

was nicht mehr gezeichnet ist, die Bewegung des Wellenbauches nach unten vor sich gehen. Immer also schwingen nur die Bäuche, die Knoten bleiben in Ruhe. Was für Seilwellen gilt, ist bei allen andern Wellen (einschließlich der longitudinalen) auch der Fall. Diese Verhältnisse lassen auch eine Umkehrung zu: wenn irgendwelche Stellen oszillierender Körper am Schwingen gehindert werden, so bilden sich daselbst Knotenpunkte.

Akustik.

§ 66. **Definition.** Akustik¹ ist die Lehre vom Schall. Unter Schall versteht man alle Schwingungen von Körpern, die durch Vermittlung der Luft oder eines anderen Mediums von dem Gehörorgan wahrgenommen werden. Sind die Schwingungen ungleich und unregelmäßig, so entsteht ein Geräusch (z. B. Knall, Krach usw.); sind sie gleich und regelmäßig, so entsteht ein Ton.

§ 67. **Töne** sind charakterisiert durch ihre Höhe, Intensität und Klangfarbe.

1) Die Höhe eines Tones hängt von der Anzahl der Schwingungen der Tonquelle ab. Je größer die Schwingungszahl ist, desto höher ist der Ton. Hält man z. B. ein Kartenblatt gegen ein rotierendes Zahnrad, so entsteht ein Ton, der um so höher ist, je schneller sich das Rad dreht, d. h. je mehr Stöße in der umgebenden Luft entstehen.

Die Schwingungszahl findet man z. B. mittels der Sirene² von CAGNIARD DE LA TOUR. Durch Rohr *B* (Fig. 60) kommt aus einem Blasebalg Luft in die Trommel *T*, deren Deckel einen oder mehrere Kreise von schräg gebohrten Löchern enthält. Auf diese Löcher passen genau Löcher der beweglichen Scheibe

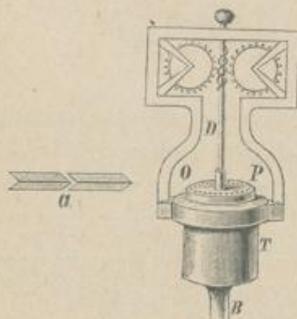


Fig. 60.

OP, die aber in entgegengesetzter Richtung schief gebohrt sind. Diese Anordnung erhält aus Fig. 56 *a* und ist der Grund, daß sich die Scheibe *OP* beim Anblasen der Sirene nach dem Prinzip des SEGNERschen Wasserrades drehen muß. Mit der Scheibe dreht sich aber zugleich die Achse *D*, die oben eine Schraube trägt. Durch diese wird die Bewegung auf Zahnräder übertragen und schließlich durch ein Uhrwerk registriert. Durch die Drehung wird bewirkt, daß die Luft stoßweise durchtritt, nämlich immer nur, wenn die Löcher der Scheibe über denen des Deckels sind. Es entstehen also Stöße in der umgebenden Luft, und zwar während einer Umdrehung so viel, wie Löcher vorhanden sind.

¹ ἀκουστική das Gehör betreffend. — ² nach den Sirenen der griechischen Sage, welche durch ihren Gesang vorbeifahrende Schiffer anlockten.

Die Anzahl der Löcher multipliziert mit der Zahl der Umdrehungen in 1 Sekunde ergibt daher die Schwingungszahl. Die Schwingungszahl einer beliebigen Tonquelle findet man, indem man die Sirene so anbläst, daß sie denselben Ton gibt.

Vibrograph nennt man eine Vorrichtung, bei der der tönende Körper, z. B. eine Stimmgabel, durch eine an ihm befestigte Feder seine Schwingungen selbsttätig auf einen beruhten Zylinder aufschreibt, der sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit senkrecht zur Schwingungsrichtung vorbeidreht. Aus der entstehenden Wellenlinie ergibt sich, wenn zugleich die Zeit markiert wird, sofort die Schwingungszahl.

