universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die Grundlagen der Bewegungslehre von einem modernen Standpunkte aus

Jaumann, Gustav

Leipzig, 1905

Zweiter Teil. Akustik

urn:nbn:at:at-ubi:2-6147

Zweiter Teil.

Akustik.

14. Reine Akustik.

307. Die Gehörsempfindungen zeigen einen abnormalen Zustand der Luft in der Nähe des Ohres an. Nach der Mannigfaltigkeit der Geräusche, Klänge und Töne zu urteilen, sind es sehr voneinander verschiedene Zustände der Luft, welche durch das Ohr entdeckt werden, während das Auge und alle anderen Sinne nicht den geringsten Unterschied schallender gegen stille Luft zu erkennen vermögen.

308. Als Ursache dieses Schallzustandes der Luft lernen wir von Jugend auf einen Vorgang auffinden oder erraten, welcher an einem oft weit entfernten Orte, der Schallquelle, vor sich geht. Die Schallquelle versetzt also die ganze Luft in ihrer Umgebung in meilenweite Entfernung in den Schallzustand, jedoch nicht gleichzeitig. Den Pfiff einer weit entfernten Maschine hören wir später, als wir den Dampfstrahl sehen, welcher den Schall erzeugt hat; der Donner folgt auf den Blitz mit desto größerer Verspätung, je weiter die Gewitterwolke entfernt ist.

Einen Knall hören alle Personen gleichzeitig, welche sich in einer Kugelfläche befinden, in deren Mitte die Schallquelle steht. An anderen Orten hört man den Schall nicht gleichzeitig, sondern an den von dieser Kugelfläche eingeschlossenen früher, in den ausgeschlossenen desto später, je weiter sie von der Schallquelle entfernt sind. Der Radius der Kugelfläche, in welcher sich der Schallzustand momentan befindet, wächst also, und zwar sehr rasch. Man nennt dies die Fortpflanzung des Schalles.

309. Die *Fortpflanzungsgeschwindigkeit* des Knalles eines blinden Kanonenschusses wurde zuerst von Mersenne (1660) gemessen. Zwei Kanonen I und II werden in 50 km Distanz aufgestellt. In der Mitte der Verbindungslinie befindet sich noch ein Beobachtungsposten III.

Die Station I löst einen Schuß. In der Station II sieht man den Lichtblitz, hört den Knall 150 Sekunden später, und löst im selben Augenblicke einen Schuß. Die Station I sieht dessen Licht 150 Sekunden nach Abgabe ihres eigenen Schusses und hört den Knall abermals 150 Sekunden später. Das Licht braucht also keine merkliche Zeit, um in 50 km Entfernung merklich zu werden. Der Schall braucht hierzu 150 Sekunden, er legt also pro Sekunde 33000 cm zurück und zwar nach jeder Richtung.

Der Beobachtungsposten III hört den Schuß I 75 Sekunden später, als er ihn sieht, ebenso den Schuß II, die Fortpflanzung des Schalles ist also eine gleichförmige und hängt nicht ab von dem Radius der Kugelfläche, in welcher sich der Schallzustand momentan befindet.

310. Wenn der Schall wirklich ein Zustand der Luft ist, dann muß er sich mit dieser transportieren lassen. Tatsächlich hat der Wind einen großen Einfluß auf die Schallfortpflanzung. Die Windgeschwindheit addiert sich vektorisch zu der Schallgeschwindigkeit. Ist die Komponente der Windgeschwindheit, welche in die Verbindungslinie der beiden Stationen fällt, gleich v, so hat der Schall in der einen Richtung die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $(c + v)$, in der entgegengesetzten die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $(c - v)$, worin c die normale Schallgeschwindigkeit ist.

Die normale Fortpflanzung des Schalles in ruhender Luft beruht aber nicht auf einer Bewegung der im Schallzustande befindlichen Luftmassen mit der hohen Geschwindigkeit des Schalles. Eine derartige Emissionshypothese des Schalles kam niemals auf. Die Schallfortpflanzung beruht vielmehr in einer raschen Übertragung des Schallzustandes der ruhenden Luft an benachbarte ruhende Luft, d. h. der Schallzustand kann seinen Ort ändern, während die meisten anderen Eigenschaftsverteilungen des Mediums unveränderlich sind.

311. Alle Schallarten, Geräusche und Klänge von großer und kleiner Stärke haben genau dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Man kann dies am einfachsten konstatieren, wenn man ein Orchester in weiter Entfernung spielen hört. Hätten die verschiedenen Klänge, Paukentöne usw. verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit, so würden sie in veränderter Ordnung bei dem Beobachter ankommen, was eine empfindliche Störung des musikalischen Eindruckes verursachen würde.

312. Eine ganz andere Fortpflanzungsart als der Schall ruhender Schallquellen hat der Knall scharfer Schüsse, besonders dann, wenn das Geschoß eine größere Geschwindheit als die Schallgeschwindigkeit hat. Dann befindet sich der Knall in einer birnenförmigen Fläche *s* (Fig. 66). Dieselbe ist zum Teil zwar mit Annäherung eine Kugelfläche, in deren Mitte das Geschütz *g* steht. Diese Schallfläche wird aber nie von dem Geschoß durchbrochen, sondern in eine Spitze *p* ausgezogen. In der Nähe des Geschosses bildet also die Schallfläche eine Kegelfläche, deren Achse die Geschoßbahn ist und deren Spitze stets mit der vorderen Spitze *p* des Geschosses zusammenfällt (E. Mach, 1888). Der Sinus des Öffnungswinkels dieses Schallkegels ist deshalb gleich dem Verhältnis der normalen Schallgeschwindigkeit zu der Geschoßgeschwindheit. Auch diese kegelförmige Schallfläche pflanzt sich also in ihren Normalenrichtungen mit der gewöhnlichen Schallgeschwindigkeit fort, obgleich ihre Spitze die Geschoßgeschwindheit hat.

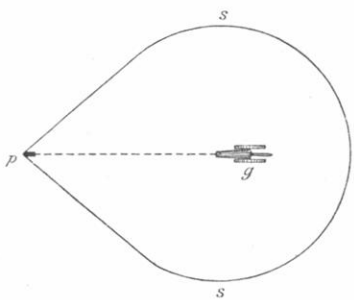

Fig. 66.

313. Der Schallzustand ist ein in mehrfacher Beziehung abnormaler Zustand der Luft und es ist in neuerer Zeit gelungen, diese Veränderung auch dem Auge merklich zu machen, also die Schallflächen sichtbar zu machen (Töpler). Mach gelang es sogar, die Schallflächen zu photographieren. Fig. 67 stellt das nicht retuschierte, mechanisch reproduzierte

Photogramm einer kugelförmigen Schallfläche des Knalles eines im Mittelpunkte der Schallkugel ausgelösten für das Auge verdeckten elektrischen Funkens. Fig. 68 stellt das erste Originalphotogramm eines mit 500 m/sec dahinfliegenden Geschosses samt dem dasselbe begleitenden Schallkegel dar.

Um die Schallflächen sichtbar zu machen, ist eine geeignete Momentanbeleuchtung (durch einen elektrischen Funken), Abblendung alles direkten Lichtes und Abbildung der Schallfläche durch das von ihr abgelenkte Licht notwendig (Schlierenmethode).

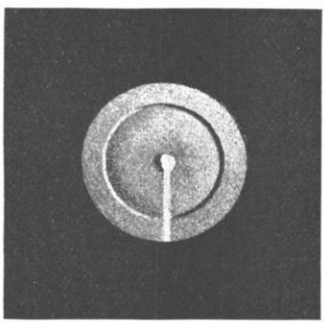

Fig. 67.

Fig. 68.

314. Die *Abschwächung* des Schalles bei seiner Ausbreitung ist sehr bekannt. In Röhren, in welchen der Schall keine Ausbreitung erfahren kann, pflanzt sich derselbe ohne starke Abschwächung also auf weitere Entfernungen fort, worauf die als Haustelephone verwendeten Sprachrohre beruhen.

315. Nicht nur die Luft, sondern alle Medien sind imstande, den Schallzustand anzunehmen und fortzupflanzen. Daß der Schall auch im Wasser vorkommt, kann man hören, wenn man in einem See untertaucht und das Geräusch einer Pumpe oder eines Dampfbootes beobachtet. Es folgt dies übrigens auch aus dem allen Fischern bekannten scharfen Gehör der Fische. Daß sich der Schall auch durch Mauern und Holztüren fortpflanzt, empfinden wir als einen Nachteil unserer Behausungen. Die Fortpflanzung des Schalles im Felsgestein wird in Bergwerken beobachtet und verwertet. Auch

wurde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Glockentones im Wasser des Genfer Sees nach der Mersenneschen Methode gemessen. Dieselbe beträgt 143500 cm pro Sekunde, ist also mehr als viermal so groß als in Luft. Beim Bau des Mont Cenistunnels wurde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Gestein mit 310000 cm pro Sekunde bestimmt.

