsamplitude hingegen hängt die Tonstärke ab.

Haben wir zwei Zahnräder auf ein und derselben Achse, wobei das eine Rad doppelt soviel Zähne als das andere hat, so wird die Anzahl der Stöße, da ja beide Räder sich gleich schnell drehen, wie 1 : 2 sich verhalten. Diese beiden Töne erklingen, hintereinander oder gleichzeitig gehört, angenehm; sie bilden eine Konsonanz. Wir nennen den höheren Ton die Oktave. Jeder beliebige Grundton hat seine eigene Oktave, also einen Ton, der zweimal soviel Schwingungen hat. Das Tonintervall der Oktave ist 1 : 2.

Hätten wir zwei Räder gewählt, bei denen die Anzahl der Zähne sich verhält wie 2 : 3, so hätten wir gleichfalls ein angenehmes musikalisches Gefühl bei der Aufeinanderfolge dieser Töne gehabt. Dieselben heißen Grundton und Quint. Das Tonintervall der Quint ist 2 : 3.

Es zeigte sich, daß jene Töne, deren Schwingungszahlen in einfachem Verhältnis zueinander stehen, musikalisch zueinander passen. Sie bilden eine Konsonanz, im Gegenfalle eine Dissonanz (§ 222).

178. Wenn die Zähne eines Zahnrades auf eine Feder aufschlagen, entstehen immer neben dem jedesmaligen Luftstoß sehr viel Nebengeräusche. Viel reinere Töne liefert die **Sirene**, in ihrer einfachsten Form

eine am Rande durchbohrte und um ihre Achse drehbare Scheibe. Bläst man, Fig. 118, Luft aus einer Röhre gegen diese Löcher, so erfährt dieser Luftstrom periodische Unterbrechungen, es tritt durch jedes vorübergehende Loch etwas komprimierte Luft aus (Pfeil in Fig. 118). So entsteht eine kugelförmig nach allen Seiten sich ausbreitende longitudinale Wellenbewegung.

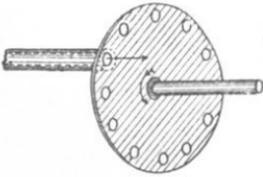


Fig. 118.

In der Sirene von Cagniard-Latour (Fig. 119) enthält der feste kreisförmige horizontale Deckel *C* eines kleinen Windkastens, in welchen Luft mit einem Blasebalg eingeblasen werden kann, eine Reihe äquidistanter Löcher längs einer Peripherie; knapp darüber ist eine zweite gleichgroße, aber um ihre Achse drehbare Scheibe *D* mit korrespondierenden Löchern angebracht, deren Lochachsen aber schräg gegen die der Löcher des festen Rades ziehen. Infolge dieser schiefen Stellung dreht der aus der unteren festen Scheibe entweichende Luftstrom die obere, die immer rascher rotierend einen immer höheren Ton gibt; dieser ist, da alle Löcher gleichzeitig geöffnet und geschlossen werden, viel lauter als bei der einfachen Sirene (Fig. 118). Ein an die mit *D* sich drehende Achse *A* beliebig ein- und ausrückbares Zählwerk *P* (0 Einer, 0' Hunderter) gestattet jede einer bestimmten Tonhöhe entsprechende Umdrehungszahl und durch Multiplikation mit der Lochanzahl das entsprechende n zu finden.

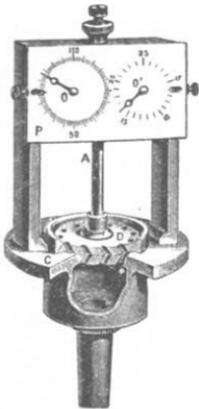


Fig. 119.

Diese Sirene tönt auch unter Wasser.

Durch starkgespannten Dampf getrieben, gibt eine ähnliche Sirene in Fabriken, auf großen Schiffen usw. weithin hörbare Signale, die einen laut heulenden Ton haben.

179. Die Tonintervalle geben das relative Verhältnis der Töne, wir müssen aber auch natürlich für die **absolute Tonhöhe** eine Bestimmung treffen. Im Jahre 1881 setzte nun eine internationale Konferenz willkürlich fest, daß das a^1 , das sog. „eingestrichene“ a , auch Kammerton genannt, die Schwingungszahl 435 haben soll. Dieses Normal- a ist also ein Ton, bei dem der Schallerreger 435 mal pro sek hin- und herschwingt. Zählt man den Hin- oder den Hergang einzeln wie beim Pendel (§ 75), so hat a^1 870 Schwingungen pro sek.

180. Gehörgrenze für Tonstärke. Bei gleicher äußerer Schallenergie ist die Empfindlichkeit des Ohres für verschieden hohe Töne sehr verschieden. Das Minimum der noch wahrnehmbaren Tonintensität, der Schwellwert, ist für Töne zwischen 1000 und 5000 Schwingungen am kleinsten; hier hören wir auch sehr schwache Töne. Bei sehr hohen und tiefen Tönen muß der Schwellwert ein viel größerer sein. M. Wien (1903).

Die Vergleichung der Schwellwerte ist in der otiatrischen Diagnostik für die Bestimmung der Hörschärfe von größter Bedeutung. Von den vielen diesbezüglichen Methoden dürfte wohl ein knapp am Ohr anliegendes Telephon (§ 719) von einer Wechselstromsirene (§ 708) gespeist am besten sein, da sich hier die Energie in elektrischem Maße leicht und genau bestimmen läßt.

181. Gehörgrenze für Tonhöhe. Wenn wir einen Ton immer tiefer machen, so müssen wir schließlich an eine Grenze kommen, wo unser Ohr die einzelnen Erschütterungen der Luft nicht mehr als Tonempfindung zusammenfassen kann, sondern als aufeinanderfolgende einzelne Stöße fühlt. Wenn man mit einem Hammer fünf- oder sechsmal pro sek auf einen Tisch aufschlägt, werden die einzelnen Knalle getrennt nebeneinander gehört.

Andererseits wird es auch abgesehen von den mechanischen Schwierigkeiten unmöglich sein, die Tonhöhe nach aufwärts bis ins Unendliche zu steigern. Wenn wir einen Metallstab anschlagen, gibt er eine bestimmte Tonhöhe. Wenn man nun den Metallstab immer kleiner macht, steigt die Tonhöhe. Man kann die Schwingungszahl aus den Dimensionen des Stabes leicht berechnen. Noch besser arbeitet man mit kleinen Pfeifchen (Galtonpfeife), deren Länge man durch einen verschiebbaren Stempel beliebig verkürzen und so den Ton erhöhen kann (§ 191). Mit Hilfe von Staubfiguren (§ 195) kann man objektiv Luftschwingungen bis 340 000 pro sek nachweisen; viel früher aber schon wird keine Spur eines Tones gehört.

Die Bestimmung der unteren und oberen Gehörgrenze der Tonhöhe ist nur annähernd zu machen. Es ist sehr schwer, einen reinen Ton ohne jede Nebentöne zu erzeugen und es spielt bei solchen Versuchen auch der Schwellenwert der Tonstärke eine Rolle. Dann verhalten sich verschiedene Menschen besonders bei der oberen Gehörgrenze sehr verschieden. Als untere Grenze gelten ungefähr 16—40 Schwingungen, als obere etwa 20,000 pro sek (Stumpf und Meier); andere Autoren geben, was aber wohl falsch sein dürfte, höhere Zahlen.

Bei solchen physiologisch-psychologischen Versuchen spielen viele Momente mit. Über die Frage, wie kurz ein Ton sein kann, um noch gehört zu werden, über die Tatsache, daß ein sehr leiser Ton erst nach einiger Zeit gehört wird, das sog. Anklingen und Abklingen, über Tonfarbe, über Nachempfindung, Ermüdung usw. findet man Näheres z. B. in „Der Gehörsinn“ von K. M. Schäfer¹⁾.

182. Der Umfang der Schwingungszahlen für **musikalisch brauchbare Töne** reicht z. B. bei der Tastatur des Klaviers von etwa 27 bis 3480 Schwingungen pro sek.

1) Handbuch der Physiologie von Nagel, III, Braunschweig 1905, oder „Tonphysiologie“ von C. Stumpf, Leipzig 1883 u. 1890.

Fig. 120, nach Höfler, gibt eine gute Übersicht dieser Verhältnisse. Die sieben Oktaven des Klaviers von A_2 bis a^4 stellen zugleich 12 Quinten dar (in Fig. 120 durch die punktierten Striche links angedeutet). Die 7. Oktav einer Schwingungszahl n ist $2^7 n$ oder $128 n$. Die 12. Quinte dieser Schwingungszahl ist aber $(\frac{3}{2})^{12} n$ oder $129,742 n$. Unser Ohr ist nun gegen Ungenauigkeit bei Oktaven viel empfindlicher als bei Quinten. Man nimmt daher bei der sog. „temperierten“ Stimmung, die alle fest gestimmten Instrumente haben, für das Intervall der Quinte nicht 1,5, sondern 1,498. Ebenso werden auch an den anderen Tonintervallen kleine Korrekturen vorgenommen.

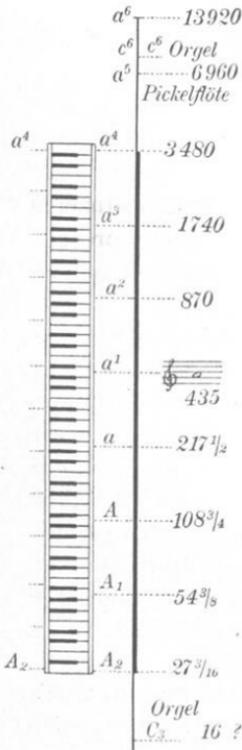


Fig. 120.

Schallerreger.

183. Von den transversal schwingenden Schallerregern ist die **Saite** am verbreitetsten.

Die Schwingungszahl steht zunächst im umgekehrten Verhältnis zur Saitenlänge. Der Ton wird überdies, wenn man die Saite mehr spannt, höher; er wird tiefer, wenn die Saite mehr Masse pro Längeneinheit hat.

Wenn wir eine bestimmte Saite von bestimmter Spannung haben, so ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c irgendeiner Erschütterung längs der Saite eine konstante Größe und nach der Gleichung $c = \lambda/\tau$ ist τ direkt proportional der Wellenlänge. Wenn wir daher eine Saite halb so lang machen, so werden die Wellenlängen halb so groß

und es muß daher die Schwingungsdauer τ halb so groß oder die Schwingungszahl n doppelt so groß werden.