2) Die Intensität (Stärke) eines Tones hängt ab von der kinetischen Energie, mit der die Enden der Hörnerven getroffen werden. Sie ist also proportional dem Quadrate der Schwingungsgeschwindigkeit, bzw. dem Quadrate der Amplitude. Ferner ist die Intensität umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung von der Schallquelle [vgl. § 56]. Dies gilt natürlich nur, wenn sich der Schall allseitig ausbreiten kann. In Röhren z. B. ist die Intensität viel größer; darauf beruht ja das Sprach- und Hörrohr. Ebenso wird der Schall längs eines ausgespannten Drahtes oder Fadens weiter übertragen als durch die Luft („Fadentelephon“). Auch die Dichte des Mediums, in dem der Schall entsteht resp. sich fortpflanzt, beeinflußt seine Stärke. Im Vakuum wird überhaupt kein Ton gehört, und Schüsse auf hohen Bergen klingen nur schwach.

3) Die Klangfarbe verleiht dem Tone die Individualität. Durch sie wird erkannt, von welchem Instrumente ein gleichhoher Ton stammt. Nach HELMHOLTZ beruht sie darauf, daß ein Ton gewöhnlich nicht isoliert erklingt, sondern zusammen mit verschiedenen seiner Obertöne [§ 68], wodurch eben nach dem Gesetz der Superposition der eigentümliche Klang entsteht, graphisch dargestellt durch die Form der Wellenlinie.

Beim Phonographen von EDISON wird eine feste Reproduktion der Schwingungsform des Klanges dadurch erzielt, daß in der Mitte einer dünnen Membran, die durch die menschliche Stimme oder eine andere Tonquelle in Schwingungen versetzt wird, ein harter Stift befestigt ist, der diese Schwingungen auf eine sich vorüber bewegende Wachswalze eingräbt. Dreht man dann die beschriebene Wachswalze wieder an dem Stift vorbei, so gerät dieser und die Membran in entsprechende Schwingungen, so daß die vorher in den Apparat gesprochenen Töne jetzt reproduziert werden. — Ähnlich ist das Grammophon von BERLINER, bei dem die Schallwellen auf eine Metallplatte aufgezeichnet werden. Die so erhaltenen spiralförmigen Wellenlinien werden dann eingätzt. Solche Platten können beliebig vervielfältigt werden.

§ 68. **Tonverhältnisse.** Das menschliche Ohr kann Töne wahrnehmen, deren Schwingungszahlen zwischen 16 und 20000 liegen. Musikalisch verwendbar sind aber nur solche mit Schwingungszahlen zwischen 40 und 5000. Indes werden nicht sämtliche Töne innerhalb dieser Grenzen benutzt, sondern es wird unter ihnen eine Auswahl getroffen, die von den Intervallen abhängt.

Unter Intervall zweier Töne versteht man den Unterschied in ihrer Höhe, ausgedrückt durch das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen. Die einfachsten Intervalle sind die zwischen einem (beliebigen) Grundton und seinen harmonischen Obertönen, deren Schwingungszahlen nämlich 2, 3, 4 usw. mal so groß wie die des Grundtons sind. Harmonisch heißen diese Obertöne, da ihr Zusammenklingen mit dem Grundton angenehm wirkt [vgl. § 75]. Verhalten sich die Schwingungszahlen wie 2:1, so heißt das Intervall Oktave. Die Oktave eines Tones von 3000 Schwingungen ist demnach ein Ton von 6000 Schwingungen. Teilt man nun eine Oktave in 8 Intervalle von möglichst einfachen Zahlenverhältnissen, so erhält man die diatonische¹ Tonleiter:

Prime	Sekunde	Terz	Quarte	Quinte	Sexte	Septime	Oktave
1:1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1