316. Der Schall dringt, wie aus seiner verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit in verschiedenen Medien wahrscheinlich wird, nicht ohne eine wesentliche Modifikation der Schallkugel aus einem Medium in das andere. Man nennt diese Erscheinung die Reflexion und Refraktion der Schallfläche.

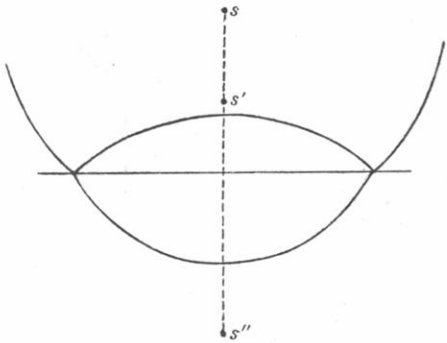

Fig. 69.

Erstere ist unter dem Namen Echo allgemein bekannt. Befindet sich eine (kurz tönende) Schallquelle und ein Beobachter an zwei beliebigen Stellen vor einer ebenen Felswand, so hört derselbe außer dem direkten Schall noch das Echo, das ist ein ganz gleicher, nur schwächerer Schall, welcher immer nach einer solchen Zeit beim Beobachter eintrifft, als käme er von einer imaginären Schallquelle s'', welche gleichzeitig mit der reellen Schallquelle s ertönt, aber ebenso weit hinter der Felswand liegt, als diese vor derselben, und als wäre der Fels nicht vorhanden, sondern beide Schallquellen und der Beobachter in einem unbegrenzten Luftraum.

Es schreitet also eine reflektierte Schallkugel in der Luft vor der Felswand fort, welche in bezug auf dieselbe genau

symmetrisch ist zu jenem Teile der direkten Schallkugel, welcher in den Felsen fallen würde und sich also nicht ausbilden kann. Auch in dem Felsen schreitet eine, jedoch sehr schwache Schallkugel fort. Alle drei Schallkugeln haben jenen sich rasch erweiternden Kreis gemeinsam, in welchem sich der Schall unmittelbar an der Felswand jeweilig befindet.

Ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in dem zweiten Medium größer, so muß die Schallfläche in demselben stärker gekrümmt sein, weil sie cet. par. tiefer in dasselbe eindringt. Mach hat die aus Öl in Glas eindringenden Schallflächen sichtbar gemacht. Die aus Luft in Wasser oder aus Wasser in Luft eindringende Schallfläche läßt sich direkt beobachten. Der eindringende Schall ist desto schwächer, je mehr sich beide Medien voneinander unterscheiden. Aus Luft in Mauern und umgekehrt, noch viel mehr aber aus verdünnter Luft in feste Wände und umgekehrt, dringt nur wenig Schall. Derselbe wird dann fast ungeschwächt reflektiert. Hängt man eine Klingel in eine geschlossene Büchse, so hört man ihren Schall schwächer. Hängt die Büchse außerdem inmitten eines mit verdünnter Luft gefüllten Rezipienten, so dringt fast gar kein Schall aus derselben.

317. Mit Hilfe des Echos kann ein einzelner Beobachter die Schallgeschwindigkeit messen. Befindet sich derselbe n cm von der reflektierenden Wand und hört er das Echo t sec, nachdem er den Schall erzeugt hat, so beträgt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c des Schalles in Luft

$$c = \frac{2n}{t} \text{ cm/sec}.$$

318. *Die Fortpflanzungsgleichung.* Die subjektive Verschiedenheit der Schallempfindungen beweist nicht, daß die Luft ebenso viele spezifisch verschiedene Schallzustände anzunehmen vermag. Vielleicht ist der Schallzustand nur eine einzige bestimmte Eigenschaft s der Luft und ist die Art der zeitlichen Veränderung dieser Eigenschaft in der Nähe des Ohres mitbestimmend für die Gehörsempfindung. Wie man auf diesen Gedanken kommt und seine Richtigkeit erweist, soll sogleich auseinandergesetzt werden. Hier wollen

wir von dieser Annahme und der Tatsache ausgehen, daß der Schall bei seiner Ausbreitung seinen Charakter bewahrt.

Ein Schallfeld, d. i. die räumliche und zeitliche Verteilung des Schallzustandes s in der Umgebung der Schallquelle, wird dann durch die Gleichung:

$$s = a f(r - c t)$$

dargestellt, worin c die Schallgeschwindigkeit und r der Abstand von der Schallquelle ist. Die Form der Funktion f soll den Charakter des Schalles, d. i. die Gehörseindrücke eines Beobachters in diesem Felde bestimmen. Die Zahl a bestimmt die Stärke des Schalles, sie muß mit r langsam abnehmen. Diese Gleichung stellt jedenfalls die Schallfortpflanzung dar. Man findet jeden Schallzustand nach der Zeit $(t_2 - t_1)$ um die Entfernung $r_2 - r_1 = c(t_2 - t_1)$ weiter vom Ursprung entfernt vor, oder anders ausgedrückt: vergrößert man t und gleichzeitig r um einen $c$fach größeren Betrag, so bewahrt s seinen Wert.

319. *Das Reflexions- und Brechungsgesetz* folgt nun aus der Tatsache, daß das Echo sowie der in das zweite Medium eindringende Schall denselben Charakter haben wie der einfallende Schall, so daß man sogar ganze Worte im Echo oder in dem durch eine Wand dringenden Schalle wiedererkennen kann.

Wir wenden unsere Aufmerksamkeit nur einem kleinen Teile der Grenzfläche zu, in deren Gebiet diese selbst so wie die Niveauflächen des Schallzustandes s als Ebenen anzusehen sind.

Die Grenzfläche $z = 0$ trenne die beiden Medien, in welchen die Schallgeschwindigkeit die Werte c_1 und c_2 hat.

In der Grenzfläche muß jederzeit ein bestimmter Schallzustand vorhanden sein, also muß für

$$z = 0 \qquad s_1 = s_2$$

sein. Diese Grenzbedingung zusammen mit der charakteristischen Bedingung, daß die Funktion f für beide Schallfelder dieselbe Form haben soll, kann kaum auf andere Weise erfüllt werden, als durch die Summierung eines zweiten Schallfeldes

in dem ersten Medium, was die Reflexion des Schalles erklärt. Die Gleichung einer Niveaufläche des einfallenden Schalles sei

$$\alpha_1 x + \gamma_1 z = \text{konst.}$$

Die Richtungskosinus der Normalen der Niveauflächen des reflektierten und gebrochenen Schalles seien $\alpha_1' \gamma_1'$ bzw. $\alpha_2 \gamma_2$.

In dem Medium 1 hat also der Schallzustand s_1 die Verteilung

$$s_1 = a_1 f\left(\frac{\alpha_1 x + \gamma_1 z}{c_1} - t\right) + a_1' f\left(\frac{\alpha_1' x + \gamma_1' z}{c_1} - t\right).$$

In dem Medium 2 hat der Schallzustand den Wert

$$s_2 = a_2 f\left(\frac{\alpha_2 x + \gamma_2 z}{c_2} - t\right).$$

Setzen wir zunächst $x = 0$. Dann fordert die Grenzbedingung, wenn sie für jeden Wert von t erfüllt sein soll, daß

$$a_1 + a_1' = a_2.$$

Da a_2 oft sehr klein ist, so kann a_1' negativ werden, was bereits die Möglichkeit von Schallzuständen entgegengesetzten Vorzeichens erkennen läßt. Ferner fordert die Grenzbedingung, wenn sie auch für jeden Wert von x erfüllt sein soll, daß

$$\frac{\alpha_1}{c_1} = \frac{\alpha'_1}{c_1} = \frac{\alpha_2}{c_2}, \quad \text{also} \quad \gamma_1' = -\gamma_1.$$

Die Richtungskosinus der Normalen der drei Schallfelder sind also den Fortpflanzungsgeschwindigkeiten verkehrt proportional, d. h. die einfallenden und reflektierten Niveauflächen müssen zur Grenzfläche symmetrisch liegen, die Sinus des Einfalls- und Brechungswinkels müssen im Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten c_1 und c_2 stehen.

Wir gehen nun zu den Experimenten über, welche direkt zeigen, daß verschiedene Arten der zeitlichen Veränderung des Schallzustandes spezifisch verschiedene Eindrücke des Gehörsinnes bestimmen.

320. *Periodischer Schall.* Verursacht eine Schallquelle (z. B. ein elektrisch betriebenes Schlagwerk) in gleichen kurzen Intervallen, z. B. von $^1/_{10}$ Sekunde, einen sehr kurztönenden Schall, so ist die ganze Luft in ihrer Umgebung von äquidistanten, je 33 m voneinander abstehenden konzentrischen,

unausgesetzt der Schallquelle entspringenden und sich gleichförmig ausdehnenden Schallkugeln erfüllt (Fig. 70).

