IX.

Akustisch-physiologische Untersuchungen

mit Demonstration.

(Vortrag gehalten am 22. September 1886 in der otiatrischen Section der Naturforscherversammlung zu Berlin.)

Von

Dr. H. Dennert

in Berlin.

Die Lehre von den Interferenzerscheinungen der Schallwellen, „der Intermittenzen, Schwebungen und Combinationstöne“, hat nicht allein ein physikalisches Interesse, sie ist auch, wie wir sehen werden, von principieller Bedeutung für die Physiologie des Gehörorganes. Es kann deshalb für den Ohrenarzt nicht gleichgültig sein, wenn auf diesem Gebiete bei den verschiedenen Autoren noch Meinungsdivergenzen principieller Natur, sowohl über die physikalischen Vorgänge innerhalb der Wellenbewegungen bei der Combination zweier Töne, wie namentlich über die Art der Auslösung der combinirten Bewegung im Gehörorgane bestehen, weil Hand in Hand mit den geläuterten Kenntnissen über die physiologischen Vorgänge in einem Organe auch das diagnostische und therapeutische Können geht. Es wird im Gegentheil wünschenswerth sein, diese Frage wieder in Anregung und nach der einen oder der anderen Seite zum Austrag zu bringen. Ich habe mich bereits bei Gelegenheit eines Vortrages in der physiologischen Gesellschaft mit dieser Frage im Allgemeinen beschäftigt und will mich in meinem heutigen Vortrage specieller nur mit der einen Seite der in Rede stehenden Frage, nämlich mit der Entstehung der Combinationstöne, beschäftigen, derjenigen Töne, welche entstehen, wenn zwei musikalische Töne von verschiedener Höhe gleichzeitig, stark und gleichmässig anhaltend angegeben werden. Zwei Theorien stehen

sich in Bezug auf ihre Entstehung diametral gegenüber. Nach der Theorie der Einen, darunter Thomas Young, Scheibler u. A., entstehen dieselben aus Schwebungen, resp. Stößen, welche aus der Interferenz zweier einfachen Töne verschiedener Höhe resultiren. Solche Schwebungen, resp. Stösse sollten, ebenso wie es ebenso viele einfache Luftstösse thun würden, wenn sie mit einer gewissen Schnelligkeit aufeinanderfolgen, die Empfindung eines Tones hervorrufen, welcher Differenzton, resp. Stosston von ihnen genannt wurde. Die andere Theorie wird von Helmholtz vertreten.

Er bestreitet die Entstehung der Combinationstöne aus Schwebungen, resp. Stößen principiell und zeigt durch die mathematische Theorie, dass einmal Combinationstöne entstehen müssen, wenn die Entfernung der schwingenden Theile aus ihrer Gleichgewichtslage so gross wird, dass die Kraft, welche sie zurückzuführen strebt, nicht mehr einfach jener Entfernung proportional ist, sondern dass noch das Quadrat der Verschiebung auf die Bewegung Einfluss erhält. Helmholtz ¹⁾ betrachtet für diesen Zweck die Bewegung eines Massenpunktes unter dem Einflusse eines Wellenzuges. Oscillirt ein Punkt von der Masse m in der Richtung der x -Axe, ist die Kraft, welche ihn in seine Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt, nicht bloß abhängig von der ersten Potenz, sondern auch von der zweiten Potenz der Elongation, also

$$k = ax + bx^2$$

und wirken auf ihn zwei Schallwellenzüge mit der Kraft $f \sin(pt)$ und $g \sin(qt + c)$, so ist die Bewegungsgleichung desselben

$$-m \frac{d^2 x}{dt^2} = ax + bx^2 + f \sin(pt) + g \sin(qt + c).$$

Die Integration dieser Gleichung durch eine Reihe ergibt:

$$x_1 = A \sin \left(t \sqrt{\frac{a}{m}} + b \right) + u \sin(pt) + v \sin(qt + c),$$

$$\text{wo } u = \frac{f_1}{mp^2 - a} \text{ und } v = \frac{g_1}{mq^2 - a}.$$

Dieses Resultat gilt für unendlich kleine Schwingungen, in welchem Falle der mitschwingende Körper nur seinen eigenen Ton $\sqrt{\frac{a}{m}}$ und die ihm mitgetheilten p und q angiebt.