Je einfacher nun das Verhältnis der Schwingungszahlen ist, desto angenehmer klingt ein Akkord. Am angenehmsten klingt also Grundton mit Oktave (1:2). Der zweite Oberton steht zum Grundton im Verhältnis 3:1, anders geschrieben $\frac{3}{2} \cdot 2:1$; er ist also die Quinte der ersten Oktave; der dritte Oberton (4:1) ist die zweite Oktave; der vierte Oberton (5:1 resp. $\frac{5}{4} \cdot 4:1$) ist die Terz der zweiten Oktave usw. Dem entspricht, daß nächst der Oktave die Quinte und Terz mit dem Grundton zusammen am besten klingen. Wie leicht auszurechnen, sind die einzelnen Intervalle der diatonischen Tonleiter ungleich. Hauptsächlich kommt das Intervall $\frac{9}{8}$ und $\frac{16}{15}$ vor; ersteres heißt ein ganzer Ton, letzteres ein halber. Um nun jeden beliebigen Ton als Grundton verwerten zu können, schaltete man zwischen die ganzen Töne noch halbe ein. So entstand die chromatische Tonleiter, die vom Grundton bis zur Quinte 7, bis zur Oktave 12 halbe Töne enthält. Wie eine einfache Rechnung lehrt, kann sie aber nie ganz rein sein. Bei der chromatischen Tonleiter, z. B. auf dem Klavier, kommt man nämlich durch 12 Quinten auf die siebente Oktave. In Wahrheit beträgt nun das Intervall von 7 Oktaven $2^7 = 128$, das Intervall von 12 Quinten $(\frac{3}{2})^{12} = 129,74$. Es ist also eine Differenz vorhanden. Wenn die Oktaven ganz rein sind, müssen die Quinten



Fig. 61.

unrein sein, und umgekehrt. Derartige Widersprüche gibt es bei der chromatischen Tonleiter noch mehr. Zu ihrer Beseitigung müßte sie mehr als 12 Töne enthalten. Da dies für gewöhnlich nicht angeht, korrigiert man den Fehler durch Änderung der Intervalle innerhalb einer Oktave und nennt dies Temperatur². Die Temperatur ist gleichschwebend, wenn die Oktaven selbst

¹ *διὰ τὸν ὅλον γένος* hieß die einfachste Aufeinanderfolge der Töne in der Tonleiter. — ² *tempero*, mischen, ordnen.

alle rein sind und der Fehler gleichmäßig auf alle zwischenliegenden Töne verteilt ist, so daß nun alle genau dasselbe Intervall haben. Dieses ist leicht aus der Gleichung $x^{12} = 2$ zu finden, da ja das Intervall x , 12mal mit sich selbst multipliziert, die Oktave ergeben muß. Also $x = \sqrt[12]{2}$. Eine nähere Betrachtung zeigt, daß die temperierten Intervalle nur wenig von den reinen differieren. Als Grundton der Stimmung wird das eingestrichene a (Fig. 61), der sog. Kammerton, benutzt, dessen Schwingungszahl nach internationaler Abmachung 435 beträgt.

§ 69. **Entstehung der Töne.** Als Tonquellen dienen Körper, die leicht in Schwingungen versetzt werden können, also besonders feste und luftförmige. Die Schwingungen können sowohl transversale wie longitudinale sein, stets aber werden sie an den Grenzen des Körpers reflektiert, so daß sich stehende Schwingungen (§ 65) bilden. Töne entstehen also durch stehende Schwingungen geeigneter Körper. Die Knotenpunkte sind immer an den Stellen, die am Schwingen verhindert sind, also z. B. immer an den Enden der Körper, wenn diese befestigt sind. Ein Körper kann nun in verschiedener Weise schwingen, so daß die Zahl der Knotenpunkte variabel ist; schwingt er so, daß die Zahl der stehenden Schwingungen möglichst gering, die Schwingungsdauer der einzelnen Teilchen also möglichst groß ist, so entsteht sein Grundton.

Auf Saiten werden Töne meist durch transversale Schwingungen erzeugt, die man durch Streichen mit einem Bogen, Zupfen, Anschlagen mit einem Hammer usw. hervorruft. Zum Studium der Tonverhältnisse hierbei dient das Monochord, eine über einem Kasten durch Gewichte ausgespannte Saite, bei der durch einen beweglichen Steg die Länge des schwingenden Teils beliebig verändert werden kann. So fand man, daß die Schwingungszahl einer Saite, mit anderen Worten die Tonhöhe, umgekehrt proportional ihrer Länge und Dicke, dagegen proportional der Quadratwurzel der Spannung ist. Eine Saite kann aber nicht nur als Ganzes

schwingen, sondern auch in aliquoten Teilen. Stellt man z. B. in der Mitte einen Knotenpunkt durch Aufsetzen des Fingers her, so entstehen 2 Bäuche (Fig. 62), deren jeder nach