Aber auch bei gleichbleibender Saitenlänge kann man durch verschieden starke Spannung die Tonhöhe steigern, weil man dadurch die Elastizität der Saite und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c erhöht. Ebenso ist klar, daß bei gleichbleibender Elastizität (gleiche Spannung und gleiche Länge) eine Saite langsamer schwingen wird, wenn man sie beschwert, wenn man z. B. um eine Darm- saite der ganzen Länge nach einen dünnen Draht herumwickelt. Die Schwingungszahl n ist gleich $\frac{1}{2l} \sqrt{\frac{gp}{d}}$, wo l die Länge, p die Spannung in Gramm- gewichten und d die Längendichte der Saite ist.

Darum nimmt man für hohe Töne kurze, dünne, für tiefe Töne lange, dicke Saiten.

184. Schwingungsform und Obertöne. Eine bestimmte Saite kann je nach der äußeren Erregung entweder so schwingen, daß sie an den

beiden Enden allein einen Knoten hat oder aber auch einen in der Mitte, wie dies in Fig. 113 dargestellt wurde usw. Nennen wir den, Fig. 113 in der obersten Zeile gezeichneten Ton, den Grundton, so entspricht die zweite Schwingungsmöglichkeit (zweite Zeile) der Oktav, die dritte Schwingungsmöglichkeit der Quint der Oktav, die vierte der zweiten Oktav usw., da die Tonhöhe der Wellenlänge umgekehrt proportional ist.

Nun wird in Wirklichkeit, wenn wir eine Saite durch Streichen, Zupfen oder Schlagen zum Tönen bringen, nie der Grundton allein ertönen, sondern auch alle die eben geschilderten Töne klingen gleichzeitig mehr oder weniger stark. Man nennt diese Töne, welche zum Grundton in einem Schwingungsverhältnisse 2, 3, 4 usw. stehen, Obertöne und ein solches Tongemisch (im Gegensatz zum einfachen Tone des reinen Grundtones) einen Klang. Wenn wir die wirkliche Schwingungsform der Saite in irgendeinem Momente kennen lernen wollen, so müssen wir die Einzelexkursionen, wie sie in einem gegebenen Momente dem Grundtone, der Oktav und Quint der Oktav usw., entsprechen, addieren (Superposition § 170). Das gibt eine ziemlich komplizierte Kurve. Fig. 121 zeigt einen einfachen Fall: die Addition von Grundton (gestrichelt gezeichnet) und Oktav (dünn gezeichnet), indes die resultierende Schwingungsform dicker ausgezogen ist.



Fig. 121.

Umgekehrt zeigte Fourier (1822), daß jede noch so zusammengesetzte periodische Bewegung mathematisch in eine Summe einzelner Sinusbewegungen sich zerlegen läßt.

185. Die Transversalschwingungen von Metallstäben gaben wir bereits in Fig. 114. Denken wir uns nun einen Metallstab hufeisenförmig gebogen, so erhalten wir eine **Stimmgabel**. Die Art, wie eine Stimmgabel schwingt, ist charakterisiert in Fig. 122. Wir sehen, daß die beiden Seiten oben pendelförmig gegeneinander schwingen, ferner haben wir zwei Knoten tief unten an der Gabel, so daß der Stiel der Gabel ein klein wenig auf und abgeht.

Die Stimmgabel gibt nur sehr schwache Obertöne.

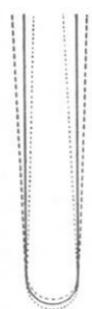


Fig. 122.

186. Tönende Platten. So wie ein Stahlstab können auch Platten aus Metall, Glas oder anderen elastischen Substanzen in Schwingungen versetzt werden und an diesen bilden sich dann Knotenlinien aus: die Gesamtheit der Punkte, die in vollkommener Ruhe bleiben. Wenn wir eine in der Mitte befestigte, quadratische Metallplatte oben mit Streusand bestreuen und in passender Weise anstreichen (Fig. 123), so ordnet sich der Streusand längs der Diagonalen des Quadrates.

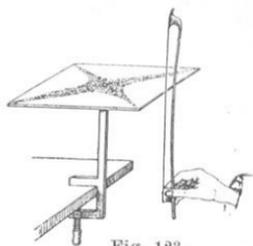


Fig. 123.

Diese Linien sind also in Ruhe, während zwei einander gegenüberliegende Dreiecke hinauf und hinunter, die anderen zwei hinunter und hinauf schwingen.

Durch verschiedene Modifikationen erhält man oft sehr komplizierte Figuren: Chladni'sche Klangfiguren.

187. Bei vielen Schallerregern spielt die **Resonanz** eine wichtige Rolle. Wenn wir eine Stimmgabel zum kräftigen Tönen bringen, so geht



Fig. 124.

von ihr aus ein longitudinal fortschreitender Wellenzug in den Luftraum hinaus. In Fig. 124 ist diese Welle nur nach einer Seite hin gezeichnet. Trifft dieser Wellenzug irgendwo einen ruhenden, aber schwingungsfähigen Körper (z. B. eine zweite Stimmgabel), so wird dieser in Schwingungen versetzt, jedoch nur dann, wenn sein Eigenton dem Ton der auffallenden Welle gleich ist. Man kann so eine Stimmgabel, ohne sie zu berühren, zum kräftigen Tönen bringen. Singen wir in ein Klavier — mit abgehobenem Pedal —, so antwortet jene Saite durch Resonanz, welche mit dem gesungenen Tone gleiche Höhe hat. Eine solche auswählende Resonanz findet aber nur bei genauer Übereinstimmung der Schwingungszahlen statt.

Die mechanische Erklärung dieses Phänomens liegt nahe. Selbst ein kleiner Knabe wird eine große Kirchenglocke oder eine schwere Schaukel in pendelnde Bewegung versetzen, wenn er immer im richtigen Momente am Strange zieht. Der erste Antrieb verursacht eine kaum merkliche Schwingung, der zweite, der im richtigen Tempo erfolgt, vergrößert diese Schwingung usf. Würde hingegen selbst ein kräftiger Mann in ganz unregelmäßigem Tempo an der Glocke ziehen, so würde sie vielleicht mit dem ersten Impuls etwas zum Schwanken gebracht, die nächsten Impulse würden aber diese Wirkung wieder zerstören. Nur bei genauem Synchronismus der sich wiederholenden Impulse können sich die einzelnen Energien mechanisch addieren.



Fig. 125.

Eine beiderseits offene Glasröhre g von etwa 4 cm Durchmesser wird mit ihrem unteren Ende in ein größeres Wassergefäß gebracht (Fig. 125). Wenn ich über das obere Ende der Röhre eine tönende Stimmgabel S halte, so wird die Tonstärke zunächst nicht geändert. Durch Heben und Senken der Glasröhre gg mit der Stimmgabel kann ich die Länge der mitschwingenden Luftsäule L leicht verändern und es zeigt sich, daß eine ganz bestimmte Länge ein kräftiges Anschwellen des Tones gibt. Nehmen wir z. B. eine a^1 Stimmgabel — 435 Schwingungen pro sek —, so wird dieses Optimum der Resonanz bei der Länge der Luftsäule von ca. 19,5 cm eintreten. Wir haben nun, nach Fig. 117 links, in L unten einen Knoten und oben einen Schwingungsbauch. Es hat die Luftsäule genau $\frac{1}{4}\lambda$. Die ganze Wellenlänge λ ist somit 78 cm. Das ist also die Wellenlänge der longitudinalen Luftschwingung für

die Schwingungszahl 435. Nach § 166 ist $c = \lambda n$, also $78 \cdot 435$ cm oder 338 m/sek. Das ist somit die Schallgeschwindigkeit in Luft, welche für alle Töne gleich ist. (Eine höhere Stimmgabel hätte bei diesem Versuche eine kürzere Luftsäule L zur Resonanz gebracht.)

Zieht man die Röhre *gg* langsam aus dem Wasser heraus, so verschwindet die Resonanz, erreicht aber bei einer Länge von $\frac{3}{4}\lambda$ (unten Knoten, darüber $\frac{1}{2}\lambda$, dann Knoten und darüber noch $\frac{1}{4}\lambda$, also oben Schwingungsbauch) wieder ein Maximum. L ist dann $3 \cdot 19,5$ cm.

Eine beiderseits offene Glasröhre wird für den Ton a^1 am besten bei einer Länge von $2 \cdot 19,5$ cm resonieren. Dann liegt ein Knoten in der Mitte und je ein Bauch an jedem Ende (Fig. 116 links).

188. Außer dieser „auswählenden“ Resonanz gibt es noch ein **erzwungenes Mittönen**, wenn der mittönende Körper nicht mit seiner Eigenperiode schwingen kann, sondern mit einer durch fremde Kraft erzwungenen Schwingungsdauer. Befestigen wir an das Ende einer Stimmgabelzinke eine Saite, so wird das Ende der Saite so schwingen müssen wie die Stimmgabel; ebenso schwingt die Membran des Telephons oder des Trommelfelles im Ohr; diese Membranen reagieren auf jede Tonhöhe innerhalb eines sehr großen Tonumfanges. Um erzwungene Schwingungen zu erzeugen, muß der Erreger auf den mitklingenden Körper kräftig einwirken können; die Verbindung beider Systeme oder die sog. Koppelung muß eine enge sein.

Bei den in der Musik verwendeten Resonanzböden von z. B. Klavier oder Geige ist besonders darauf zu achten, daß der Resonanzboden keine eigene Resonanz besitzt, daß er also alle Töne gleichmäßig verstärkt.

Der Ton einer angeschlagenen und in der Hand gehaltenen Stimmgabel wird stärker, wenn man den Stiel auf einen Tisch oder Hohlraum aufsetzt, auch wenn dieser Hohlraum nicht in der Tonhöhe korrespondiert. Dieses Mittönen wird um so kräftiger, je besser sich die Dimensionen des resonierenden Körpers den Schwingungen der Gabel anpassen.