Ein Beobachter in diesem Felde hört jedesmal einen Schall, wenn eine solche Schallkugel an seinem Ohre vorbeizieht. Bewegt er sich rasch gegen die Schallquelle, oder von derselben fort, so hört er die Schallschläge in rascherem Tempo bzw. langsamerem Tempo, als sie wirklich von der Schallquelle ausgehen.

Bewegt sich die Quelle des periodischen Schalles, so bewahrt doch jede Schallkugel bei ihrer Ausbreitung die Lage ihres Mittelpunktes, welcher an der Stelle liegen bleibt, an

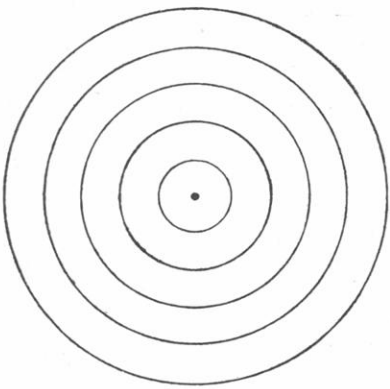

Fig. 70.

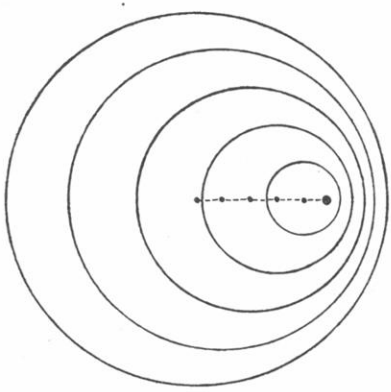

Fig. 71.

welcher die Schallquelle stand, als sie diesen Schallschlag aussendete. Die ganze Schar der Schallkugeln ist also nicht konzentrisch, sondern dieselben sind in der Bewegungsrichtung der Schallquelle zusammengedrängt (Fig. 71). Ein Beobachter, gegen welchen bzw. von welchem sich die Schallquelle bewegt, hört ihre Schläge in rascherem bzw. langsamerem Tempo, als sie wirklich von ihr ausgehen. Steht man neben dem Geleise und hört dem Vorbeifahren einer Maschine mit 20 m/sec Geschwindheit zu, so scheinen die taktmäßigen Geräusche derselben in rascherem Tempo zu erfolgen, während sich die Maschine nähert, und in langsamerem Tempo, während sich die Maschine entfernt, so daß es den Eindruck macht, als wäre die Fahrgeschwindigkeit im Augenblicke des Vorbeifahrens im Verhältnis

$(330 - 20):(330 + 20) = 8:9$ kleiner geworden, was sehr merklich ist.

321. *Koinzidenzflächen.* Wenn zwei genau gleichschlagende periodische Schallquellen in dem Felde vorhanden sind, so durchkreuzen sich ihre Schallkugeln. Die Schnittkreise derselben laufen dabei auf zweischaligen Rotationshyperboloiden, deren Brennpunkte die Schallquellen sind, und welche Koinzidenzflächen heißen. In diesen Flächen hört ein Beobachter die Schläge beider Schlagwerke gleichzeitig, so daß er nur ein stärker schlagendes Werk zu hören glaubt. Die Scheitel

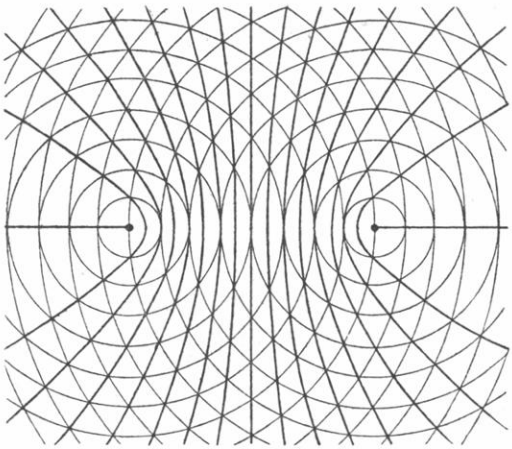

Fig. 72.

dieser Hyperboloide liegen in gleichen Abständen (16,5 m) voneinander. In den zwischenliegenden Hyperboloiden alternieren die Schläge, und weil man 20 Schallempfindungen pro Sekunde nicht mehr zu trennen vermag, hört man dort nur gleichmäßiges Geräusch.

Bewegt sich eine der Schallquellen, so bewegen sich auch die Koinzidenzflächen und der Beobachter hört abwechselnd die Schläge koinzidieren und alternieren.

In derselben Weise verhält sich das Schallfeld einer solchen Schallquelle, welche in der Nähe einer reflektierenden Wand steht. Die reflektierten Schallkugeln schneiden die

direkten und es bilden sich die hyperbolischen Koinzidenzflächen aus.

Bewegt sich das Schlagwerk vom Beobachter gegen die Wand, so hört derselbe die direkten Schallschläge in langsamerem, das Echo in rascherem Tempo, da sich die imaginäre Schallquelle des Echos nähert, so daß die Schläge bald koinzidieren, bald alternieren, was dem Vorbeistreifen der aufeinander folgenden Koinzidenzflächen an dem Ohre entspricht.

Diese Koinzidenzexperimente wurden verwertet zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit aus der bekannten Schlagzahl des Schlagwerkes, umgekehrt könnte aber die Ausmessung der Koinzidenzflächen bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Schlagzahl des Schlagwerkes zu ermessen gestatten.

322. *Koinzidenzschwebungen.* Sehr brauchbar ist die Koinzidenzmethode, um kleine Unterschiede der Schlagzahlen zweier Schlagwerke zu messen. Ihre Schläge werden nicht scheinbar, sondern tatsächlich abwechselnd koinzidieren und alternieren, und die Zahl dieser Schwebungen pro Sekunde ist einfach gleich der Differenz der beiden Schlagzahlen. Macht das eine Schlagwerk 10, das andere 10,05 Schläge pro Sekunde, so finden 0,05 Schwebungsperioden pro Sekunde statt, oder eine derselben dauert 20 Sekunden.

323. *Die Tonempfindungen.* Unter allen Schallarten erwecken die reinen Töne eine ganz spezifische Empfindung. Die tönenden Schallquellen, von welchen die meisten in der Musik Verwendung finden, haben auch großes physikalisches Interesse. Die Tonempfindungen unterscheiden sich in ihrer Qualität nur durch ein Merkmal, die Tonhöhe, und lassen sich in eine einzige kontinuierliche Reihe von den tiefsten bis zu den höchsten Tönen ordnen. Kein musikalisches Instrument gibt diese Tonreihe in ihrem ganzen Umfange. Die tiefsten und höchsten Töne wirken nicht angenehm und werden deshalb in der Tonkunst nicht verwendet. Eine besondere ästhetische Wirkung hat der Zusammenklang oder die unmittelbare Aufeinanderfolge einer Anzahl diskreter Töne, welche, wenn man von einem beliebig gewählten Grundton ausgeht, sich gleichmäßig zerstreut in der kontinuierlichen Tonreihe finden

und die Tonleiter heißen. Die Tasteninstrumente geben eine solche Tonleiter. In dieser fallen die gleichmäßig verteilten Oktaven durch ihre Ähnlichkeit trotz sehr verschiedener Tonhöhe auf, wenn sie gleichzeitig oder in unmittelbarer Folge erklingen. Ebenso und durch den Wohllaut beim Zusammenklang die Quinten und Terzen, die verminderten Terzen, die Quarten und Sexten. Leicht dissonierende Akkorde, z. B. der Septimakkord, sind noch musikalisch sehr verwendbar. Das musikalisch geübte Ohr ist imstande, sehr komplizierte Tonbeziehungen aufzufassen und angenehm zu empfinden.

324. *Das Doppler'sche Phänomen.* Entfernt man sich rasch von einer Tonquelle, so erscheint ihr Ton tiefer. Nähert man sich ihr ebenso rasch, so erscheint ihr Ton ebensoviel höher. Das gleiche tritt ein, wenn der Beobachter ruht und die Schallquelle sich bewegt.

Steht man neben einem Geleise, auf welchem eine Maschine mit der Geschwindheit 20 m/sec pfeifend vorbeifährt, so scheint die Tonhöhe des Pfiffes, welche sie auch ist, genau um einen Halbton zu fallen, was sehr merklich ist. Fährt man auf einer doppelgeleisigen Strecke an der pfeifenden Maschine eines begegnenden Schnellzuges vorbei, so scheint die Tonhöhe des Pfiffes im Augenblicke der Begegnung um nahezu einen ganzen Ton zu fallen.

Pfeift eine Maschine vor dem Einfahren in einen Tunnel, so erscheint der von der Felswand reflektierte Schall um nahezu einen ganzen Ton höher, und zwar sowohl für einen mitfahrenden als einen ruhenden Beobachter.