Fig. 62.

obigem Gesetz doppelt soviel Schwingungen macht, wie die ganze Saite; es entsteht also die Oktave des Grundtons. Schwingt die Saite mit drei Bäuchen, so entsteht der dritte Oberton usw. Die Knotenpunkte weist man durch Papierreiterchen nach, die nämlich an allen andern Stellen der Saite heruntergeschleudert werden.

Elastische Stäbe werden durch transversale (seltener longitudinale) Schwingungen zum Tönen gebracht. Am wichtigsten ist

die Stimmgabel, ein U förmig gebogener Stahlstab mit zwei parallelen Schenkeln (Zinken). Am einfachsten schwingt sie mit zwei Knotenpunkten, die dicht aneinander liegen, und zwar so, daß beide Zinken zusammen entweder nach innen oder nach außen schwingen (Fig. 63).



Fig. 63.

Auch Platten, Glocken und gespannte Membranen können durch (transversale) Schwingungen Töne geben. Hier sind die verschiedenen Knotenpunkte zu Knotenlinien verbunden. Bestreut man daher Platten mit einem feinen Pulver, so bleibt es nur an den nicht schwingenden Stellen, den Knotenlinien, liegen, und es entstehen die CHLADNISCHEN Klangfiguren.

Vielfach werden auch Luftsäulen als Tonquellen benutzt, die in stehende longitudinale Schwingungen versetzt werden. Bei den Pfeifen geschieht dies durch Anblasen.

a) Bei den Lippenpfeifen (Fig. 64), zu denen die Querpfeifen und meisten Orgelpfeifen gehören, dringt die durch *c* eingeblasene Luft durch einen schmalen Spalt *a* und stößt dann auf eine scharfe Kante, die „Lippe“, *b*; ein Teil von ihr geht nach dem Pfeifenrohr *p* und wird hier am oberen Ende reflektiert, so daß eben stehende Longitudinalwellen (Verdichtungen und Verdünnungen) und somit Töne entstehen [vgl. § 70]. Dasjenige Ende einer Pfeife, an dem sie angeblasen wird, ist natürlich immer offen. Je nachdem auch das andere Ende offen oder geschlossen ist, spricht man von offenen und gedeckten (gedackten) Pfeifen. Auch bei offenen Pfeifen kommt es am oberen Ende zu einer Reflexion, somit zur Bildung stehender Wellen, da zwischen der Luft in der Pfeife und der freien Luft ein Dichtigkeitsunterschied vorhanden ist [§ 63]. Die Tonhöhe ist der Länge der Pfeifen umgekehrt proportional. Da nun an dem verschlossenen Ende einer Röhre stets ein Knotenpunkt [§ 69], am offenen Ende ein Schwingungsbauch sein muß, hat bei der einfachsten Schwingungsart eine offene Pfeife in der Mitte einen Knoten, eine gedeckte Pfeife am geschlossenen Ende einen Knoten, am offenen einen Bauch. Man kann sich also eine offene Pfeife aus zwei gedeckten Pfeifen von der halben Länge zusammengesetzt denken (Fig. 65). Eine gedeckte Pfeife, die denselben Grundton



Fig. 64.

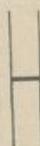


Fig. 65. (d. h. den bei einfachster Schwingungsart entstehenden tiefsten Ton) geben soll wie eine offene Pfeife, muß halb so lang sein wie diese; oder anders ausgedrückt, der tiefste Ton einer offenen Pfeife ist die Oktave des Grundtons einer ebenso langen gedeckten Pfeife. Durch stärkeres Anblasen geben Pfeifen auch die

Obertöne des Grundtons an, und zwar die offenen alle, die gedeckten nur die ungeraden Obertöne.