Es folgt natürlich unmittelbar aus dem Energieprinzip, daß die vermehrte Stärke des Tones dadurch gewonnen wird, daß die angeschlagene Stimmgabel weniger lange tönt, wenn sie größere fremde Massen in Mitschwingung versetzen muß.

189. Der **Perkussionsschall** (in der „physikalischen“ Diagnostik) entsteht beim Beklopfen von Körperoberflächen mit dem Finger oder Perkussionshammer, eventuell mit Zwischenschaltung eines Plättchens (Plessimeters) und dürfte wohl eine Resonanzerscheinung des so äußerlich erzeugten Geräusches in einzelnen Körperhöhlen sein. Eine einfache physikalische Erklärung dieses Gebietes existiert nicht; alle von medizinischer Seite gegebenen Darstellungen sind physikalisch ganz verworren und unbrauchbar.

190. Schwingende Luftsäulen. Die Luft in einer Röhre kann durch verschiedene Mittel in Schwingung gebracht werden; wenn man z. B. über den Lochrand eines Hausschlüssels kräftig hinwegbläst, entsteht ein lauter Pfiff, eine Blechkanne unter einer Wasserleitung gibt bei allmählicher Füllung einen unverkennbaren und immer höher werdenden Ton (wegen Verkürzung der Röhre), ein kleines Gasflämmchen in einer beiderseits offenen Röhre erzeugt einen oft kräftigen Ton: chemische Harmonika (ganz analog manchmal ein zurückgeschraubter Auerbrenner in seinem Glaszylinder).

191. In der Lippenpfeife (Fig. 126) wird die Luftsäule R dauernd in sehr regelmäßige Longitudinalschwingungen versetzt. Die Luft strömt zunächst in einen Hohlraum K , den Windkasten, und aus diesem durch eine schmale Spalte S gegen eine Schneide, die sog. Lippe L ; dadurch gerät die Luft in der Pfeife R in kräftige Schwingungen. Je kürzer die Pfeife, desto kürzer die Wellenlänge und desto höher der Ton; je länger die Pfeife, desto tiefer.

Die Röhre sei zunächst oben offen; dann müssen oben und unten Stellen normaler Luftdichte, d. h. Schwingungsbäuche, sein. Diesen Bedingungen entspricht Fig. 116, in all den gezeichneten drei Fällen ist ja oben und unten ein Schwingungsbauch. — Da hier die Wellenlängen (in der Luft) im Verhältnisse $1:2:3$ sich verkleinern, so verhalten sich auch die Tonhöhen wie $1:2:3$ usw.; je nach gewissen Modifikationen erklingt der Grundton oder der erste Oberton oder der zweite Oberton usw., eventuell auch als Klang mehrere gleichzeitig.

Schließt man die Pfeife oben, gedeckte Pfeife, so muß unten ein Schwingungsbauch, oben aber alles in Ruhe, also ein Knoten sein; dem entspricht Fig. 117 (wenn man jede der drei Röhren umkehrt). Da hier die Wellenlängen (in der Luft) im Verhältnis $1:3:5$ abnehmen, so verhalten sich auch die Tonhöhen wie $1:3:5$.

Die offene Pfeife hat alle Obertöne, die gedeckte nur die ungeraden.

Wenn man eine offene Pfeife am Ende zuhält, so hat in ihr statt des Grundtones mit $\frac{1}{2}\lambda$ nur ein solcher mit $\frac{1}{4}\lambda$ Platz; die Tonhöhe sinkt auf die Hälfte. Die gedeckte Pfeife ist eine Oktave tiefer als eine gleich lange offene.

In Wirklichkeit sind die Pfeifentöne tiefer als es die Theorie verlangt. Einmal ist die Pfeife zwischen L und S nicht ganz offen und dann ist am oberen offenen Ende der Pfeife nicht der normale Luftdruck, sondern abwechselnd etwas mehr oder weniger, sonst könnte sich ja kein Wellenzug in den Luftraum hinaus fortpflanzen. Es ist so, wie wenn die Reflexion nicht genau am Ende, sondern etwas weiter draußen stattfände.

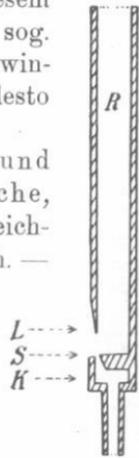


Fig. 126.

Dann treten in Luft (§ 265) im Knoten abwechselnd Erwärmungen und Abkühlungen auf, welche Temperaturschwankungen die Seitenwände der engen Röhren etwas nach außen ableiten. Dadurch werden die Wellenlängen um so kürzer, je enger die Röhren sind.

192. Bei den Zungenpfeifen ist die Verbindung zwischen Windkessel und Röhre durch irgendeine federnde Türe, die sog. Zunge, geschlossen. Durch Anblasen wird diese Verschlussmembrane in Transversalschwingungen versetzt und öffnet periodisch wechselnd dem Luftstrom den Weg aus dem Windkessel in die Röhre, deren Luft so in Schwingungen gerät. Hier entspricht die Tonhöhe in erster Reihe der Schwingungszahl der Zunge und je nach der Röhrenlänge wird diese Tonhöhe ein wenig nach oben oder unten modifiziert.

Beim Fagott ist eine dünne Holz- oder Rohrplatte die Zunge. Trompete und Waldhorn sind Zungenpfeifen, bei welchen die Lippen des Bläasers die Zunge bilden. Während die Trompete durch Öffnen seitlicher Löcher verschiedene Längen und Tonhöhen erhält, werden im Horne bei unveränderter Länge nur die harmonischen Obertöne durch den verschiedenen Modus des Anblasens erzeugt.

Schallfortpflanzung.

193. Kugelförmige Ausbreitung. Jeder Schallerreger erzeugt im umliegenden Medium Wellen, z. B. in Luft abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen, die kugelförmig nach allen Seiten gleichmäßig bis zum Gehörorgan des Hörenden fortschreiten. Da die Energie der Schwingung im Fortschreiten sich über Flächen verteilt, die wie alle Kugelflächen mit dem Quadrate des Radius wachsen, so muß die Schallintensität, welche eine gleichbleibende Fläche, z. B. das Ohr des Hörenden erhält, umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung sein. M. Wien hat dies Gesetz durch direkte Versuche im Freien bestätigt.

194. Direkte Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Die Zeitdifferenz zwischen der Wahrnehmung des Lichtblitzes und Knalles eines in n km Entfernung abgefeuerten Geschützes gestattet, die Schallgeschwindigkeit in freier Luft zu bestimmen. Es sei diese Differenz z. B. t sek. Da das Licht bei seiner großen Geschwindigkeit fast momentan in unsere Augen gelangt, ergibt sich die Schallgeschwindigkeit in Luft, Weg durch Zeit oder n/t mit 340 m/sek bei 16° C; sie nimmt zu mit der Temperatur, ist aber vom Luftdrucke unabhängig.

Die Schallgeschwindigkeit erweist sich auch als unabhängig von der Tonhöhe. Das Musikstück eines vielstimmigen Orchesters erklingt in großer Entfernung nur schwächer, aber in der richtigen Harmonie. Würden sich z. B. die höheren Töne schneller fortpflanzen als die tieferen, so müßte in einiger Entfernung jeder Zusammenklang verschwunden sein.

Nur ganz scharfe, explosionsartige Erschütterungen pflanzen sich bedeutend schneller fort. In solchen Fällen kann die Geschwindigkeit bis zu 700 m pro sek ansteigen.

Die Schallgeschwindigkeit läßt sich auch theoretisch berechnen, § 267.

195. Eine sehr bequeme Art der Geschwindigkeitsbestimmung des Schalles in Luft und anderen Gasen liefert die **Röhre von Kundt**. Ein dünner, in seiner Mitte festgeklemmter Glasstab (Fig. 127 rechts) trägt an

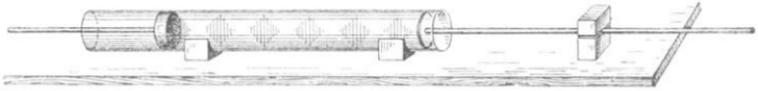


Fig. 127.

seinem linken Ende ein kleines, leichtes, vertikales Korkscheibchen, das in eine weitere Glasröhre, ohne zu berühren, hineinragt. Das Ende dieser weiten Glasröhre ist links durch einen Kork, den man etwas verschieben kann, verschlossen. Streicht man nun die nach rechts herausragende Hälfte des Glasstabes mit einem nassen Tuchlappen, so gerät er in kräftige Longitudinalschwingungen. Der Ton ist ein sehr hoher. Das leichte Korkscheibchen am linken Ende des Glasstabes schwingt dann energisch in der Längsrichtung des Stabes hin und her und erzeugt in der Luftsäule eine Schwingung. Befindet sich in dieser irgendein leichtes Pulver, z. B. ein wenig Korkfeilicht, so wird dieses durch die Luftschwingungen gegen die Knoten hin geblasen. Hier bilden sich Rippen aus, die besonders deutlich werden, wenn man durch Regulierung der Röhrenlänge mittels des Korkes links dafür sorgt, daß scharfe Resonanz eintritt. Das Pulver zeigt dann die in Fig. 127 angedeuteten Staubfiguren und die scharf ausgeprägten Knoten ermöglichen eine genaue Ausmessung ihrer Entfernung, welche gleich ist der halben Wellenlänge.

Daraus ergibt sich z. B. (die Schallgeschwindigkeit der Luft als 34 000 cm/sek vorausgesetzt) zunächst die Schwingungszahl des Glasstabes $n = 34\,000/\lambda$. Aus diesem n und der Länge L des Glasstabes, der in der Mitte einen Knoten und an den Enden je einen Bauch hat, erhält man die Schallgeschwindigkeit im Glasstabe $c_1 = n2L$.

Wichtig ist die Vergleichung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen. Durch nicht gezeichnete kleine Röhrchen kann man z. B. Kohlensäure einleiten; man findet in diesem Gase eine andere Wellenlänge λ_1 , welche kleiner ist als die Wellenlänge in Luft λ . Die Schallgeschwindigkeit in Luft c und die in Kohlensäure c_1 verhalten sich, da $c = \lambda/\tau$ und $c_1 = \lambda_1/\tau$, genau wie diese Wellenlängen. Die Schallgeschwindigkeit in Kohlensäure ergibt sich mit 263 m/sek. Die Wichtigkeit dieser Methode besonders für Chemiker erhellt aus den Bemerkungen in § 267

196. Wenn eine in der Luft fortschreitende Schallwelle an die Grenzfläche eines anderen Mediums kommt, so tritt **Reflexion** ein. Die Rich-

tung des reflektierten Strahles findet man aus der Richtung des einfallenden Strahles genau nach den (§ 15) für Licht aufgestellten Regeln. Man kann analog, wie man von einem Lichtstrahle spricht, auch von einem Schallstrahle als jener Richtung sprechen, in der sich der Schall bewegt. Fällt also ein Schallstrahl senkrecht auf eine Wand auf, so wird er senkrecht nach rückwärts reflektiert.