1) Wissenschaftliche Abhandlung. I. Bd. S. 260.

$$\begin{aligned}
 x_2 = & -\frac{b}{2a} (u^2 + v^2) - \frac{u^2}{2(4mp^2 - a)} \cos(2pt) - \\
 & \frac{v^2}{2(4mq^2 - a)} \cos^2(qt + c) + \frac{u \cdot v}{m(p - q) - a} \cos[(p - q)t - c] - \\
 & \frac{uv}{m(p + q)^2 - a} \cos[(p + q)t + c].
 \end{aligned}$$

In dem zweiten Gliede der Reihe von x erhält man also die Töne $(p - q)$ und $(p + q)$ oder die in Rede stehenden Combinationstöne. Wie man sieht, ergiebt die mathematische Theorie ausser dem schon vorher bekannten Differenzton $(p - q)$ auch den Ton $(p + q)$, welcher von Helmholtz Summationston genannt wird.

Aus der Annahme, welche von Helmholtz über die Grösse der wirkenden Kraft gemacht wird

$$k = ax + bx^2$$

folgt, dass bei einem Zeichenwechsel von x , k nicht nur sein Zeichen, sondern auch seinen absoluten Werth ändert, und es würde eine solche Annahme nur Anwendung finden können auf einen Körper, der sich gegen positive und negative Verschiebungen nicht symmetrisch verhält. Helmholtz vermuthet nun, dass die Form des Trommelfells, welches sich durch seine Asymmetrie auszeichnet, namentlich die Entstehung von Combinationstönen begünstige. Ich habe nun Patienten ohne Trommelfell, auch solche ohne Trommelfell, Hammer und Amboss, mit nur erhaltenem Steigbügel, auf dieses Verhalten hin geprüft und gefunden, dass sie ebenfalls Combinationstöne hören. Das spricht ja nicht gegen die eben angeführte mathematische Theorie; doch möchte ich dieses Verhalten bei dieser Gelegenheit wenigstens erwähnen.

Helmholtz ¹⁾ zeigt ferner durch die mathematische Theorie, dass Combinationstöne auch bei unendlich kleinen Schwingungen entstehen können, und will sie auch in solchen Fällen objectiv durch abgestimmte Membranen und Resonatoren nachgewiesen haben. Bedingung ist, dass dieselbe Luftmasse von beiden Tönen in starke Erschütterung versetzt wird. Es ist dies der Fall der mehrstimmigen Sirene. Werden zwei Löcherreihen der rotirenden Scheibe aus demselben Windkasten gleichzeitig angeblasen, so wird die im Windkasten enthaltene Luftmasse entsprechend den beiden Tönen in Schwingung versetzt und die Masse q der dabei entweichenden Luft wird dann von der Form:

1) Tonempfindungen. Beilage XVI.

$$q = cAP[1 - \sin 2\pi nt - \sin 2\pi mt - \frac{1}{2} \cos 2\pi(m+n)t + \frac{1}{2} \cos 2\pi(m-n)t].$$

Ausser den beiden den zwei gleichzeitig angeblasenen Löcherreihen der Sirene entsprechenden Tönen m und n resultiren noch die beiden Combinationstöne $m+n$ und $m-n$.

Auch in einem anderen Versuche können, wie Helmholtz (l.c.) durch die mathematische Theorie gezeigt hat, Combinationstöne entstehen. Er beobachtete nämlich, dass der untere Kasten seiner Doppelsirene stark mitklingt, wenn die Gabel a' vor die untere Oeffnung derselben gehalten wird und die Löcher alle gedeckt sind, dass dieses aber nicht der Fall sei, wenn die Löcher einer Reihe offen sind. Wenn man nun die Sirenenscheibe in der Weise rotiren lässt, dass die Löcher abwechselnd offen und gedeckt sind, so entsteht eine Resonanz der Stimmgabel von periodisch wechselnder Stärke. Giebt n die Schwingungszahl der Gabel an, m die Zahl, wie oft ein einzelnes Loch des Kastens geöffnet wird, und setzt man die Stärke der Resonanz gleich

$$1 - \sin 2\pi mt$$

so wird die Schwingungsbewegung der Luft von der Form

$$(1 - \sin 2\pi mt) \sin 2\pi nt = \sin 2\pi nt + \frac{1}{2} \cos 2\pi(m+n)t - \frac{1}{2} \cos 2\pi(m-n)t.$$

Es resultiren also neben dem Ton der Stimmgabel noch die beiden Combinationstöne $m+n$ und $n-m$.