b) Die Zungenpfeifen besitzen statt der Lippe ein federndes Blättchen, die „Zunge“ (z, Fig. 66), meist aus Metall. Die bei c eingeblasene Luft gelangt hier in Richtung der Pfeile durch den engen Spalt neben dieser Zunge ins Zungenrohr r, dann ins Pfeifenrohr p. Hierdurch gerät die Zunge in periodische Schwingungen, welche die Luftsäule in der Pfeife zum Mittönen veranlassen [§ 70]. Außer diesen federnden Metallzungen gibt es auch membranöse Zungen, bei denen zwei membranöse Platten einen zwischen ihnen befindlichen schmalen Spalt durch ihre Schwingungen abwechselnd öffnen und schließen. Hierzu gehören z. B. die Stimmbänder des Kehlkopfes; aber auch die Lippen des Mundes können so wirken, wenn man sie fest schließt und dann Luft durchpreßt (beim Blasen von Trompeten, Posaunen usw.).



Fig. 66.

Man kann auch die Luft in einer offenen Röhre zum Tönen bringen, wenn man die Röhre über eine Flamme, am besten von Wasserstoff, hält (sog. singende Flammen oder chemische Harmonika) [vgl. § 70]. Hierbei sei bemerkt, daß Flammen ein feines Reagens auf Schallschwingungen sind. Besonders wenn sie unter Druck stehen, (z. B. Gasflammen), hüpfen sie, wenn (hohe) Töne und Geräusche in der Nähe erklingen (sensible Flammen).

§ 70. **Mittönen und Resonanz.** Bringt man in die Nähe einer tönenden Stimmgabel eine ruhende, die auf denselben Ton abgestimmt ist, so ertönt auch diese, selbst nachdem die erste aufgehört hat. Ebenso erklingt, wenn man gegen die Tasten eines Klaviers singt, der betreffende Ton spontan mit. Dieses Mittönen, auch auswählende Resonanz¹ genannt, ist eine Eigenschaft aller tönenden Körper und beruht darauf, daß ihre Moleküle durch diejenige Art der Bewegung am leichtesten zur Mitbewegung veranlaßt werden, die bei ihnen gewissermaßen präformiert ist. Um einen Vergleich zu gebrauchen, so kann auch ein Knabe schwere Kirchenglocken in Gang bringen, wenn er an dem Stricke immer in der Richtung zieht, welche die Glocke schon von selbst einzuschlagen im Begriff ist [vgl. auch § 213]. Auf diesem Prinzip des Mittönens beruhen auch die Pfeifen und singenden Flammen. An der Lippe und Zunge der Pfeifen nämlich, sowie durch das Flackern der Flamme entstehen eine große Zahl unregelmäßiger



Fig. 67.

¹ *resono* wiedertönen.

Schwingungen, also ein Gemisch von Tönen, von denen aber nur ganz bestimmte die Luftsäule in den Röhren zum Mittönen bringen. Daraus geht auch hervor, daß die Länge dieser Luftsäule bei Pfeifen und singenden Flammen einen großen Einfluß auf die Tonhöhe hat. Auf dem Mittönen beruhen ferner die Resonatoren, kugelförmige Hohlapparate mit einer weiteren und einer engeren Öffnung (Fig. 67); letztere wird ins Ohr gesteckt. Sie sind auf einen gewissen Ton abgestimmt und dienen dazu, ihn aus einer Tongemenge herauszufinden, da sie ja nur diesen einen verstärken. Auf diese Weise wies z. B. HELMHOLTZ nach, daß die verschiedenartige Klangfarbe der Musikinstrumente durch bestimmte Obertöne bedingt ist. Verwandt mit dem Mittönen, wenn auch nicht ganz identisch, ist die allgemeine Resonanz. Man versteht darunter die Verstärkung jedes beliebigen Tones. Da z. B. Saiten, Stäbe usw. eine zu geringe Luftmenge in Bewegung setzen, geben sie nur schwache Töne von sich. Um diese zu verstärken, setzt man sie auf sogenannte Resonanzböden, entweder Holzplatten oder Holzkästen usw., die durch ihr Mitschwingen mehr Luftteilchen in Schwingungen versetzen.