325. *Interferenz der Töne.* Der Tonschall pflanzt sich wie jeder andere Schall fort und wird ebenso wie dieser reflektiert und gebrochen. Stellt man eine Tonquelle, z. B. eine Pfeife, welche das reine *a'* gibt, in 3 m Entfernung von einer reflektierenden Wand auf, so bildet das Schallfeld eine sogenannte stehende Schallwelle. Es lassen sich acht äquidistante Rotationshyperboloide aufweisen, in welchen der Ton und sein Echo sich verstärken, während sie sich in den Zwischenräumen schwächen oder ganz aufheben (Schallschatten). Ton zu Ton gefügt kann also Ruhe geben.

Besonders scharf entwickelt sind die hyperbolischen Schall-

schatten oder Auslöschungen (Interferenzflächen) in deren Scheiteln, d. i. in der von der Tonquelle auf die reflektierende Wand gefällten Normalen. Man kann auch im freien Felde (ohne Echo) operieren, muß aber dann zwei gleiche kontinuierliche Tonquellen, z. B. zwei gleichgestimmte Pfeifen, verwenden. Am besten hört man das Vorbeistreifen der Interferenzflächen an dem Ohre, wenn der Beobachter oder eine der Schallquellen sich bewegen. Es macht sich dasselbe durch ein periodisches Anschwellen und Abnehmen des Tones bemerklich, welches man Schwebung nennt.

326. *Die Schwebungen* zweier etwas verstimmter Töne ruhender Schallquellen klingen ganz ähnlich. Sie sind desto rascher, je größer das Intervall der beiden Töne und je höher dieselben sind. Das Subkontra *a* gibt mit dem um einen halben Ton höheren *b* in 60 Sekunden 135 Schwebungen, also pro Sekunde 2,25 Schwebungen. In der nächsten Oktave geben dieselben zwei Töne 4,5 Schwebungen pro Sekunde, in der zweithöheren Oktave 9 Schwebungen pro Sekunde u. s. f.

Das Subkontra *a* gibt gegen das um einen ganzen Ton höhere *h* pro Sekunde 3,4 Schwebungen, gegen das Kontra *c* pro Sekunde 5,5 Schwebungen. In der nächst höheren Oktave doppelt, in der zweithöheren Oktave viermal soviel Schwebungen.

Das Normal *a'* würde mit dem um einen Halbton höheren *b'* 36 Schwebungen pro Sekunde geben. Geben zwei Tonquellen von dieser Höhe pro Sekunde nnr 3,6 Schwebungen, so sind sie um $^1/_{10}$ Halbton gegeneinander verstimmt, ein Intervall, welches das feinste Ohr nicht mehr direkt an der verschiedenen Tonhöhe erkennen kann. Man kann nach dieser Methode zwei Musikinstrumente, besonders Stimmgabeln und Stimmpfeifen, bis auf $^1/_{100}$ Ton genau stimmen, indem man trachtet ihre Schwebungen möglichst langsam zu machen.

327. *Periodische Natur des Tonschalles.* Vergleicht man die Dopplersche Erscheinung, die Interferenz und Schwebung des Tonschalles mit den ganz entsprechenden weiter oben beschriebenen Experimenten mit periodischem Schall, so kann man sich der Vermutung nicht verschließen, daß der Tonschall objektiv ein periodischer Schall ist, dessen Periodenzahl zu hoch ist, als daß man jede einzelne Periode hören könnte.

Die Tonempfindung ist freilich spezifisch von der Empfindung periodischer Schallschläge unterschieden.

Um das Dopplersche Phänomen durch die Periodizität des Tonschalles zu erklären muß man annehmen, daß man einen desto höheren Ton hört, je mehr Schallperioden an dem Ohre vorbeiziehen. Auch die Interferenzexperimente ergeben, daß die Auslöschungsflächen einander desto näher liegen, je höher der Ton ist.

Daraus, daß das Intervall der Tonveränderung bei dem Dopplerschen Versuch cet. par. von der Tonhöhe unabhängig ist, folgt, daß das Verhältnis ihrer Periodenzahlen das Intervall zweier Töne bestimmt. Das gleiche folgt aus dem Gesetz der Schwebungszahl.

Ein Tonfeld besteht also aus äquidistanten Schallkugeln gleichen Schallzustandes, welche von der Tonquelle ausgehen und sich mit der Schallgeschwindigkeit ausbreiten. Man nennt dieselben Wellenflächen des Schalles. Der Schallzustand s ist in einem Tonfelde eine periodische Funktion φ der Entfernung r von der Schallquelle und der Zeit t

$$s = a\,\varphi\left(\frac{1}{\lambda}(r - c\,t)\right),$$

worin c die Schallgeschwindigkeit und λ eine konstante Länge, die Periodenlänge oder Wellenlänge ist.

Die Funktion φ muß so beschaffen sein, daß sie denselben Wert annimmt, wenn $(r - c\,t)$ um ein ganzzahliges Vielfaches von λ vergrößert wird.

Man bezeichnet die Zeit

$$\tau = \frac{\lambda}{c}$$

als die Periodendauer des Tones, ihren reziproken Wert

$$n = \frac{c}{\lambda}$$

als die Periodenzahl des Tones.

328. *Die verzweigte Interferenzröhre.* Zur bequemen Messung der Periodendauer der verschiedenen Töne kann man sich beispielsweise eines von Quincke herrührenden Apparates bedienen (Fig. 73). In einem Kasten bei a wirkt eine Tonquelle. Der Schall pflanzt sich durch die Röhre $a\,b$ fort und teilt sich

an der Verzweigungsstelle b. Die beiden in den Zweigen $b\,c\,d$ bzw. $b\,c'\,d$ fortschreitenden Tonwellen vereinigen sich bei d und werden von dem Ohre vernommen, wenn die beiden Zweige gleiche Länge haben, oder wenn ihre Längendifferenz ein Vielfaches einer Wellenlänge ist. Ist aber die Längendifferenz ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge, so heben sich beide Tonwellen bei ihrem Zusammentreffen in d auf und erreichen das Ohr nicht. Es ist leicht mit dieser Interferenzröhre, von welcher ein Zweig sich durch einen Auszug verlängern läßt, die Wellenlänge der verschiedenen Töne auszumessen.

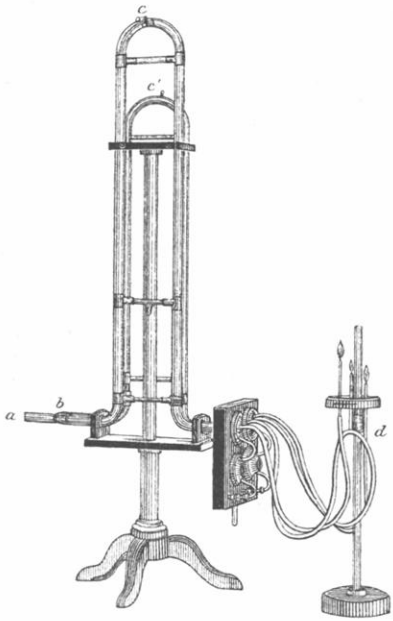

Fig. 73.

329. *Periodendauer der Töne.* Das Normal a hat die Wellenlänge $\lambda = 76$ cm und die Periodenzahl

$$n = 435 \text{ sec}^{-1}.$$

Das tiefste a des Klaviers hat eine 16 mal größere Wellenlänge, $\lambda = 1240$ cm, das höchste a des Klaviers hat eine 8 mal kleinere Wellenlänge, $\lambda = 9{,}5$ cm. Die Töne von harmonischem Intervall haben Periodendauern, welche in rationalen Verhältnissen stehen.

Die Oktave jedes Tones hat die halbe Wellenlänge und doppelte Periodenzahl, z. B. haben die c-Töne, welche in der Musik verwendet werden, der Reihe nach vom tiefsten bis zum höchsten folgende Perioden:

$$n = 33,\ 65,\ 131,\ 261,\ 524,\ 1048,\ 2100 \text{ sec}^{-1},$$
$$\lambda = 1000,\ 508,\ 252,\ 126,\ 63,\ 31,\ 16 \text{ cm}.$$

Die Verhältnisse der Periodenzahlen der Töne der am häufigsten verwendeten Tonleitern wurden so gewählt, daß

die drei Hauptakkorde derselben nach dem gleichen Verhältnis der Periodenzahlen aufgebaut sind.

Diese Verhältnisse sind:

Tonart	I	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Dur	1	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{5}{4}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{5}{4}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2}$
Moll	1	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{6}{5}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{6}{5}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2}$

330. *Der negative Schallzustand.* In einer Beziehung unterscheiden sich die periodischen Erscheinungen des Tonschalles wesentlich von jenen gewöhnlichen periodischen Schalles (§ 320). Während die letzteren Schallfelder dort, wo sie alternieren, ein gleichmäßiges Geräusch bilden, löschen sich die Tonfelder an diesen periodisch verteilten Orten aus. Ton zu Ton gefügt kann Stille geben.