In der Mitte der genannten Autoren stehen nun diejenigen, welche die Entstehung der Combinationstöne nach beiden Theorien zulassen. Dazu gehören König, Preyer, und ich habe mich in meiner Mittheilung in der physiologischen Gesellschaft auch dahin ausgesprochen. Da Helmholtz aber principiell die Entstehung der Combinationstöne aus Schwebungen, resp. Stössen nicht gelten lässt, so handelt es sich um die Entscheidung der Frage: Entstehen Combinationstöne aus Schwebungen, resp. Stössen oder entstehen sie nicht aus Schwebungen, resp. Stössen?

Helmholtz macht nun gegen die Theorie der Entstehung der Combinationstöne aus Schwebungen, resp. Stössen zunächst geltend, dass sie nicht die Entstehung der Summationstöne erkläre. Dieser Einwand ist nun nicht einwurfsfrei, da, wie bereits auch von König, Appunn und Preyer darauf aufmerksam

gemacht worden ist, sich Combinationstöne sehr wohl als Differenztöne zweiter Ordnung, resp. auch als Differenztöne von Obertönen erklären lassen. Combinirt man z. B. zwei Töne m und n , von denen n der höhere ist, so giebt der erste Oberton von n , $2n$ mit dem Differenzton erster Ordnung $n-m$ den Differenzton zweiter Ordnung $2n - (n - m) = m + n$ oder den Summationston der beiden Töne. Ebenso geben z. B., wenn man zwei Töne im Verhältniss der Quinte, z. B. klein c mit 132 und klein g mit 198 Schwingungen als Grundtöne annimmt, die vierten Obertöne derselben, welche 5 mal so viel Schwingungen als der Grundton machen, also die Töne e^2 mit 660 und h^2 mit 990 Schwingungen, den Differenzton e^1 mit 330 Schwingungen, welcher gleich dem Summationston der beiden Grundtöne ist.

Dem zweiten Einwande von Helmholtz gegenüber, dass die Combinationstöne objectiv, unabhängig vom Ohr, welches die Schwebungen, resp. Stösse zu einem neuen Ton addiren soll, existiren, ist entgegenzuhalten, dass die objective Existenz derselben von ihm mittelst abgestimmter Membranen in Sirenenversuchen constatirt werden konnte, welch' letztere sich für derartige Versuche nicht eignen. Einmal haben bekanntlich Sirenen sehr viele Obertöne, und müsste der Beweis dafür, dass die sich nach der mathematischen Theorie ergebenden Combinationstöne auch so stark sind, dass sie sich objectiv in der angegebenen Weise nachweisen lassen, unabhängig von den Obertönen geführt werden. Dann aber ist auch nach Terquem¹⁾ bei der Sirene von Helmholtz, „wenn 2 oder 3 Oeffnungen gleichzeitig geöffnet sind, die Erschütterung nicht das Doppelte oder Dreifache von dem, was sie sein würde, wenn sie jede einzeln geöffnet wären, so dass also in den meisten Fällen die so kräftigen Combinationstöne, die man hört, derselben Ursache ihre Entstehung verdanken, welche sie in der Sirene von Opelt entstehen lässt, nämlich dem Umstande, dass in dem Momente der Coincidenz die totale Erschütterung nicht gleich ist der Summe der partiellen Erschütterungen, also der Beschaffenheit der für den Versuch angewandten Apparate“. König²⁾ wählte aus diesem Grunde schon Stimmgabeln für diesen Versuch und will gleichfalls die objective Existenz der Combinationstöne beobachtet haben.

1) Étude sur le Timbre des sons. p. 364.

2) Annalen der Physik und Chemie. Bd. CLVII.

Er schloss darauf aus den Schwebungen, welche er erhielt mit Stimmgabeln, welche er mit Rücksicht auf die zu eruirenden Combinationstöne abgestimmt hatte. Doch sind auch seine Beobachtungen nicht einwurfsfrei, weil er, worauf Preyer¹⁾ aufmerksam gemacht hat, zu wenig die Obertöne der Stimmgabeln bei seinen Untersuchungen berücksichtigt hat. Dagegen ist es Preyer, der sich sehr eingehend mit dieser Frage beschäftigt hat, in keiner Weise, namentlich auch nicht mittelst sehr fein abgestimmter Stimmgabeln auf Resonanzkästen gelungen, die objective Existenz der Combinationstöne nachzuweisen. — Das Mithören einzelner Differenzgabeln, resp. die Schwebungen, welche er bei der Combination verschiedener Stimmgabeln erhielt, erwiesen sich als durch die Obertöne derselben bedingt.