Unser Gehörorgan ist imstande, pro sek etwa neun Schalleindrücke getrennt zu empfinden, zu sondern. Wenn ich daher ein einsilbiges Wort gegen eine reflektierende Wand — Mauer, Felsen oder Waldrand — rufe, so muß, damit dieses Wort nach der Reflexion wieder gehört wird, mindestens $\frac{1}{9}$ sek verfließen. Da der Schall hin und zurückgehen muß, haben wir die Gleichung:

$$\text{Schallgeschwindigkeit} = \text{Weg} : \text{Zeit} = 2 \text{ Wandentfernung} : \frac{1}{9}$$

oder Wandentfernung = $\frac{1}{18}$ 340 m für ein einsilbiges Echo, für ein zweisilbiges $\frac{2}{18}$ 340 usw. Wenn man einen langen Satz spricht, so hört man im ersten Fall die letzte Silbe, im zweiten Fall die zwei letzten Silben usw.

197. „Akustik“ von Sälen. Es ist klar, daß diese gleichsam nachhinkenden Schalleindrücke den unmittelbaren Schalleindruck beeinflussen müssen. Das geschieht nun in jedem Saale oder Zimmer, denn da gibt es unzählige Echos, deren gemeinsame Wirkung man als Nachhall bezeichnet. Der Nachhall verstärkt zunächst die Schallenergie an irgendeiner Stelle. Im Freien klingt ein Ton schwächer als im Zimmer, weil gar kein Nachhall da ist. Dauert der Nachhall aber zu lange, so vermindert er die Verständlichkeit, da die neu entstehenden Töne durch den Nachhall der früher gesprochenen oder gesungenen anderen Töne gestört werden. Stärke und Dauer des Nachhalles hängt ab von der Größe des Raumes, dem Reflexionsvermögen der Wände und von ihrer Form.

S. Exner arbeitete eine einfache Methode zur quantitativen Bestimmung der Dauer und Stärke des Nachhalles aus. Die Explosion einer kleinen Patrone erzeugt einen kurzen Knall, der auf ein Aufnahme-telephon wirkt, das an verschiedenen Stellen eines Saales aufgestellt werden kann. Von diesem Aufnahme-telephon führt eine Leitung zu einem Telephon in einem fernen Messungsraum. Dieses zweite Hörtelephon wird erst nach dem Schusse eingeschaltet, z. B. nach 0,5 oder 1,00 sek; eine einfache Vorrichtung gestattet überdies, die Stärke dieses Nachhalles quantitativ zu bestimmen. Auch kann man so die Gesamtdauer des Nachhalls leicht finden. Als Beispiel Exner'scher Werte seien hier angeführt die Zahlen

a) für den medizinischen Rigorosumsaal der Wiener Universität. Die Patrone wurde in der Mitte des Haupttisches abgefeuert und in 2 m Entfernung davon das Aufnahme-telephon aufgestellt,

b) für den physiologischen Hörsaal. Hier wurde die Kapsel am Katheder zur Detonation gebracht und das Aufnahme-telephon in 1 m Entfernung aufgestellt.

Es ergaben sich für den Nachhall in

	a)	b)
Dauer in sek	1,43	1,02
Stärke (gegen ursprünglich) nach 0,5 sek	96%	84%
Stärke „ „ nach 1,0 sek	65%	0%

a ist das Beispiel einer schlechten, b das einer sehr guten Akustik.

198. Doppler's Prinzip (1841). Wenn sich die Entfernung zwischen Schallquelle und Ohr verändert, ändert sich auch die Tonhöhe. Entfernt sich die Schallquelle, so wird das Ohr pro sek weniger Schallwellen empfangen, der Ton erscheint uns tiefer, und zwar um so mehr, je rascher die Entfernung zwischen Ohr und Schallquelle wächst. Umgekehrt wird bei Annäherung der Schallquelle der Ton höher. Wenn wir knapp am Geleise einer Bahn stehen und einen Eilzug an uns vorübersausen lassen, so erscheint der Ton des Gesamtgetöses der Eisenbahn oder der Pfiff der Lokomotive beim Herannahen des Zuges zu hoch und beim Fortfahren zu tief. Wir hören die richtige Tonhöhe nur, wenn der Zug unmittelbar an uns vorbeisaust.

Dieses Prinzip werden wir in der Optik noch einmal wiedertreffen (§ 506).

199. Die Geschwindigkeit longitudinaler Wellen hat in **festen** und **flüssigen Substanzen** bedeutend höhere Werte als in Luft (So würde z. B. der Versuch (§ 195) für Glas ca. 5000 m pro sek ergeben). Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Wasser maß Colladon (1826) im Genfer See analog dem Versuch § 194. Eine unter Wasser hängende Glocke wurde vom Schiffe aus angeschlagen, wo man am Deck gleichzeitig einen Lichtblitz aufleuchten ließ. In 14 km Entfernung bestimmte man von einem zweiten Schiffe aus mittels eines mit einer Metallplatte verschlossenen Hörtrichters, dessen Hörrohr aus dem Wasser herausragte, die Zeitdifferenz zwischen dem (momentanen) optischen Signale und der Schallverspätung durch das Wasser. Die Schallgeschwindigkeit ergab sich zu 1435 m pro sek.

Analoge unterseeische, elektrisch angeschlagene Glocken erwiesen sich in neuerer Zeit als gut brauchbare Seesignale. Selbstverständlich müssen an den Schiffen entsprechende Aufnahmavorrichtungen vorhanden sein. Zu dem Zwecke befindet sich an der Vorder- und Hinterseite des Schiffes je rechts und links unter Wasser ein schallempfindliches Mikrophon, im ganzen also vier Mikrophone, welche abwechselnd mit einem Telephon (§§ 719 u. 720) an Deck verbunden werden können. Durch Einschalten der Mikrophone vorn oder hinten, rechts oder links, läßt sich die Schallrichtung ziemlich genau bestimmen, in welcher eine tönende unterseeische Glocke, die auf einer Landstation oder auch auf einem fahrenden Schiffe sein kann, sich befindet. Die Bestimmung dieser Schallrichtung, welche bei Nebel für die Sicherheit des Schiffes von größter Bedeutung ist, durch Pfeifen, Sirenen u. dgl. in Luft ist äußerst irreführend.

Auf Schalleitung in festen Körpern beruht das Stethoskop, welches zur diagnostischen Auskultation, zur Wahrnehmung „natürlicher“ Geräusche im

Körper, besonders in der Brustgegend, verwendet wird, zusammen mit dem Beklopfen (Perkussion § 189) die in früheren Zeiten wichtigste Methode der physikalischen Diagnostik.

Schwingungsformen und ihre Erkennung.

200. Fig. 128 stellt einen **Vibrographen** dar, der zur Bestimmung der Schwingungszahl einer Stimmgabel oder zur Messung sehr kleiner Zeiträume — Bruchteile von Sekunden — dient. Die zylinderförmige und mit berußtem Glanzpapier überzogene Trommel *T* dreht sich, durch einen entsprechenden Motor gleichmäßig angetrieben, wobei sie gleichzeitig längs der Achse sich seitlich verschiebt, weil die Achse eine Schraube in einer festsitzenden Schraubenmutter *S* bildet.

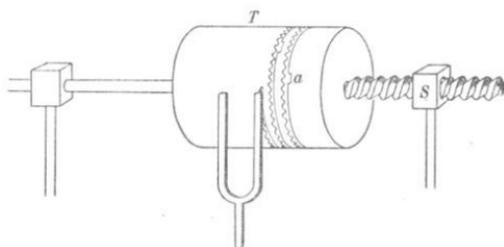


Fig. 128.

Eine kleine Spitze, z. B. Schweinsborste, gegen diese registrierende Trommel *T* gehalten, würde auf der Zylinderfläche eine Schraubenlinie beschreiben.

Ist diese Borste aber an der Zinke einer schwingenden Stimmgabel befestigt, so wird sie eine wellenförmige Schraubenlinie aufzeichnen. Neben diesem Stifte befindet sich (in Fig. 128 nicht gezeichnet) ein zweiter Stift, der an dem Ende eines kleinen Hebels sitzt; das andere Ende dieses Hebels bildet einen kleinen Eisenanker eines Elektromagneten. Wenn ein Sekundenpendel alle Sekunden einen durch diesen Elektromagneten gehenden Strom schließt, so bekommt man auf der rotierenden Trommel alle Sekunden ein kleines Zeichen durch diesen zweiten Stift. Ist gleichzeitig die Stimmgabel angeschlagen oder, noch besser, elektromagnetisch betrieben (§ 685), so wird sie ihre Wellenlinie aufschreiben und wir brauchen dann einfach abzuzählen, wie viele Wellenberge und Wellentäler zwischen zwei Sekundenmarken fallen, um die Schwingungsdauer der Stimmgabel zu finden. In Fig. 128 ist ein Teil der Wellenlinie und bei *a* eine Sekundenmarke aufgeschrieben.

201. Umgekehrt kann man aber, wenn die Schwingungsdauer der Stimmgabel bestimmt ist, die Zeitdifferenz zwischen irgend zwei elektrisch zu markierenden Zeitintervallen finden. Eine klassische Anwendung dieser Methode machte Helmholtz (1852), indem er mit ihr die Zeitdifferenz zwischen dem Momente der elektrischen Muskelreizung und dem Beginn der Kontraktion, die Latenzzeit, die einige Tausendstel Sekunden beträgt, das erstemal bestimmte.

Ebenso kann man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Nerven (beim Menschen 30—120 m/sek) und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Muskel (beim Menschen etwa 10—13 m/sek) bestimmen.