§ 71. **Fortpflanzung des Schalls.** Der Schall pflanzt sich ausschließlich durch longitudinale Wellen fort [vgl. § 69]. Von der Schallquelle aus gehen also abwechselnd Verdichtungs- und Verdünnungswellen in das umgebende Medium hinein. Die Träger dieser Wellen sind beim Schall materielle Moleküle (im Gegensatz zum Lichte). Bringt man daher ein Läutwerk unter eine Luftpumpe, so hört man es immer leiser, je mehr die Luft verdünnt wird, bis es schließlich ganz verstummt. Der Schall pflanzt sich nicht nur durch luftförmige, sondern auch durch flüssige u. feste Medien fort, ja sogar noch schneller als durch Luft. Diese Tatsache scheint gegen die NEWTONSche Formel

$v = \sqrt{\frac{e}{d}}$ [§ 61] zu verstoßen. Der Widerspruch ist aber nur schein-

bar, denn die größere Fortpflanzungsgeschwindigkeit in festen und flüssigen Körpern beruht nicht auf deren größerer Dichte, sondern auf ihrer erhöhten Elastizität. Aus der NEWTONSchen Formel ergibt sich durch Rechnung die Schallgeschwindigkeit in Luft zu ca. 280 m in der Sekunde, während experimentell stets höhere Werte gefunden wurden. Es wurde z. B. die Zeit gemessen, die zwischen dem Aufleuchten und der Wahrnehmung des Schalles eines in bekannter Entfernung abgefeuerten Geschützes verstrich. Daraus fand man eine Schallgeschwindigkeit von 330—335 m in der Sekunde. Erst LAPLACE erkannte den Fehler in der obigen Formel und zeigte, daß man sie mit einem bestimmten Faktor, nämlich \sqrt{k} , multiplizieren muß [vgl. § 102].

§ 72. **Schallgeschwindigkeit und Wellenlänge.** Da die Schallfortpflanzung auf Wellenbewegung beruht, gilt auch hier die Formel

$v = n\lambda$ [§ 61]. Da nun v für die meisten Medien experimentell festgestellt ist, n sich leicht durch die Sirene, den Vibrographen usw. finden läßt [§ 67], so kann man daraus die Wellenlänge λ berechnen. Diese kann aber auch direkt durch die KUNDTschen Staubfiguren gefunden werden.

Man legt ein Glasrohr (ab Fig. 68) wagerecht auf einen Tisch, das auf der einen Seite durch den verschiebbaren Stempel s luftdicht abgeschlossen ist. In das offene Ende ragt ein in der Mitte (bei m) festgeklemmter Stab aus Glas oder Metall usw. hinein, der eine kleine leichte Korkscheibe k trägt. Reibt man nun die äußere Hälfte des Stabes mit einem nassen Korke oder Tuch, so gerät er in Längsschwingungen, wobei die festgeklemmte Mitte ein Knotenpunkt ist, während die Enden Bäuche sind. Diese Erschütterungen werden durch die Korkscheibe auf die Luftsäule im Glasrohr übertragen, und sie gerät ebenfalls in stehende Schwingungen, wenn einer ihrer Obertöne mit dem Stabton übereinstimmt. Man erreicht dies durch passende Stellung des Stempels s , worauf der vom Glasstab ausgehende Ton erheblich verstärkt wird. Befindet sich nun im Glasrohr ab ein leichtes Pulver (Bärlappsamen usw.), so sammelt sich dies dabei hauptsächlich in den Knotenpunkten an, in denen

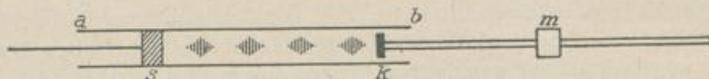


Fig. 68.