Der dritte Einwand von Helmholtz gegen die Entstehung der Combinationstöne aus Schwebungen ist der, dass sich diese Theorie nicht mit dem durch alle übrigen Erfahrungen bestätigten Ohm'schen Gesetze vereinigen lasse, demzufolge nur einfache Schwingungen, bei welchen die einzelnen Lufttheilchen nach den Gesetzen des Pendels hin- und herschwingen, im Ohr die Empfindung eines Tones hervorrufen, und wonach jede zusammengesetzte Bewegung, welche als Klang empfunden wird, sich in eine Reihe einfacher pendelartiger Bewegungen auflösen lässt. Dieser Einwand ist meiner Meinung nach der wichtigste, weil er von principieller Bedeutung für unsere heutigen Anschauungen über den Vorgang beim Hören ist. Es würde nämlich das Ohm'sche Gesetz durchbrochen sein, und es würde dem Gehörorgane eine weitere neue Eigenschaft vindicirt werden müssen, wenn der Nachweis geführt werden könnte, dass auch andere als einfach pendelartige Bewegungen im Gehörorgan die Empfindung eines Tones hervorzurufen im Stande wären, wie dieses für die Theorie der Entstehung der Combinationstöne aus Schwebungen supponirt werden müsste.

Versuche nach dieser Richtung hin sind nun schon von König gemacht worden und in bejahendem Sinne ausgefallen. Er führte diese Versuche in einer zweifachen Weise aus.

Einmal liess er eine Sirenscheibe von bestimmter Configuration in Bezug auf die Entfernung der einzelnen Löcher von einander zu dem Durchmesser der letzteren vor einer tönenden Stimmgabel rotiren, so dass also der Ton der Stimmgabel inter-

1) Akustische Untersuchungen. 1879.

mittirend in das Ohr des Beobachters gelangte. König (l. c.) hörte dann einen sogenannten Intermittenzton, dessen Schwingungszahl gleich ist der Anzahl der Löcher, welche in einer Secunde vor der Stimmgabel vorbeigehen. Bedingung bei dem Versuche ist, dass während der Rotation mindestens eine ganze Tonwelle durch jedes Loch der rotirenden Scheibe in das Ohr des Beobachters gelangt.

In einem zweiten Versuche benutzte er Sirenscheiben mit Kreisen, auf welchen die Löcher gleichen Abstand von einander hatten, aber periodisch an Grösse zu- und abnahmen, so dass also ein Ton von periodisch wechselnder Intensität in das Ohr des Beobachters gelangt, wenn die Löcher mit einer Röhre von dem Durchmesser der grössten Löcher angeblasen werden. Es resultirte dann ein Ton, welcher in Bezug auf seine Schwingungszahl der Anzahl der periodischen Intensitätsschwankungen in einer Secunde entsprach.

König hat nun vielleicht als Physiker zu wenig die physiologische Wichtigkeit und Bedeutung dieses dritten Einwandes hervorgehoben und vielleicht auch aus demselben Grunde diese Frage nicht in dem Umfange behandelt, wie es wünschenswerth gewesen wäre. Aus diesem Grunde habe ich diese Frage von Neuem in Angriff genommen, die Versuche von König wiederholt und neue hinzugefügt, weil auch die Verschiedenartigkeit der Versuche, wenn sie zu demselben Resultat führen, zur Erhärtung der in Rede stehenden Frage beiträgt. Dann habe ich mich auch sowohl in den König'schen wie in meinen eigenen Versuchen durch Controlmethoden zu vergewissern gesucht, dass die bei diesen Versuchen resultirenden Töne in Bezug auf ihre Schwingungszahl genau der Anzahl der Intermittenzen, resp. der periodischen Intensitätsschwankungen entsprachen, welche nach dem Gange des Versuches für sie supponirt werden musste. Schliesslich habe ich auch die Möglichkeit einer anderen Entstehungsweise der in Rede stehenden Töne im Sinne des Ohm'schen Gesetzes einer Discussion unterworfen und namentlich dabei die Helmholtz'schen Theorien in Betracht gezogen.