Während die Verwendung graphischer Methoden auf dem Gebiete der Physik mehr zeichnerisch in Theorie und Rechnung (z. B. Fig. 13, 152, 165, 184 usw.) sich ausgestaltet, hat die Physiologie eine Unzahl von diesbezüglichen praktischen Apparaten geschaffen, deren Hauptbestandteil stets die (zuerst von Ludwig verwendete) Registriertrommel oder **Kymographion** (Wellenschreiber) ist. Gedreht werden diese Trommeln durch ein Uhrwerk oder einen kleinen elektrischen Motor.

202. Bei Besprechung der Manometer (§ 149) verwiesen wir auf die in Verbindung mit einer Registriertrommel vielgebrauchte **Marey'sche Kapsel**, die auch bei akustischen Messungen Verwendung findet.

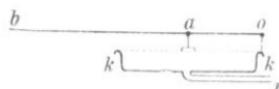


Fig. 129.

Die Schreibkapsel besteht aus einer zylindrischen, kurzen und leeren Metalldose *kk* — etwa in Taschenuhrform und -größe — oben mit einer Kautschukmembran, in Fig. 129 punktiert gezeichnet, geschlossen. Der Hebelschreibstift *oab*, um *o* drehbar, wird bei Luftverdichtung in der Kapsel mit der Spitze hinauf, bei Verdünnung hinuntergehen und dabei auf einer rotierenden Registriertrommel

schreiben. Um nur eine der vielen Verwendungen zu zeigen, sei Fig. 130, der Plethysmograph (Volumschreiber) besprochen. Irgendein Körperglied, hier ein Arm, liegt wasserdicht in der Röhre *R*. Vergrößert sich das Volumen, so wird das Wasser emporgedrückt, die Luft in der Marey'schen Kapsel *M* verdichtet. Diese Druckschreibung vermittelt die Kenntnis der Änderung der einem Organ zu-

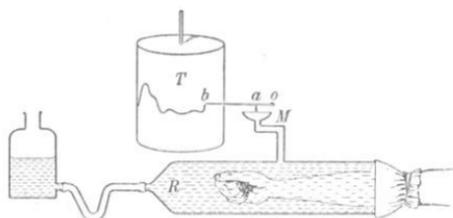


Fig. 130.

fließenden Blutmenge. Die aufgezeichnete auf der Trommel *T* registrierte plethysmographische Kurve läßt die einzelnen Herzschläge deutlich hervortreten. Aus der Schnelligkeit, mit der diese Volumkurve sich ändert, läßt sich die Schnelligkeit des Blutstromes errechnen.

203. Statt der Marey'schen Kapsel verwendete man in vielen Fällen früher, so z. B. zur Untersuchung der Schwingungsform von Sprach- oder Gesangstönen die manometrische **Flammenkapsel von König**. In Fig. 131 ist eine kleine Gaskammer *k* von Leuchtgas durchströmt, das oben in einer kleinen Flamme *F* brennt. Links ist diese Gaskammer durch eine Membrane verschlossen, gegen die man von links her durch einen vorgesetzten Trichter *T* spricht oder singt. Die dadurch in Schwingung versetzte Membran ändert der Schwingungsform entsprechend die Ausströmungs-

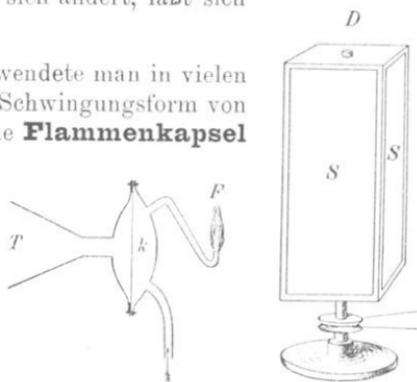


Fig. 131.

geschwindigkeit des Gases und die Flamme ergibt in einem Drehspiegel *D* beobachtet, ganz bestimmte Flammenkurven. *D* besteht aus einem um die Vertikalachse rotierenden vierseitigen Prisma, dessen Seitenflächen mit vier Spiegeln *S* belegt sind. Solange die Flamme ruhig steht, erscheint beim Drehen des Spiegels ein kontinuierliches Lichtband; sowie aber in den Trichter hineingesprochen oder gesungen wird, verwandelt sich dieses in eine wellenförmige Kurve, welche für den betreffenden Ton charakteristisch ist.

204. Eine Anwendung der Registriertrommel bildet auch der **Phonograph**. Beim Phonographen schwingt eine kleine Membran. In der Mitte dieser Membran ist ein kleiner Stift befestigt, der gegen eine mit einer Wachsmischung überzogene und rotierende Trommel (ähnlich mit *T*, Fig. 128) drückt. Spricht oder singt man gegen diese Membran, so gräbt sich die ganze Schwingungsform als Berg und Tal ins Wachs ein. Läßt man dann nach der Aufnahme den Stift nochmals, natürlich in gleicher Richtung, über diese Erhöhungen und Vertiefungen durch Drehen der Trommel schleifen, so schwingt die Membran identisch wie bei der Schallaufnahme und reproduziert akustisch das bei der Aufnahme Hineingesprochene.

Alle die Instrumente, bei denen die Schallwelle größere Massen in Bewegung setzen muß, leiden an einer gewissen Trägheit und werden sehr gestört durch die Resonanz einzelner Teile des schwingenden Systems. Auch stört die Reibung; die Stimmgabel in Fig. 128 schwingt dadurch langsamer; der Schreibhebel in Fig. 130 wird oft durch seine Trägheit über die Endlage hinausgeschleunigt usw. All das fällt fast weg bei den photographischen Methoden (§ 216).

205. Die Untersuchung einer schwingenden Bewegung in rasch intermittierendem Licht heißt **Stroboskopie**. Zu diesem Zweck wird irgendein Lichtstrahl — der Sonne oder einer elektrischen Lampe — zunächst durch eine Linse *L* konzentriert und durch eine gelochte Scheibe (Fig. 132) gesendet. Wird die Scheibe mit z. B. 16 Löchern zehnmal pro sek rotiert, so wird das Licht 160mal pro sek abgeblendet. Denken wir uns nun in *A* eine tönende Stimmgabel mit genau 160 Schwingungen. Sie werde in einem gewissen Momente beleuchtet, z. B. gerade, wenn die beiden Zacken auseinanderstehen. Es fällt immer nur Licht ein, sooft diese Zacken auseinander sind und es wird daher den Anschein haben, als ob die beleuchtete Stimmgabel vollständig in Ruhe wäre. Wenn aber das Tempo der Intermittenz ein wenig von dem der Gabel verschieden ist, so bekommen wir vielleicht die erste Beleuchtung, während die Gabelenden auseinander sind, eine zweite, wenn sie sich ein wenig genähert haben, eine dritte, wenn sie noch näher sind usw. Diese aufeinanderfolgenden Lichtbilder addieren sich auf der

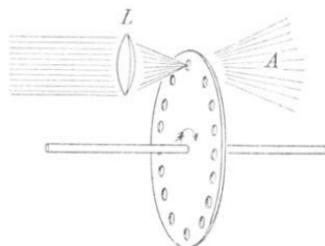


Fig. 132.

Netzhaut des Auges und wir haben die Erscheinung einer ganz langsam schwingenden Stimmgabel. Wir sehen also die natürliche Schwingung, aber in einem um so mehr verlangsamten Tempo, je mehr die Zahl der pro sek passierenden Löcher und der Schwingungszahl der Gabel „unisono“ sind.

Leitet man solches intermittierendes Licht mittels passenden Hohlspiegels, z. B. in die Mundhöhle, so wird man die Schwingung der Stimmbänder in beliebiger Weise scheinbar verlangsamten und bequem studieren können. Es ist selbstverständlich, daß das Gebiet der Anwendung stroboskopischer Methoden ein sehr großes ist.

Alle diese Methoden beruhen auf der Tatsache, daß unser Auge zeitlich rasch aufeinanderfolgende Bildeindrücke zu einer kontinuierlichen Bewegung zusammenfaßt: Kinematograph.

206. Das Zusammenklingen zweier einfacher, gleich starker Töne mit benachbarter Schwingungszahl, z. B. 300 und 301, veranlaßt sog. **Schwebungen**. Man hat die Empfindung, als würde hier der Gesamttöne einmal in der Sekunde in seiner Stärke zu- und abnehmen. Die Anzahl dieser Schwebungen pro sek ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen.

Fig. 133 ist, punktiert gezeichnet, ein Wellenzug, der in z. B. $\frac{1}{10}$ sek 9 Schwingungen ausführt, indes der schwach gezeichnete Wellenzug in derselben Zeit 8 Schwingungen macht. Die Superposition der jeweiligen



Fig. 133.

Amplituden gibt den stark ausgezogenen Wellenzug, der an beiden Enden ein

Maximum und in der Mitte ein Minimum zeigt. Um die Zeichnung auf eine Sekunde zu vergrößern, müssen wir alles mit 10 multiplizieren. Wir hätten dann einen Wellenzug mit 80 und einen mit 90 Schwingungen und wir würden dann 10 Maxima und Minima pro sek hören.

Diese in der Figur dargestellte an- und abschwelende physikalische Stärke löst aber nicht einfach ein An- und Abswellen der Gehörempfindung aus. Die physiologische Erklärung muß, wenn die Helmholtz'sche Resonanztheorie § 221 richtig ist, eine andere sein, weil ja das Ohr jeden Ton für sich allein hört.

Man hat solche Schwebungen bis zu einer Dauer von 3 Minuten gehört, natürlich sehr schwer. Hingegen sind umgekehrt noch Schwebungen von $\frac{1}{20}$ sek recht gut zu hören; man hat hier den Eindruck von raschen Tonstößen.

207. Unter **Klangfarbe** versteht man die Verschiedenheit des akustischen Eindruckes, welchen verschiedene Klänge trotz gleicher Höhe und Stärke je nach ihrem Erreger ausüben; es ist z. B. die Klangfarbe einer Violine oder Trompete oder der menschlichen Stimme usw. eine ganz charakteristische. Physikalisch wird die Klangfarbe bedingt durch die Zahl

und Stärke der Obertöne (§ 184), oder, was dasselbe ist, durch die Schwingungsform.