ja keine Bewegung der Luft stattfindet. Die Entfernung zwischen zwei benachbarten Knoten, die leicht gemessen werden kann, entspricht einer halben Wellenlänge des Tons in Luft. Da auch die Länge des Stabes einer halben Wellenlänge des Tons in dieser Substanz entspricht, die Schwingungszahl für Luft und Stab dieselbe ist, so ergibt sich aus den Formeln $v = n\lambda$ und $v_1 = n\lambda_1$ das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Schalls in Luft und in der festen Substanz. Ersetzt man Luft durch ein anderes Gas, so wird die Wellenlänge eine andere und man erhält so das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten für Luft und dieses Gas. Da die Schallgeschwindigkeit in Luft bekannt ist, kann man so die Schallgeschwindigkeit in Gasen und festen Körpern leicht finden. Man kann auf diesem Wege, also durch direkte Messung der Wellenlänge, aber auch die Gasdichten berechnen. Es ist nämlich nach § 71 die Schallgeschwindigkeit in Luft $v = \sqrt{\frac{e}{d}} \cdot k$, die in einem anderen Gase $v_1 = \sqrt{\frac{e}{d_1}} \cdot k$, da nach dem BOYLE-MARIOTTEschen Gesetze der Elastizitätsmodul für alle Gase gleich ist. Somit ist $v:v_1 = \lambda:\lambda_1 = \sqrt{\frac{1}{d}} : \sqrt{\frac{1}{d_1}}$. Endlich ergeben sich auch Beziehungen zu den Molekulargewichten der Gase, die ja den Dichten proportional sind [§ 94]. Es ist also auch $\lambda:\lambda_1 = \sqrt{\frac{1}{M}} : \sqrt{\frac{1}{M_1}}$.

§ 73. **Reflexion des Schalls.** Treffen die Schallwellen auf ein Hindernis, z. B. eine feste Wand, so werden sie zurückgeworfen. Unter günstigen Bedingungen kann man den reflektierten Ton deutlich gesondert hören (Echo); die Wand muß dazu mindestens 16 m entfernt sein, da sonst nur ein diffuser Nachhall entsteht. Aus der Zeit,

in der das Echo erfolgt, läßt sich leicht die Entfernung jenes Hindernisses annähernd berechnen, da ja der Schall in einer Sekunde ca. 330 m zurücklegt. Für die Reflexion und Refraktion des Schalles gelten dieselben Gesetze wie beim Lichte.

§ 74. **Interferenz des Schalls.** Daß es sich bei der Schallfortpflanzung wirklich um Wellenbewegung handelt, geht daraus hervor, daß unter Umständen Schall plus Schall eine Abschwächung ergibt.

Dies ist mit dem geistreichen Apparat von QUINCKE (Fig. 69) leicht nachzuweisen.

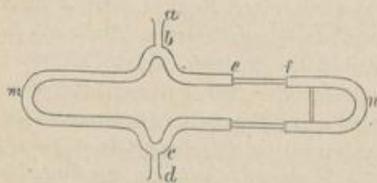


Fig. 69.

Die Röhre *ab* teilt sich bei *b* in zwei Schenkel, die über *m* und *n* nach *c* gehen und dort in einem gemeinsamen Rohr *cd* münden. Die Länge des rechten Schenkels kann wie bei einer Zugposaune verändert werden, so daß, wenn an *a*

eine Tonquelle gehalten wird, der Schall auf jeder Seite einen ungleichen Weg zurücklegt. Entspricht diese Differenz einer geraden Zahl von halben Wellenlängen, so hört das Ohr in *d* die Töne laut; leise dagegen bei einer Differenz von einer ungeraden Zahl von halben Wellenlängen [vgl. § 64].

§ 75. **Konsonanz und Dissonanz.** Wirkt das Zusammenklingen von zwei oder mehreren Tönen angenehm, so heißt dies Konsonanz, das Gegenteil Dissonanz. Schon früher wußte man, daß zwei Töne um so angenehmer zusammen klingen, je einfacher das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen ist; die richtige Erklärung dafür gab aber erst HELMHOLTZ. Zwei Stimmgabeln von genau derselben Schwingungszahl geben einen einzigen stets gleich lauten Ton. Macht aber z. B. die eine in der Sekunde 300 Schwingungen, die andere 301, so muß eine gegenseitige Phasenverschiebung stattfinden, und nach $\frac{1}{2}$ Sekunde wird die von der zweiten ausgehenden Wellenbewegung genau