Das gleiche beobachtet man bei Schwebungen. Sind die beiden etwas gegeneinander verstimmten Tonquellen von gleicher Stärke, so bildet die Schwebung ein periodisches Anschwellen und Abnehmen des Tones bis zur völligen Ruhe.

Dies ist eine auffallende Abweichung von dem im allgemeinen für den Zusammenklang verschiedener Töne geltenden Gesetz, daß man beide gleichzeitig hört. Physiologisch ist also das resultierende Schallfeld nur ungefähr und gar nicht bei nahezu reiner Abstimmung der beiden Töne gleich der Summe der Einzelfelder. Nichtsdestoweniger kann man das Superpositionsgesetz für die Verteilung des objektiven resultierenden Schallzustandes aufrecht erhalten. Damit aber ein Tonfeld zu einem Tonfeld addiert den Schallzustand Null gibt, ist notwendig anzunehmen, daß dort der Schallzustand in beiden Feldern entgegengesetztes Vorzeichen habe. In den abwechselnd dazwischen liegenden Orten des resultierenden Feldes, wo die beiden Töne sich verstärken, muß der Schallzustand in beiden Feldern gleiches Vorzeichen haben. Jede Tonwellenlänge besteht also aus zwei Abschnitten, in welchen der Schallzustand ganz gleich verteilt ist, aber entgegengesetztes Vorzeichen hat.

331. *Die Klangfarbe.* Die von verschiedenen Instrumenten entwickelten Klänge unterscheiden sich bei gleicher Stärke und

Tonhöhe noch deutlich durch die Klangfarbe. Nichtsdestoweniger ist der Satz richtig, daß sich gleichhohe Töne nur durch ihre Stärke unterscheiden können. Die Klänge, welche die Musikinstrumente liefern, sind aber keine einfachen Töne, sondern, wie jeder Musiker ohne weiteres heraushört, Akkorde. Sie enthalten außer dem an Stärke vorwiegenden Grundton noch die harmonischen Obertöne, d. i. jene Töne, deren Periodenzahlen ganzzahlige Vielfache der Periodenzahl des Grundtones sind. Es sind dies der Grundton und die Quinte der ersten Oktave, der Grundton, die Terz, Quinte, eine dissonierende Septim der zweiten Oktave, Grundton, Sekund, Terz usw. der dritten Oktave und viele dissonierende noch höhere Töne mit stets abnehmender Stärke.

Das objektive Vorhandensein der Obertöne im Klangfelde wird auch dem ungeübten Ohre deutlich in den räumlich bzw. zeitlich verteilten Auslöschungen des Grundtones, welche in stehenden Klangwellen bzw. bei Schwebungen eintreten. Man hört in diesen Auslöschungen des Grundtones besonders jene Obertöne, welche nur der einen der beiden Schallquellen eigentümlich sind.

332. *Klänge mit aufgezwungener Hauptperiode.* Ein Klang unterscheidet sich also von einem beliebigen mit kurzer Periode wiederholten Schall möglicherweise nur durch seinen Gehalt an Obertönen. Danach muß jedes regelmäßig wiederholte Geräusch: Klopfen, Scharren, Blasen usw., wenn die Periodenzahl eine entsprechend große ist, einen Klang geben, dessen Grundton die gleiche Periodenzahl hat. Diese künstlichen Klänge werden von den Sirenen geliefert, das sind neuartige, auf Grund der Wellentheorie des Schalles erfundene Toninstrumente, zu welchen auch der Phonograph gehört. Sobald die Periodenzahl der Schallstöße einer Sirene 16 übersteigt, verursacht ihr Geräusch eine Klangempfindung mit entsprechender Höhe des Grundtones. Es ist bemerkenswert wieviel intensiver diese Klangempfindung ist, als die Summe der Einzelgeräusche, welche die Sirene verursacht. Auch wenn jeder Schallstoß derselben unhörbar schwach ist, kann sie einen stark hörbaren Ton aussenden, wenn die Periodenzahl der Schallstöße zwischen 200 und 600 sec^{-1} liegt, für welche Töne das Ohr am empfindlichsten ist. Auch alle Musik-

instrumente sind solche Tonquellen, deren einzelne Schallimpulse unhörbar schwach sind.

Es reichen schon zwei Schallimpulse, die rasch aufeinander folgen, aus, um neben dem Geräusch derselben eine Tonempfindung zu wecken, deren Periodendauer der Zeitdifferenz dieser zwei Schallimpulse entspricht. Man erkennt dies, wenn man mit zwei Fingern möglichst gleichzeitig auf eine Wand klopft. Dies klingt ganz anders, als wenn man nur mit einem Finger klopft, und zwar mengt sich im ersteren Falle ein hoher reiner Ton mit ein, der besonders dadurch auffällt, daß seine Tonhöhe bei wiederholtem Klopfen stets wechselt (W. Kohlrausch).

333. *Die Kombinationstöne.* Da jeder beliebige periodisch wiederholte Schallstoß bei hinreichend großer Periodenzahl eine besondere Tonempfindung weckt, so folgt, daß die Schwebungen zweier dissonierenden Töne, deren Periodenzahlen um mehr als 16 sec^{-1} verschieden sind, als Ton gehört werden müssen, dessen Periodenzahl gleich der Differenz der Periodenzahlen der kombinierten Töne ist. Dieser Kombinationston wurde von dem Musiker Sorge entdeckt (1750). Andere Kombinationstöne wurden von König nachgewiesen. Ein hoher Kombinationston, dessen Periodenzahl gleich der Summe der Periodenzahlen der beiden kombinierten Töne ist, wurde von Helmholtz entdeckt. Dieser erklärt sich aber in anderer Weise, nämlich durch die unvollkommene Gültigkeit des Superpositionsgesetzes bei der Interferenz starker Tonfelder.

334. *Das Feld reiner Töne.* Aus der Tatsache, daß das Ohr einen Klang stets als Akkord reiner Töne empfindet und Klänge von verschiedener Entstehungsart, aber gleichem Grundton sich nur durch ihren Gehalt an Obertönen unterscheiden, folgt, daß in einem reinen Tonfelde der Schallzustand s in einer ganz speziellen Weise verteilt sein muß. Er kann nicht eine beliebige periodische Funktion des Ortes und der Zeit sein, denn dies gilt auch für einen beliebigen Klang, sondern in einem Tonfeld muß der Schallzustand eine ganz bestimmte, wahrscheinlich einfache, periodische Verteilung haben. Nun kommt keine andere periodische Verteilung bei physikalischen

Vorgängen so häufig vor als die sinusartige. Ein reines Tonfeld dürfte also durch

$$s = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (r - c\,t)$$

beschrieben werden, worin a in größerer Entfernung von der Tonquelle eine nahezu konstante Zahl ist.

Ein Klangfeld läßt sich jedenfalls durch die Fouriersche Reihe

$$s = \sum_i (a_i \sin n_i p + b_i \cos n_i p)$$

einfach darstellen, worin

$$p = \frac{2\pi}{\lambda} (r - c\,t)$$

und somit als eine Summe von Tonfeldern auffassen, in welchen der Schallzustand s sinusförmig verteilt ist und deren Periodenzahlen meist im Verhältnis der ganzen Zahlen n_i stehen.

Die Amplituden a_i oder b_i messen die bei verschiedenen Instrumenten und bei verschiedenem Spiel derselben verschiedenen Stärkenverhältnisse der Obertöne. Meist reichen wenige Glieder der Reihe hin, den Klang darzustellen. Die Klänge von Stimmgabeln, überhaupt massiven Tonquellen (Stäben, Platten, Glocken) haben aber disharmonische Obertöne.

335. *Der Schallvektor.* An jedem Orte eines Tonfeldes ändert sich der Schallzustand periodisch und diese Veränderung pflanzt sich in der Richtung des Gefälles des Schallzustandes mit einer für das Medium charakteristischen Geschwindigkeit fort. Man versteht aber diesen Vorgang viel tiefer, d. h. man konnte ihn als eine Folge noch einfacherer Gesetze von viel weiterem Geltungskreis darstellen.

Niemals ändert sich ein Zustand s eines Mediums allein, sondern jeder physikalische Vorgang besteht in gleichzeitigen Änderungen mindestens zweier verschiedener Eigenschaften, die durch zwei Differentialgesetze miteinander verbunden sind.

Die Fortpflanzungsgleichung ist, wie dies weiter unten ausgeführt werden soll, ein Integral der Differentialgleichung

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 s\,.$$

Diese läßt sich tatsächlich in zwei lineare Differentialgleichungen unter Einführung eines Hilfsvektors $\mathfrak{v}$ zerlegen:

$$\text{(a)} \qquad \begin{cases} \dfrac{\partial s}{\partial t} \overset{1}{=} \varkappa_1 \nabla \cdot \mathfrak{v}, \\[2ex] \dfrac{\partial \mathfrak{v}}{\partial t} \overset{2}{=} \varkappa_2 \nabla s, \end{cases}$$

worin $\varkappa_1 \varkappa_2 = c^2$. Wir nennen diese hypothetischen Gleichungen die akustischen Grundgleichungen.