Um aus einem zusammengesetzten Klange die einzelnen Obertöne zu hören — Klanganalyse —, verwendete Helmholtz die Resonatoren (Fig. 134). Dies sind kugelförmige (auch zylindrische oder konische) Hohlräume; eine kleine Öffnung b ist so ausgestaltet, daß sie ins Ohr paßt, indes die große Öffnung a den Schall aufnimmt. Steckt man so einen Resonator in das eine Ohr, indes das andere geschlossen wird, so hört man von den eindringenden Tönen nur dann etwas, wenn die auf einen bestimmten Ton abgestimmte Luft im Resonator in Schwingungen gerät. Ein ganzer Satz von verschiedenen großen, also verschieden gestimmten Resonatoren gestattet die von irgendeinem Schallerreger ausgehenden Obertöne einzeln herauszufinden, d. h. den Klang zu analysieren. Aber auch ohne Resonator trennt das Ohr die einzelnen Töne eines Klanges; es bedarf hierzu nur einiger Übung.



Fig. 134.

Klänge mit sehr schwachen Obertönen — Stimmgabel, Flöte oder weite gedeckte Orgelpfeifen — klingen weich, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf. Sind hingegen die höheren Obertöne stark, so wird der Klang sehr kräftig durchdringend, z. B. bei Blechinstrumenten.

208. Wenn gleichzeitig zwei Töne, z. B. Grundton und Quint, $2n$ und $3n$, tönen, hört man auch **Kombinationstöne**. Zunächst entsteht ein Differenzton, $3n - 2n = n$, d. i. die tiefere Oktav. Von dieser letzteren kann ein neuer (schwacher) Differenzton mit dem tieferen Primärton entstehen usw. Erhöht man bei zwei unisono schwingenden Tönen den einen allmählich und stetig, so hat man zuerst eine Schwebung, die immer rascher wird und schließlich in einen rauhen tiefen Differenzton übergeht, der dann verhältnismäßig schnell in die Höhe steigt. Solche Erscheinungen treten bei tiefen Tönen sehr schwer auf.

Zwei Primärtöne, z. B. $2n$ und $3n$ liefern vielleicht auch einen Summationston $5n$, der aber sehr schwer zu hören ist. Möglicherweise sind die von manchen Autoren beobachteten Summationstöne nur Differenztöne der Obertöne; in unserem Beispiel z. B. der 5^{ten} Obertöne, denn $5 \cdot 3n - 5 \cdot 2n = 5n$.

209. Eigentümliche physikalische, aber nicht akustische Erscheinungen resultieren durch **Interferenz von senkrecht aufeinanderstehenden Transversalschwingungen**.

Wir wollen nur jenen Fall untersuchen, wo diese zwei Schwingungen unisono sind. Ein kleiner glänzender Metallknopf sitzt (Fig. 135) auf einem genau zylindrischen, unten befestigten Stäbchen. Wenn wir diesen Knopf von rechts nach links schwingen lassen, gibt er eine regelmäßige Sinusschwingung; wir können ihn ebenso (mit gleicher Dauer) von vorn nach rückwärts schwingen

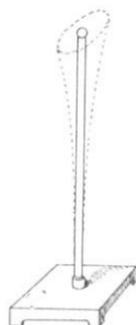


Fig. 135.

lassen. Es entsteht nun die Frage, was geschieht, wenn wir diesem Knopf gleichzeitig zwei Impulse, einen von links nach rechts und einen von vorn nach rückwärts geben. Welches ist von oben gesehen die resultierende Schwingungsform? Die folgende Betrachtung gilt für vertikale Draufsicht auf dieses, Kaleidophon genannte Instrument (Fig. 135).

Die punktierte Linie und punktierten Pfeile (Fig. 136) geben die Schwingungen links rechts; 0, 1, . . . 8 sind die Stellungen des Knopfes nach 0, $\frac{1}{8}$, . . . $\frac{8}{8}$ Schwingungsdauer, wobei 0, 4, 8 im Mittelpunkte (ebenso wie spätere analoge Punkte) wegen Platzmangel nicht eingezeichnet sind. Die schwach gezeichnete vertikale Linie und die Punkte 0, I, . . . VIII ergeben analog die Schwingung aufwärts abwärts. Eine einfache Vektorenaddition (Bewegungsparallelogramm) ergibt für die gleichzeitige Bewegung nach 1 und I den resultierenden Punkt *b*, analog für 2 und II den Punkt *c* usw. Die resultierende, dick gezeichnete Schwingung ist *a, b, . . . h, i*, also geradlinig unter 45° gegen die Schwingungskomponenten geneigt.

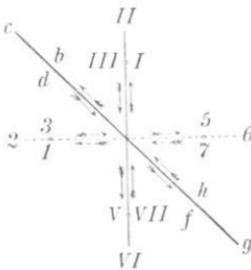


Fig. 136.

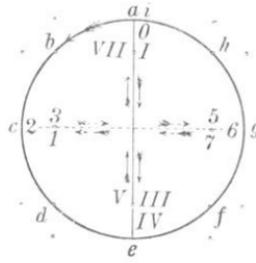


Fig. 137.

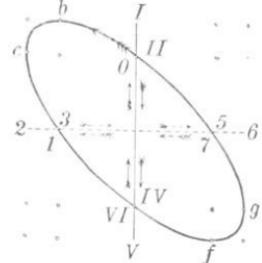


Fig. 138.

In Fig. 137 ist die punktiert gezeichnete Schwingung — links rechts — ungeändert, die dünn gezeichnete Schwingung — aufwärts abwärts — hat aber um $\frac{1}{4}$ der Schwingungsdauer früher begonnen, die Phasendifferenz (§ 174) zwischen der horizontalen und vertikalen Schwingung ist $\frac{1}{2}\pi$. Im Momente, wo die horizontale Schwingung zur Zeit 0 den Ruhezpunkt nach links hin verläßt, geht die vertikale Schwingung, die schon $\frac{2}{8}\tau$ hinter sich hat, von ihrer obersten Stelle gegen unten. Wir müssen also, um gemeinsame Zeit für beide Schwingungen zu haben, für diese Schwingung oben 0 hinschreiben. Die resultierende Bewegung hat analog den früheren Erwägungen den aus 00 resultierenden Punkt *a*, dann *b* aus 1 I, *c* aus 2 II usw. Das Ganze ist eine Kreisbewegung, eine zirkuläre Schwingung *a, b, . . . h, i*. (Wichtig in der Optik § 540.)

In Fig. 138 ist die punktiert gezeichnete Schwingung — links rechts — ungeändert, die dünn gezeichnete Schwingung — aufwärts abwärts — hat aber um $\frac{1}{8}\tau$ früher begonnen; es ist zwischen beiden Schwingungen eine Phasendifferenz von $\frac{1}{8}\tau$ oder $\frac{1}{4}\pi$. Im Momente 0, wo die punktiert gezeichnete Schwingung eben beginnt, hat die vertikale Schwingung schon $\frac{1}{8}$ ihrer Schwingung zurückgelegt, sie ist oben in 0. Wenn die horizontale Schwingung in 1 ist, ist die vertikale ganz oben in I usw. Zur Konstruktion der Resultierenden

haben wir hier: 1 und I gibt b , 2 und II gibt c usw. Die resultierende Schwingung ist eine elliptische a, b, \dots, h, i .

Wenn also das zylindrische Stäbchen in Fig. 135 mit genau gleicher Amplitude zwei aufeinander senkrechte Schwingungen ausführt, so muß es eine der dargestellten Figuren oder eine Zwischenform zeigen. In Wirklichkeit werden die beiden senkrechten Schwingungen (eine Ausnahme bilden



Fig. 139.

die optischen Erscheinungen) nicht absolut unisono sein. Dann verschiebt sich natürlich die Phasendifferenz und es findet ein allmähliches Übergehen der Schwingungsformen nach der in Fig. 139 gezeichneten Reihenfolge statt.

Andere Intervalle geben kompliziertere Kurven, die man in verschiedener Weise objektiv und subjektiv darstellen kann; man nennt diese Kombinationen senkrechter Schwingungen die Lissajou'sche Methode.

210. Helmholtz' Vibrationsmikroskop. Macht man bei einem Mikroskope das Objektiv frei beweglich und befestigt es auf einer vertikal auf- und abschwingenden Zinke einer Stimmgabel, und blickt man dann durch das ganze (horizontale) Mikroskop hindurch auf einen hellen Punkt einer schwingenden, vertikal gespannten Saite, so sieht man diesen horizontal hin und herschwingenden Punkt im Mikroskop auch noch nach auf und abwärts oszillieren. Wir haben also eine ähnliche Art der Kombination von Schwingungen wie gerade früher. Man erblickt eine Art Lissajou'sche Figur, welche entsteht durch Kombination der sinusförmigen, vertikalen (optischen) Schwingung des Punktes und der wirklichen horizontalen Saitenschwingung. Diese Figur, d. h. also die Schwingungsform der Saiten ist abhängig von der Art des Anstreichens oder allgemeiner der Anregung; sie ist sehr komplizierter Natur.

Stimme.

211. Der Stimmapparat des Menschen ist dem höherer Säugetiere in vielen Einzelheiten sehr ähnlich. Das Sprechvermögen des Menschen ist daher nur eine Folge der höheren Gehirn- und Geistesentwicklung.

Der Kehlkopf bildet eine kurze Röhre (Fig. 140 u. 141), die unten durch die Luftröhre Tr mit der Lunge, oben mit der Mundhöhle H (Gaumen G , Zunge Zu , Lippe L , Zähne z) und der Nasenhöhle in Verbindung steht. Der wichtigste Teil des Kehlkopfes besteht aus zwei „Stimmbändern“, der Lage nach so von vorne nach hinten angeordnet, daß sie eine Spalte, die „Stimmritze“ s freilassen. Über den Stimmbändern befinden sich die sog. „falschen Stimmbänder“, welche beim Menschen nur schützend durch Schaffung einer schleimbereitenden Höhlung wirken. In Fig. 142 oben ist der Kehlkopf von oben mit einem Kehlkopfspiegel (§ 443) gesehen dargestellt, bei geschlossenen Stimmritzen, wenn ein Ton hervorgebracht wird, und unten bei ruhiger Atmung ohne Ton. Der Kehlkopf-

kopf ist im ganzen und in seinen Teilen beweglich und (wenigstens für die Brusttöne) eine Art Sphinkter (Verschlußapparat). Unter ihm wird in der Luftröhre die Expirationsluft, in erster Reihe durch die Arbeit der

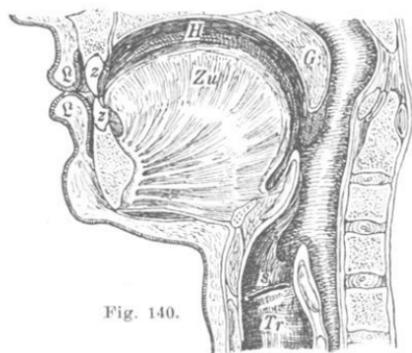


Fig. 140.