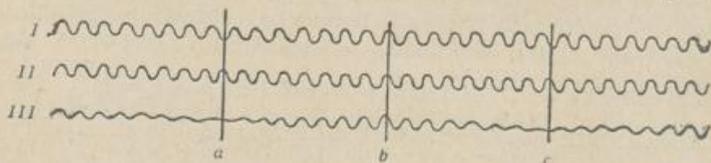


Fig. 70.

um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge mit der ersten differieren, d. h. direkt entgegengesetzte Phase haben. Daher wird der Ton durch Interferenz schwächer werden, um allmählich wieder die frühere Stärke zu erlangen. Figur 70 veranschaulicht diese Verhältnisse; es bedeuten darin I und II die Kurven zweier einfachen Töne von 15 bzw. 16 Schwingungen in der Sekunde, III die resultierende Schwingungskurve, die bei *b* ihr Maximum, bei *a* und *c* ihre Minima hat, während dazwischen allmähliche

Übergänge stattfinden. Dieses Schwächer- und Stärkerwerden beim Zusammenklingen zweier Töne nennt man Schwebungen oder Stöße; ihre Zahl ist immer gleich der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne. Mehr als zwölf Schwebungen in der Sekunde werden nicht mehr einzeln wahrgenommen, sie bedingen dann die Rauigkeit des Akkords. Am unangenehmsten werden 33 Schwebungen in der Sekunde empfunden; darüber hinaus werden sie allmählich nicht mehr wahrgenommen. Eine einfache Rechnung zeigt, daß in der Tat bei den harmonisch klingenden Intervallen die Schwebungen stets weit von dieser Grenze entfernt bleiben.

Auf diese Schwebungen wurden früher auch die Differenz- oder TARTINI-schen Töne zurückgeführt, deren Schwingungszahl ebenfalls gleich der Differenz der Schwingungszahlen der zwei ursprünglichen Töne ist. Nach HELMHOLTZ ist dies aber nicht richtig, schon deshalb nicht, weil es daneben auch Summationstöne gibt.

Man kann die Konsonanzen und Dissonanzen mittels der sog. LISSAJOUS-schen Klangfiguren auch sichtbar machen. Stellt man nämlich zwei senkrecht zueinander schwingende Stimmgabeln, die beide an einer ihrer Zinken einen kleinen Spiegel tragen, so auf, daß ein Lichtstrahl von dem ersten Spiegel auf den zweiten und von dort auf einen Schirm reflektiert wird, so entstehen bestimmte Lichtfiguren. Schwingt nämlich nur eine Stimmgabel, so entsteht eine leuchtende gerade Linie; schwingen beide, so entsteht bei Gleichheit des Tons je nach der Phasendifferenz entweder eine gerade Linie oder ein Kreis oder eine Ellipse [vgl. § 146]. Sind dagegen die Stimmgabeln etwas verstimmt, so gehen diese Figuren wegen der nun wechselnden Phasendifferenz ineinander über. In gleicher Weise haben auch die anderen Konsonanzen charakteristische einfache Lichtfiguren, die bei Verstimmung der Stimmgabeln einen Wechsel zeigen.

§ 76. **Dopplers Prinzip.** Wenn die Entfernung zwischen einer Tonquelle und einem Beobachter rasch kleiner wird, so wird der Ton der ersteren höher. Dies ist leicht zu konstatieren bei dem Pfeifen einer sich nähernden Lokomotive. Von einer ruhenden Tonquelle aus gelangen nämlich in einer Sekunde eine bestimmte Zahl von Schallwellen ins Ohr des Beobachters; nähert sich aber die Tonquelle in einer Sekunde um x Meter, so kommen mehr Schallwellen zur Perzeption, nämlich auch die, welche sonst vom Beobachter noch x Meter entfernt wären. Entfernt sich die Tonquelle oder der Beobachter, so muß natürlich der Ton tiefer werden.

Wärmelehre.

A. Mechanische Wärmetheorie.

§ 77. **Wesen der Wärme.** Unter Wärme versteht man dasjenige Agens, welches bestimmte Nervenendigungen so reizt, daß wir eine