Hat das Gefälle ∇s des skalaren Schallzustandes konstante Richtung, und hat der Schallvektor $\mathfrak{v}$ einmal den Wert Null, so hat er also immer diese (longitudinale) auf den Niveauflächen des Feldes senkrechte der Fortpflanzungsgeschwindigkeit parallele Richtung.

Ob nun diese Zerlegung der Differentialgleichung der Fortpflanzung in die zwei Grundgleichungen (a) ganz richtig ist oder nicht, auf jeden Fall begibt man sich eines heuristischen Vorteiles, wenn man für immer darauf verzichten wollte, dieselben durch freies Erraten auf Grund rein akustischer Beobachtungen zu verbessern.

Von aktuellem Interesse wird die Frage dieser Zerlegung der Differentialgleichung der Schallfortpflanzung in zwei allgemeiner gültige Gleichungen immer dann werden, wenn akustische Phänomene aufgefunden werden, die durch die hier angeführte einfachste Zerlegung nicht richtig dargestellt werden. Laplace hat auf diesem Wege gezeigt, daß eine vorgefaßte Meinung über den Wert der Konstanten $\varkappa_2$, welche von Newton eingeführt worden war, unzutreffend ist, und damit einen wesentlich neuen Einblick in das Verhalten der Gase gewonnen. (Vergl. Kapitel 18.)

Sonst ist noch keine Differenz dieser Grundgleichungen gegen die akustischen Beobachtungen nachgewiesen worden. Auch die komplizierteren Schallphänomene werden durch diese Gleichungen hinreichend dargestellt. Freilich sind unsere Beobachtungsmethoden noch sehr unentwickelt. Aus diesen Gründen hat die Akustik gegenwärtig noch keinen so hohen heuristischen Wert für die Bewegungslehre wie die Optik ihn für die Elektrizitätslehre hat.

336. So wie Fresnel die Grenzbedingungen der optischen Vektoren erraten konnte, ohne eine Ahnung von der wahren

Natur dieser Vektoren zu haben, so ist es uns leicht die Bedingungen zu erkennen, welche der Schallvektor $\mathfrak{v}$ an der Grenzfläche zweier Medien erfüllt.

Betrachten wir als einfachstes Beispiel die in einer Röhre in der Richtung $-x$ fortschreitende Schallwelle

$$s = a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x + ct),$$

$$v_x = b \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x + ct).$$

Die Richtung des Schallvektors muß die longitudinale sein ($v_y = 0$, $v_z = 0$). Die Amplitude b desselben bestimmt sich durch

$$\frac{b}{a} = +\sqrt{\frac{\varkappa_2}{\varkappa_1}}.$$

Ist die Röhre an der Stelle $x = 0$ durch eine feste Wand geschlossen, so wird die Welle total reflektiert und diese reflektierte Welle wird dargestellt durch

$$s' = \quad a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x - ct + 2\lambda_0),$$

$$v'_x = -b \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x - ct + 2\lambda_0),$$

worin λ_0 eine unbekannte Konstante, die Phasenverschiebung, ist. Die Summe beider Wellen ist die stehende Welle

$$s + s' = 2a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x + \lambda_0) \cos \frac{2\pi}{\lambda}(ct - \lambda_0),$$

$$v_x + v'_x = 2b \cos \frac{2\pi}{\lambda}(x + \lambda_0) \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - \lambda_0),$$

Die Knoten derselben, d. i. die Stellen stärksten Schalles liegen dort, wo $\sin \frac{2\pi}{\lambda}(x + \lambda_0)$ den größten Wert hat, also wo

$$x + \lambda_0 - \frac{\lambda}{4} = 0, \quad \frac{\lambda}{2}, \quad \lambda, \quad \frac{3\lambda}{2} \ldots$$

Die Beobachtung ergibt, daß ein Knoten unmittelbar am geschlossenen Ende der Röhre liegt, daß also

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{4}$$

ist. Hieraus folgt, daß der Schallvektor $\mathfrak{v}$ unmittelbar an der reflektierenden Wand Null sein muß, was ein spezieller Fall der aufzusuchenden Grenzbedingungen für diesen Vektor ist.

Wir wollen schließen mit der Beschreibung eines kom-

plizierteren und interessanten Integrals dieser akustischen Differentialgleichungen, ohne jedoch auf die von Helmholtz durchgeführte Rechnung einzugehen.

337. *Vektorische Schallquellen.* Es wäre naheliegend anzunehmen, daß in einer Schallquelle der Abschwächung des Schalles mit der Entfernung wegen besonders ausgiebige zeitliche Veränderungen des skalaren Schallzustandes vorkommen müssen, und es hat sich dies auch für manche Schallquellen (skalare Schallquellen) bestätigt. In den wichtigsten Fällen sind aber gerade in der Schallquelle nur Änderungen des Schallvektors zu konstatieren.

Zu diesen vektorischen Schallquellen gehören die Pfeifen oder Resonatoren. Es sind dies Röhren, in welchen auf eine der sogleich mitzuteilenden Weisen eine stehende Schallwelle erzeugt und unterhalten wird. Man kann durch seitlich angebrachte Hörrohre die Lage der äquidistanten schallenden Stellen (Knoten) und Schallschatten oder Auslöschungen (Bäuche) konstatieren. Ist die Röhre an einem Ende geschlossen, so ist dort immer ein Knoten vorhanden. An der Mündung der Röhre oder, wenn diese nicht weit ist, ein wenig vor (außerhalb) der Mündung liegt ein Bauch oder Schallschatten. Dennoch breitet sich von dieser Stelle aus die Schallwelle in den ganzen Außenraum aus. Die Schallwellenflächen sind in diesem kugelförmig, und in der Nähe der Pfeifenmündung ist die Schallwelle noch eine stehende, so daß man kugelförmige abwechselnde Schallflächen und Auslöschungsflächen konstatieren oder wenigstens Schwebungen hören kann, wenn man sich rasch in radialer Richtung bewegt. In größerer Entfernung von der Pfeifenmündung sind aber die Schallwellen fortschreitende. In dem dazwischen liegenden Gebiete findet der Übergang von der stehenden zur fortschreitenden Welle in der Weise statt, daß die Schallflächen ungleichförmig fortschreiten, indem sie in äquidistanten Stellungen verweilen oder sich nur langsam ausbreiten, aber zweimal in jeder Periode rasch um eine halbe Wellenlänge vorschreiten.

Eine Pfeife, welche an einem Ende geschlossen ist, kann nach der oben angegebenen Lage der Knoten nur Töne aussenden, deren Wellenlängen sich zur Pfeifenlänge wie 4 zu einer ungeraden Zahl verhalten, deren Periodenzahlen sich

also wie die ungeraden Zahlen verhalten. Eine beiderseits offene Pfeife kann aber alle harmonischen Obertöne aussenden.

Stellt man eine Röhre in ein schwaches, aber andauerndes Tonfeld, so gerät sie sehr bald selbst ins Mittönen, wenn der Ton einer ihrer Eigentöne ist. Es macht sich eine merkliche Veränderung des ganzen Schallfeldes in ihrer Nähe bemerkbar. Ist die Schallquelle weit entfernt, so sind ihre Schallflächen parallele Ebenen, die in ihrer Normalrichtung gleichmäßig fortschreiten. Stellt man nun eine abgestimmte beiderseits offene Röhre in diese Normalrichtung ein, so verlaufen die Schallflächen bald zum großen Teile durch die Röhre, während neben ihr der Schall viel schwächer wird. Die Schallflächen ziehen sich kugelförmig gegen das vordere Ende der Resonatorröhre zusammen, wobei ihre Fortschreitung immer ungleichmäßiger wird, dringen dann in ruckweisen, nach jeder halben Periodendauer stattfindenden Verschiebungen von Knoten zu Knoten durch das Röhreninnere, um sich von der rückwärtigen Öffnung aus in derselben Weise auszubreiten und wieder gleichmäßige Fortpflanzung anzunehmen.

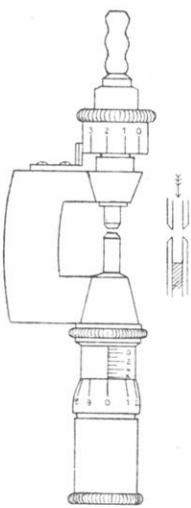

Fig. 74.

Von der Verstärkung abgestimmter Töne in der Nähe der Resonatoröffnungen macht man zur Beobachtung schwacher Töne und der Obertöne eines Klanges Gebrauch.