Fig. 141.



Fig. 142.

Bauchmuskulatur, komprimiert. Der Luftdruck hinter den Stimmbändern kann beträchtlich, bis zu 1 cm Hg, bei sehr starken Tönen bis zu 3 cm Hg über den äußeren Luftdruck ansteigen.

212. Man kann in verschiedenen sog. „**Stimmregistern**“ sprechen und singen. Neben der Bruststimme gibt es auch eine Falsett- oder Kopfstimme (und das Strohbaßregister). Das Kopfreister ist ärmer an Obertönen als das Brustregister, doch gibt es keine allgemein gültige physikalische Erklärung der Entstehung der Kopfstimme. Die Verschiedenheit der Stimmregister wird aber sowohl von den Singenden als den Hörenden scharf empfunden.

Ein prinzipieller Unterschied zwischen Sprach- und Singstimme existiert nicht, nur daß die Vokalisation (§ 215) bei gleichzeitigem Einhalten einer bestimmten Tonhöhe schwieriger ist.

213. Die **Tonhöhe unserer Stimme** ist abhängig von der gegebenen Länge, Masse und Elastizität der Stimmbänder und von ihrer — innerhalb weiter Grenzen — willkürlich variablen Spannung.

Die Tonhöhen reichen für

Baß	Tenor	Alt	Sopran
80—341	128—512	170—683	256—1024 Schwing. pro sek.

Bei lautem Lesen eines Mannes liegt die Tonhöhe zwischen 100 und 200, in öffentlicher Rede fast immer höher.

Das nicht gedehnte Stimmband des Mannes, 18,2 mm, verhält sich zu dem des Weibes, 12,6 mm, wie etwa 3 : 2. Das Mutieren des Jünglings wird durch rasches Wachstum des Kehlkopfes bedingt.

214. Das **Stimmorgan** ähnelt in manchen Beziehungen einer **Zungenpfeife**. Man kann (Fig. 143) über das passend geformte Ende einer

Röhre ein Kautschukstück *K* so spannen, daß durch den elastischen Kautschuk eben ein schmaler, offener, geradliniger Spalt *s* begrenzt wird. Von unten angeblasen gibt diese Zungenpfeife, „künstliche Stimmritze“ einen Ton; die wirklichen Stimmritzen dürften aber etwas anders funktionieren. Stroboskopische Beobachtungen des Kehlkopfes ermöglichen eine scheinbare Verlangsamung der Schwingung und da sieht man, wie die Stimmritze in der Mitte abwechselnd schwulstig abgerundet sich verschließt und dann bis zu 1,5 mm auseinandergeht. Daraus schließt Musehold (1898), daß die Stimmbänder nicht oder fast nicht nach aufwärts und abwärts, also transversal, sondern hauptsächlich von der Spalte weg nach rechts und links, also longitudinal schwingen. Die Stimmbänder rücken gegeneinander und schließen sich für einige Zeit in jeder Periode vollständig; das geschieht sicher bei den sog. Brusttönen. Dadurch erklärt sich auch der verhältnismäßig geringe Atembedarf bei diesen Tönen. In ähnlicher Weise funktionieren die Lippen bei einem Trompetenmundstück, während die eigentlichen Zungenpfeifen (z. B. Oboe oder Harmonium) ganz anders nach § 192 wirken.



Fig. 143.

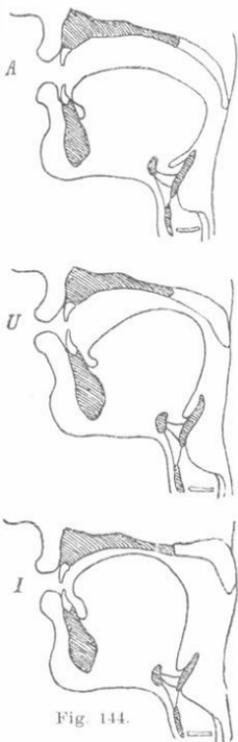


Fig. 144.

Wir sahen bei den Zungenpfeifen, daß die Zungenschwingung durch das Mitschwingen der Luft des Ansatzrohres in ihrer Tonhöhe geändert werden kann. Beim Stimmorgan bringt aber das Ansatzrohr, die Mundhöhle mit ihren Nebenräumen, nur eine kleine Änderung der Tonhöhe mit sich; sie beeinflusst aber die Klangfarbe und vor allem die Möglichkeit der Vokalisation und Lautbildung.

215. Vokalisation. In Fig. 144 ist die Mundstellung für die Aussprache der Vokale *A*, *U* und *I* dargestellt, wobei die Zunge, die Lippe und das Gaumensegel die akustische Ansatzröhre sehr ändern.

Nach der Helmholtz'schen Vokaltheorie (1863) — teilweise schon vorher Graßmann (1853), Donders (1857) und andere — wird der Vokalcharakter nicht durch Klangfarbe, d. h. nicht durch die Obertöne des gesprochenen oder gesungenen Grundtones bestimmt, sondern ist vielmehr gegeben durch das Mittönen von einem oder mehreren ganz bestimmten höheren Tönen, die zum Grundtone in keiner Beziehung stehen. Sie entstehen durch Resonanz der Mundhöhle und ihrer Teile.

Nach Exstirpation des Kehlkopfes kann durch willkürliches Auspressen der Luft aus dem Magen und passende Mundhöhlenstellung eine zwar unschön

klingende, aber doch deutliche Vokalisierung und eine verständliche Sprache erlernt werden.

Dieser Hauptanschauung der Helmholtz'schen Theorie tritt auch L. Hermann bei (seit 1890), der für jeden Vokal charakteristische höhere Töne, sog. Formanten annimmt, die unabhängig vom Grundtone sind, allerdings manchmal zufällig mit einem seiner Obertöne zusammenfallen können. Diese Formanten werden aber nach Hermann durch den in der gesprochenen oder gesungenen Tonhöhe erfolgenden periodischen Verschuß der Stimmritze periodisch beeinflußt. Da dieser zum Grundton meist unharmonische Formantenton bei jeder einzelnen Schwingung des Grundtons immer wieder frisch einsetzt, bleibt die Klang- oder Schwingungskurve immer in derselben Art gestört, also identisch.

216. Um **Stimmkurven** von Vokalen oder Konsonanten zu erhalten, kann man die Eindrücke einer besprochenen oder besungenen Phonographenwalze mikroskopisch untersuchen oder mittels eines Hebelapparates in Vergrößerung aufzeichnen; besser aber läßt man eine zur Vermeidung von Eigenschwingungen stark gedämpfte Membrane, z. B. aus Glimmer oder einer dünnen Korkscheibe, die mit einem kleinen Spiegelchen verbunden ist, frei schwingen. Das Spiegelchen reflektiert einen Lichtstrahl auf eine bewegte photographische Platte. Man erhält dann z. B. bei dem Tone *g* (196 Schwingungen) für die Vokale *A*, *U* und *I* die Kurven in Fig. 145.

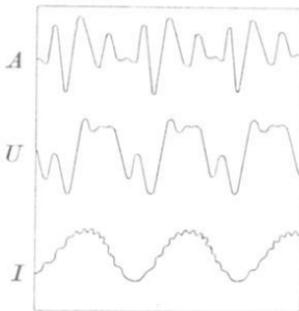


Fig. 145.

Löst man diese komplizierten Schwingungen nach dem Fourier'schen Gesetze (§ 184) in die einzelnen Partialtöne auf, so sind jene ganz außergewöhnlich stärker, in deren Nähe die Formanten schwingen. Das ist eine der Methoden, um Formanten zu finden.

217. Formanten. Die für verschiedene Vokale charakteristischen Formanten sind nach verschiedenen Autoren etwas verschieden, was wohl zum Teil durch die verschiedene Aussprache desselben Vokals bei verschiedenen Personen bedingt ist. Die Formanten sind für den

Vokal	nach Helmholtz	nach Hermann
<i>A</i>	b^2	Mitte der 2. Oktave
<i>E</i>	$f^1 b^3$	Übergang 2. in 3. Oktave
<i>I</i>	$f d^4$	1. Teil der 4. Oktave
<i>O</i>	b^1	1. Teil der 2. Oktave
<i>U</i>	f	1. Teil der 1. u. der 2. Oktave.

Einen wichtigen Beweis für die Richtigkeit der eben gegebenen Anschauung liefert der Phonograph. Dreht man einen solchen bei der Re-

produktion rascher oder langsamer als bei der Aufnahme, so wird natürlich die Tonlage höher oder tiefer, es müssen also auch die Formanten höher oder tiefer werden, was nach der Helmholtz-Hermann'schen Vokaltheorie den Vokalcharakter ändert; das geschieht nun in der Tat.

Gleichwohl sind noch manche Schwierigkeiten. Man kann z. B. den Vokal *U* in Lagen deutlich singen, die über den angegebenen Formanten liegen. Vielleicht ist neben den Formanten auch noch ihr gegenseitiges Intensitätsverhältnis von Einfluß.

218. Viel komplizierter ist die Entstehung der mehr Geräuschen gleichenden **Konsonanten**.

Bei den „Verschlußlauten“ wird an verschiedenen Stellen der Mundhöhle durch Lippen, Zungenspitze oder Zungenrund ein vollständiger Verschluß hergestellt, der durch den Expirationsluftstrom unter besonderem Geräusche durchbrochen wird; z. B. *P* und *B* durch die Lippen, *T* und *D* durch die Zunge, *K* und *G* durch den Gaumen. Die „Reibungslaute“ entstehen durch teilweisen Verschluß und durch die beim Luftdurchströmen erzeugten Geräusche, z. B. *V* und *W* in den Lippen, *S* in der Zunge, *Ch* und *J* im Gaumen. Beim „Zitterlaut“ *R* schwingt die Zunge langsam hin und her usw.

Das Gesamtgebiet der Lautbildung wird von einer eigenen Wissenschaft, der Phonetik, behandelt.

Gehör.

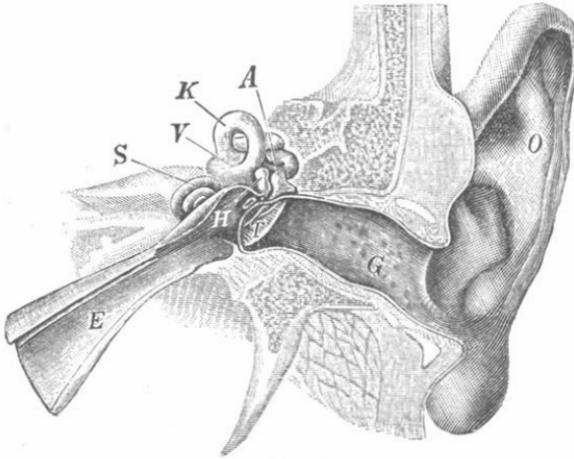
219. Die oft als **Gehörorgane** bezeichneten Apparate **niederer Tiere** sind nur Gleichgewichtsorgane. Bei Insekten sind die Gehörorgane saitenartig an der Körperdecke ausgespannte, mit Nerven und Sinneszellen versehene Organe. Aus dem einfachen Hörbläschen der Wirbellosen wird im Gehörorgane der Wirbeltiere und Säugetiere ein immer komplizierteres Gebilde.

220. Wir wollen hier nur das **Gehörorgan des Menschen** näher betrachten. Dieses (Fig. 146) besteht aus äußerem Ohre, Mittelohr oder Paukenhöhle und innerem Ohre oder Labyrinth.

Das äußere Ohr zerfällt in die Ohrmuschel *O* und den Gehörgang *G*, welcher in der äußeren Hälfte knorpelig und in der inneren knöchern ist. Der Gehörgang dient zum Schutze des Trommelfelles *T*, einer runden, dünnen, elastischen Membrane, die, am Ende des Gehörganges ausgespannt, das äußere Ohr gegen das Mittelohr abgrenzt. Bei Reptilien und Vögeln liegt das Trommelfell oft noch im Niveau der Körperoberfläche.

Das Mittelohr besteht aus der verhältnismäßig kleinen, mit Luft gefüllten Pauken- oder Trommelhöhle, rings von Knochen umgeben, welche außer der mit dem Trommelfell geschlossenen Öffnung, noch einige Kommunikationen freiläßt. Unmittelbar aus dem Vorderteile der Paukenhöhle

vermittelt die „eustachische Röhre“ *E*, die in dem Nasen-Rachenraum endet, die Kommunikation mit der Außenluft, wodurch der Luftdruck auf beiden Seiten von *T* gleich stark wirkt und schädliche Druckdifferenzen vermieden werden. Gegen das innere Ohr sind in der Wand der Paukenhöhle zwei



mit Membranen verschlossene kleine Öffnungen, das runde und ovale Fensterchen. Das Trommelfell ist mit dem ovalen Fensterchen durch eine Kette von drei Gehörknöchelchen in Verbindung, welche in Fig. 147 in ca. dreifacher Vergrößerung dargestellt sind; *H* ist der Hammer, dessen Stiel *h* an das Trommelfell *T* angewachsen ist, *A* der Ambos und *St* der Steigbügel, der im ovalen Fensterchen des

Labyrinthes durch ein Band beweglich befestigt ist. *h* zieht das durch Muskel gespannte Trommelfell *T* nach innen. Dies und die Tatsache, daß das Trommelfell im Verhältnis zu seinem Areal verhältnismäßig wenig Masse hat, läßt das Trommelfell auf Schwingungen verschiedenster Tonhöhe fast mit gleicher Intensität reagieren. Ebenso bewirkt die Kleinheit der Paukenhöhle und des Gehörganges, daß eine Resonanz dieser Hohlräume, also eine Verstärkung bestimmter Töne, nur bei sehr hohen Tönen eintreten kann. Die Schwingungen des Trommelfells werden durch die Hebelwirkungen der Gehörknöchelchen auf das ovale Fensterchen so übertragen, daß die Amplituden des Steigbügels nur $\frac{2}{3}$ der Amplituden des Trommelfelles betragen; darum wird die Druckkraft entsprechend größer.



Der mit dem Trommelfell erfolgende Hin- und Hergang der Gehörknöchelchen bringt die Membran des ovalen Fensterchens und damit den Inhalt des inneren Ohres zum Schwingen. Das äußere und mittlere Ohr besorgen also nur die Schallzuleitung, die aber auch z. B. durch die Knochenmasse des Schädels erfolgen kann.

Der eigentliche Hörapparat liegt im Labyrinth, dessen kompliziertes Knochengerüst *S*, *V*, *K*, das sog. knöcherne Labyrinth, er-

füllt ist vom Labyrinthwasser (Perilymphe). In dieser Flüssigkeit befindet sich ein System membranöser, gleichfalls mit Flüssigkeit (Endolymphe) gefüllter, gegenseitig kommunizierender Räume, die alle Nervenfasern des Gehörsnerven aufnehmen. Das Knochengehäuse des Labyrinthes hat gegen das Mittelohr zwei mit Membranen verschlossene Öffnungen: das ovale Fensterchen im Vorhofe *V* und das unterhalb liegende, runde Fensterchen in der Schnecke *S*. Wäre nur ersteres vorhanden, könnte es wegen Inkompressibilität der Flüssigkeit im Labyrinth nicht schwingen; so aber geht bei jedem Hineingang des ovalen Fensterchens das runde hinaus und umgekehrt. Die Bogengänge *K* sind drei halbzirkelförmige Kanäle, in drei aufeinander ungefähr senkrechten Richtungen angeordnet. Die Bogengänge und die in ihnen enthaltenen Nerven scheinen für unseren Gleichgewichtssinn von Bedeutung zu sein.

Der eigentliche Gehörapparat unseres Ohres ist ein Klanganalysator und liegt in der Schnecke *S*. Es ist dies die Basilarmembran mit den aufsitzenden Corti'schen Organen, welche Tausende von Nervenenden enthält. Die Basilarmembran ist in der Querrichtung stärker gespannt als in der Längsrichtung, gleicht also einer Reihe von parallel gespannten Saiten.

221. Diese Basilarmembran faßt die **Helmholtz'sche Resonanztheorie** als eine Reihe von Resonatoren auf, von welchen immer ein Teil, also einige Radiärfasern auf jede von außen kommende Schwingung resonieren. Dadurch werden von jedem bestimmten Ton bestimmte Nervenendigungen erregt und eine bestimmte psychische Empfindung im Gehirn ermöglicht. So erklärt sich die Fähigkeit unseres Ohres zu einer Klanganalyse, d. i. der Fähigkeit, aus jedem Klanggemisch jeden einzelnen bestimmten Teilton heraushören zu können.

In der Tat wächst die Breite der Basilarmembran; bei Neugeborenen von 0,04 mm in der Nähe des Steigbügels, bis 0,49 mm in der Schneckenkuppe, also im Ganzen um das zwölffache. Es dürften etwa bis 24 000 solcher Radiärfasern in der Basilarmembrane vorhanden sein, was, da die Unterscheidbarkeit sehr hoher Töne im menschlichen Ohre schlecht ist, vollständig ausreicht.

Eine Schwierigkeit ergibt die Kürze dieser Resonatoren, die allerdings in einer Flüssigkeit schwingen, wodurch der Ton erniedrigt wird; ob aber in ausreichender Weise, ist noch nicht entschieden.

Nach Helmholtz schwingt bei jedem Ton eine Zone von gewisser Breite. Beim Zusammenklingen naher Töne ist eine gemeinschaftliche Mittelzone in Schwingung, welche nach § 206 abwechselnd stärker und schwächer mitschwingt, wodurch die Empfindung der Schwebung entsteht.

Eine andere Schwierigkeit für die Helmholtz'sche Resonanztheorie bildet

die Tatsache, daß das Ohr fast gleich hohe Töne auch noch unterscheiden kann, wenn sie — z. B. in einem Triller — zeitlich rasch aufeinanderfolgen. Ersteres verlangt geringe, letzteres starke Dämpfung (M. Wien, 1908).

Die Kombinationstöne hingegen entstehen objektiv, physikalisch, im Mittelrohr durch entsprechende Schwingung des Trommelfelles, oder, wenn dieses fehlt, des ovalen Fensterchens.

222. Konsonanz und Dissonanz. Die Dissonanz zweier Töne ist nach Helmholtz eine intermittierende Tonempfindung. Konsonanz haben wir dann, wenn nirgends Grundton und Obertöne, eventuell auch Kombinationstöne durch gegenseitige Schwebungen den glatten Fluß des Klangeindruckes stören. Bei Grundton und Oktav, bei Grundton und Quint, fallen die Obertöne sehr genau zusammen; diese Töne bilden die besten Konsonanzen. In folgender Tabelle sind für einige konsonierende Intervalle die Obertöne aufgeschrieben; die gemeinsamen Obertöne sind fett gedruckt:

Grundton 1	}	{	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Oktave 2	}	{	2	4	6	8	10					
<hr/>												
Grundton 2	}	{	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Quint 3	}	{	3	6	9	12	15	18				
<hr/>												
Grundton 3	}	{	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Quart 4	}	{	4	8	12	16	20	24	28			

Stellt man solche Tabellen für verschiedene Intervalle zusammen, so ergibt sich, daß die Konsonanz umso reiner ist, je zahlreicher die gemeinsamen Obertöne sind. In höheren Tönen werden gleichsam die Elemente des tieferen wiederholt. Nach dieser Theorie von Helmholtz ist die Konsonanz von der Stärke der Obertöne, also von der Klangfarbe abhängig, was aber musikalischen Erfahrungen widerspricht. Aus diesen und den schon erwähnten Gründen wurden an der Helmholtz'schen Resonanztheorie vielfach Änderungen vorgenommen; es sind auch andere Theorien aufgestellt worden. Trotzdem dürfte aber zurzeit die Helmholtz'sche Resonanztheorie immer noch im Wesen zu Recht bestehen.