338. *Die Galtonpfeife. Obere Hörgrenze.* Die höchsten Töne, die man kennt, werden durch eine kleine Pfeife hervorgerufen, die in einem kurzen Röhrchen besteht, das an einem Ende geschlossen ist, an dem anderen Ende einen scharfen Rand hat, gegen welchen ein Luftstrom gerichtet wird. Man bestimmt die Wellenlänge dieser Töne mit Hilfe von kleinen Resonanzröhrchen und Kundtschen Staubfiguren (346). Die Periodenzahl der Töne dieser Pfeife (Fig. 74) ist für die Länge von

cm	2	0,5	0,1	0,02
sec^{-1}	3500	12000	33000	50000

Die Hörgrenze liegt bei verschiedenen Personen verschieden hoch, meist zwischen 25000 bis 50000 sec^{-1}. Es ist kein Zweifel, daß es Vorgänge gibt, die ihren objektiven Eigenschaften nach den Namen Schallwellen verdienen, aber noch kürzere Wellenlänge haben und keine Gehörsempfindungen erwecken.

339. *Scharfe Schallschatten.* Die zischenden Schallquellen senden ebenfalls besonders hohe Töne aus (z. B. zischende Flammen, Wasserfälle, Wehren). Ein in ein solches Schallfeld gebrachter Schirm wirft einen scharf begrenzten Schallschatten, welcher dieselbe Form hat wie der optische Schatten den derselbe Schirm werfen würde, wenn die Schallquelle Licht aussenden würde. Es ist dies eine wesentlich von der kleinen Wellenlänge dieses Schalles abhängende Ausbreitungsform. Tiefere Töne kann man sehr gut um die Ecke hören (Beugung des Schalles).

---

15. Vibroskopie.

340. Viele Tonquellen, z. B. Saiten, Glocken, Stimmgabeln befinden sich während des Tönens in sehr raschen Schwingungen, die man oft deutlich sehen und fühlen kann. Deshalb vermutet man schon von alters her, daß der Schall eine periodische Bewegungsform der Luft ist (mechanistische Theorie des Schalles).

Tatsächlich bestehen deutliche Beziehungen zwischen Schall und Bewegungsvorgängen.

Mit dem Eintreffen des Knalles einer heftigen Explosion werden Fensterscheiben nach innen gebogen und auch gesprengt. Alle Aneroidbüchsen werden in diesem Augenblicke stark komprimiert und die Quecksilbersäule der Barometer heftig emporgetrieben. Bei der stärksten Explosion, von welcher Nachrichten vorliegen, bei welcher ein großer Teil des Vulkans Krakatau abgerissen wurde und ins Meer fiel, war der Knall tausend Kilometer weit hörbar. Die sämtlichen Barometer zeigten das Eintreffen dieses Knalles an. Derselbe pflanzte sich mehrmals um die ganze Erde fort, wobei sich zeigte, daß die Fortpflanzung von Ost nach West langsamer als von West

nach Ost war, was nicht durch die in höheren Luftschichten nur um ein geringes größere absolute Geschwindheit der Luft, sondern wohl durch die Passatwinde bewirkt wurde.

Empfindliche Aneroide zeigen einen Knall an, der ganz unhörbar schwach ist. Eine Büchse, welche durch eine zarte Kautschukmembran geschlossen ist, deren Durchbiegung ein Fühlhebel sichtbar macht (Fig. 75), ist hierfür sehr verwendbar. Das Mittelohr bildet selbst einen solchen Tambour. Das Trommelfell biegt sich im Augenblick des Eintreffens eines Knalles nach innen und die Gehörknöchelchen übertragen diese Bewegung auf die Membran der Schnecke, in welcher die Gehörsnerven endigen.

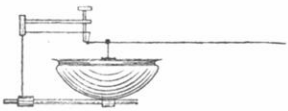

Fig. 75.

341. Die Aneroide zeigen die Kompression der Luft an. Schließt man eine Röhre einerseits durch eine Membran andererseits durch einen Kolben und verkleinert das eingeschlossene Luftvolum durch Einschieben des Kolbens, so

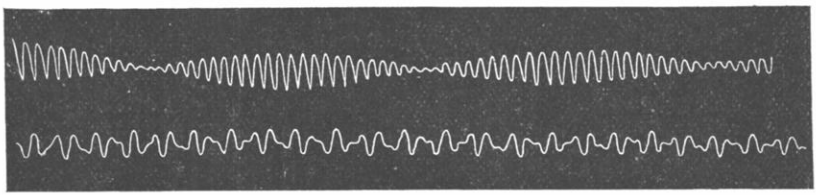

Fig. 76 (nach Melde).

wölbt sich die Membran vor. Der skalare Schallzustand besteht also in der Kompression bzw. Dilatation des Mediums.

Stellt man einer Tonwelle einen Schalltrichter entgegen, welcher durch eine Membran abgeschlossen ist, so gerät diese in regelmäßige Schwingungen, welche die periodischen Veränderungen der Luft in dem Schalltrichter anzeigen. Man kann die Schwingungen der Membran durch einen Fühlhebel übertragen und das Ende desselben auf einer berußten, gleichmäßig gedrehten Trommel schreiben lassen, und erhält dann eine sehr regelmäßig periodische Linie (Fig. 76) aufgezeichnet,

aus welcher sich die Schwingungsdauer des Tones leicht erkennen läßt (Phonautograph von König).

342. Man kann diesen Vorgang umkehren, was auf die direkteste Weise der Edisonsche Phonograph (Fig. 77) leistet. Versetzt man den Fühlhebel und damit die Membran auf irgend eine mechanische Weise in Schwingungen, so wird die Luft in dem Trichter periodisch komprimiert und dilatiert und derselbe bildet eine Tonquelle.

Es kann dies geschehen durch eine schwingende Stahlfeder oder Stimmgabel, deren Zinken auf die Membran drücken, oder durch eine schwingende Saite, deren Steg man auf die

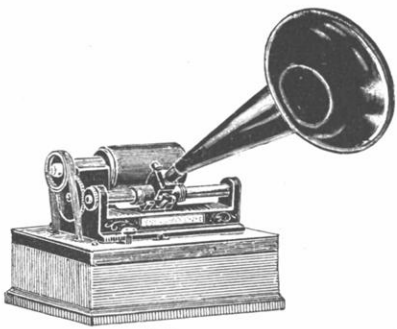

Fig. 77.

Membran stellt. Alle diese vibrierenden Körper sind für sich nicht imstande eine laute Tonwelle auszusenden, sondern müssen auf größere elastische Flächen wirken (Resonanzkästen), welche Lufträume umschließen. Die Glocken umschließen selbst einen Resonanzraum und tönen deshalb so kräftig.

343. *Der Schallvektor.* Die abwechselnden Kompressionen und Dilatationen der Teile des Mediums in einer Schallwelle setzen longitudinale schwingende Bewegungen der Luftteile voraus. Der Schallvektor ist also die Geschwindheit der Teile des Mediums, der Schall eine sehr charakteristische Bewegungsform, welcher alle Gase, Flüssigkeiten und festen Körper fähig sind.

Die Gebläsesirenen (Fig. 78), welche einen intermittierenden Luftstrom aussenden, sind nun als vektorische Schallquellen (337.) verständlich.

344. *Vibroskopie.* Das einfachste Mittel, um die für die Elastizitätstheorie sehr wichtigen Schwingungsformen tönender Körper zu untersuchen, ist die Phonautographenwalze, auf welcher die schwingenden Körper direkt eine Wellenlinie aufzeichnen. Sehr ähnlich, aber zu feineren Messungen verwendbar, sind die rotierenden Spiegel (Fig. 79). Ist an einem schwingenden Körper ein helleuchtender oder weißer Punkt angebracht, und betrachtet man denselben in einem Spiegel, welcher um eine zur Schwingungsrichtung dieses Punktes parallele Achse rotiert, so sieht man eine leuchtende Wellenlinie, aus deren

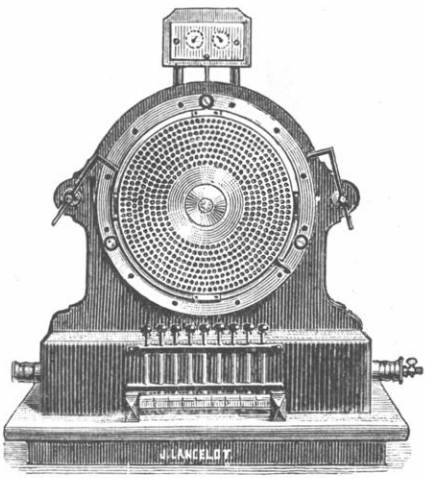

Fig. 78.

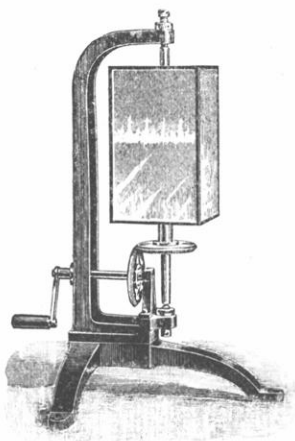

Fig. 79.

Gestalt man die Schwingungsform dieses Punktes erkennen kann. Die Biegungsschwingungen eines elastischen Stabes erfolgen z. B. sinusförmig. Die Schwingungen einer gestrichenen Violinsaite erfolgen aber so, daß sich jeder ihrer Punkte mit gleichförmiger periodisch das Vorzeichen wechselnder Geschwindigkeit hin und her bewegt (Helmholtz). Zu diesen Beobachtungen kann auch statt des rotierenden Spiegels ein um dieselbe Achse schwingender Spiegel oder eine senkrecht zu dieser Achse schwingende Linse (Mikroskopobjektiv) dienen. Es ist dies die Methode der Kombination der zu untersuchenden Schwingung mit einer bekannten, zu ihr senkrechten Schwingung. Es ist notwendig, daß diese beiden Schwingungen

gleiche oder in einfachem Verhältnis stehende Schwingungszahlen haben. Das Vibrationsmikroskop von Helmholtz (Fig. 80) besteht aus einer Stimmgabel, deren Zinke das Mikroskopobjektiv trägt. Man betrachtet durch dieses Mikroskop ein weißes Stärkekorn, welches auf dem zu untersuchenden Körper klebt, z. B. auf einer Saite. Ist die Saite ruhig und schwingt die Stimmgabel des Vibroskops, so erscheint der weiße Punkt

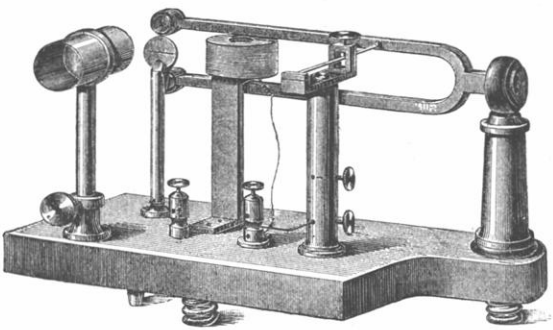

Fig. 80. Vibrationsmikroskop nach Weinhold.

in eine Gerade ausgezogen. Schwingt die Saite in der hierzu senkrechten Richtung und ist die Stimmgabel in Ruhe, so erscheint der weiße Punkt in eine zur ersten senkrechte Gerade ausgezogen. Schwingen beide Tonquellen mit derselben Schwingungsdauer, so erscheint der weiße Punkt zu einer Lissajousschen Kurve ausgezogen. Diese Kurve hat eine der Formen (Fig. 81, a, b), wenn die horizontale Schwingung eine gleichförmige Saitenschwingung, die vertikale eine sinusförmige Biegungsschwingung ist. Sind beide untersuchten Schwingungsformen sinusförmig, so ist die Kombinationskurve eine Ellipse, wenn sie gleiche Schwingungszahl haben, hingegen eine Parabel oder Lissajoussche Achter-

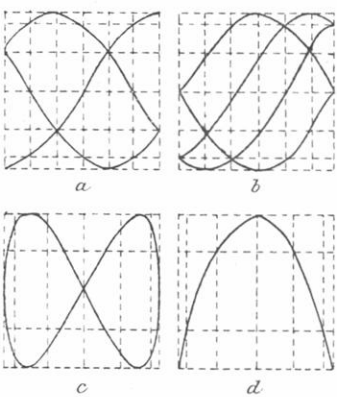

Fig. 81.

linie (Fig. 81, c, d) für das Verhältnis 1 : 2 der Schwingungszahlen usw.

Man kann auch an zwei schwingenden Körpern kleine Spiegel so anbringen, daß sie Drehschwingungen um Achsen ausführen, welche aufeinander senkrecht stehen, und dann einen Lichtstrahl von beiden Spiegeln reflektieren lassen. Eine Linse entwirft von der kleinen Öffnung des Diaphragmas, durch welches das zweimal reflektierte Licht gegangen ist, ein Bild auf einen Schirm. Dieser helle Punkt beschreibt während der Schwingungen der beiden Spiegel eine Lissajoussche Kurve, aus deren Gestalt man auf die Schwingungsform beider Körper schließen kann.

345. *Stroboskopische Methoden.* Beleuchtet man den Beobachtungsraum durch sehr kurz dauernde, in regelmäßigen Intervallen aufeinanderfolgende Lichtblitze, so sieht man einen mit genau derselben Periode schwingenden Körper stets in derselben Phase, z. B. eine schwingende Stimmgabel mit stets zusammengebogenen oder stets auseinandergebogenen Zinken. Ist aber die Periode des schwingenden Körpers ein wenig kürzer, so sieht man ihn in den aufeinanderfolgenden Lichtblitzen in immer mehr vorgerückter Schwingungsphase. Ist die Zahl der Lichtblitze in der Sekunde n, und die Schwingungszahl eines Körpers m, so kommt es $(m - n)$mal in der Sekunde vor, daß der Körper in der anfänglichen Phase gesehen wird. Er scheint also mit der kleinen Schwingungszahl $(m - n)$ zu schwingen, so daß man seine Deformationen deutlich verfolgen kann. Man kann diese Lichtblitze durch eine regelmäßige Folge elektrischer Funken erzeugen, oder indem man die beiden Ränder eines Spaltes, durch welchen Licht fällt, mit den Zinken einer Stimmgabel verbindet, so daß sich der Spalt während jeder Schwingung der Stimmgabel nur kurze Zeit öffnet. Die Stimmgabel in Fig. 80 ist auch zu diesem Gebrauche eingerichtet. Am einfachsten stellt man vor der Lichtquelle eine rotierende undurchsichtige Scheibe auf, deren Rand eine regelmäßige Reihe von Löchern trägt. Je nachdem sich diese Scheibe langsamer oder rascher dreht, sieht man jeden in dem so beleuchteten Zimmer schwingenden Körper scheinbar langsamer oder rascher in der einen oder anderen Richtung schwingen. Statt das Zimmer so zu be-

leuchten, kann man auch die stroboskopische Scheibe im gleichmäßig erhellten Zimmer rotieren lassen, muß aber dann das Auge hinter dieselbe stellen und durch die vorbeiziehende Löcherreihe auf den schwingenden Körper blicken.

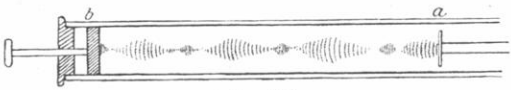

Fig. 82.

346. *Vibroskopische Untersuchungen tönender Luftsäulen.* Ein einfaches Mittel, das Auftreten stehender Wellen in einer Luftsäule (Pfeife oder Resonator) zu konstatieren, sind die Kundtschen Staubfiguren (Fig. 82), welche feiner Korkstaub am Boden einer horizontalen Glasröhre bildet, wenn die von derselben eingeschlossene Luft in stehende Schwingungen gerät. Durch Einschieben des Stöpsels *b* wird die Länge der Röhre auf ein ungerades Vielfaches einer Viertelwellenlänge des zu untersuchenden Tonfeldes gebracht. Nach erreichter Abstimmung treten die Staubfiguren auf und bleiben

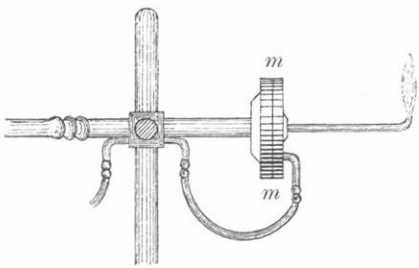

Fig. 83.

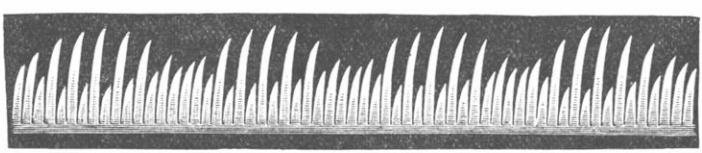

Fig. 84 (nach Melde).

auch nach dem Aufhören der Schallschwingungen bestehen, werden jedoch durch fortschreitende Schallwellen oder unregelmäßige Luftschwingungen in der Röhre wieder zerstört. Ferner kann man an der Wand des Rohres Membranen anbringen

und deren Schwingungen beobachten. Vielfach verwendbar sind die Königschen Brenner (Fig. 83), bei welchen die Membrane *m* mit ihrer äußeren Seite an eine Leuchtgasleitung grenzt. Man erkennt die Schwingung der Membrane an dem periodischen Zucken der Leuchtgasflamme. Die Schwingungen der Flamme kann man stroboskopisch oder mittels eines rotierenden Spiegels beobachten und erhält dann ein Bild nach Art der Fig. 84. Beispielsweise dienen bei der Quinckeschen Interferenzröhre (Fig. 73) Königsche Brenner zur Beobachtung der austretenden Schallwellen.