Um nun einen sogenannten Intermittenzton zu erzeugen, wählte ich nach König unter anderen eine Sirenscheibe mit 32 Löchern von 1 Cm. Durchmesser und 3 Cm. Abstand von einander, und zwar eine Messingscheibe, weil eine Pappsirene infolge ihrer stärkeren Reibung an der Luft sehr störende Nebengeräusche macht. Meine Treibmaschine für die Sirene bewirkt

bei einer Umdrehung der Kurbel 6 Umdrehungen der Sirenscheibe, resp. bei 2 Umdrehungen der Kurbel, die ich in einer Secunde ausführen kann, 12 Umdrehungen der Sirenscheibe, so dass also $12 \times 32 = 384$ Löcher in der Secunde vor der schwingenden Stimmgabel und dem Ohr des Beobachters vorbeikommen, wenn man die Rotationsgeschwindigkeit bis zu diesem Grade steigert. Von Stimmgabeln wählte ich c^2 mit 528 Schwingungen, c^3 mit 1056 und c^4 mit 2112 Schwingungen, so dass bei schnellster Umdrehung der Sirenscheibe, von 12 Umdrehungen in der Secunde, schon bei Anwendung der Stimmgabel für den tiefsten der drei genannten Töne, des c^2 , mehr als eine Schwingung, bei Anwendung von c^3 und c^4 aber mehrere Schwingungen intermittirend in das Ohr des Beobachters gelangen. Benutzt man nun z. B. c^2 für den Versuch, so beobachtet man in Bezug auf die in Rede stehende Frage Folgendes: Bei langsam zunehmender Umdrehung der Scheibe hört man den Ton der Stimmgabel zuerst langsam, dann schneller intermittirend; es machen diese Intermittenzen den Eindruck von Schwebungen auf das Ohr. Bei zunehmender Rotationsgeschwindigkeit hört man neben den immer schneller werdenden Intermittenzen einen tiefen Ton, der bei einer Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit der Sirenscheibe bis zu 12 Umdrehungen in der Secunde bis zu der Höhe des eingestrichenen g ansteigt, während der Ton der Stimmgabel seinen zuerst intermittirenden Charakter verliert, dann einen rauhen Beiklang bekommt, um schliesslich als ein ruhig hinfließender Ton neben dem tiefen Ton empfunden zu werden. Vermindert man nun allmählich die Rotationsgeschwindigkeit der Sirenscheibe, so nimmt der Ton der Stimmgabel zuerst wieder einen rauhen Charakter an, wird dann zuerst schneller, dann langsamer intermittirend, während der gleichzeitig gehörte Ton immer mehr an Tiefe zunimmt, um schliesslich unter den langsamer werdenden Intermittenzen zu verschwinden. Dass der bei diesem Versuche resultirende tiefere Ton in Bezug auf seine Schwingungszahl genau der Anzahl der Intermittenzen entspricht, davon kann man sich durch folgenden Controlversuch überzeugen. Es muss dieser Ton, wenn die Theorie richtig ist, in jedem Momente des Versuches von gleicher Höhe sein wie der Ton, welchen man erhält, wenn man in demselben Momente diese Löcherreihe einfach mit einem Rohr oder Schlauch anbläst. Dieses ist nun auch der Fall, wie man sich sehr leicht überzeugen kann, wenn man während des Versuches den Intermittenzton mit dem bei

derselben Rotationsgeschwindigkeit durch Anblasen erzeugten Ton vergleicht.

Aus der zweiten Reihe der König'schen Versuche, durch den periodischen Intensitätswechsel eines Tones einen neuen Ton zu erzeugen, wählte ich die schon vorher kurz berührte Anordnung. Eine Sirene mit 3 Kreisen von 96 gleichabstehenden Löchern, welche auf dem ersten 16mal von 1—6 Mm. zu- und abnahmen, auf dem zweiten 12mal und auf dem dritten 8mal, wurde mit einer Röhre von 6 Mm. Durchmesser angeblasen. Man hörte nun auf allen 3 Kreisen bei langsamer Umdrehung Stösse, die bei zunehmender Rotationsgeschwindigkeit in Töne übergingen. Die drei resultirenden Töne stehen in jeder Phase des Versuches, ganz entsprechend den 16, 12 und 8 Löcherperioden, im Verhältniss von $1 : \frac{3}{2} : 2$ zu einander, so dass also, wenn der tiefste der drei Töne, der den 8 Löcherperioden entsprechende Ton, die Höhe des C der grossen Octave erreicht hat, die drei Töne C, G, c neben g'', dem Tone, welcher den 96 Löchern in dieser Phase des Versuches entspricht, gehört werden. Man kann sich nun auch durch folgenden Controlversuch überzeugen, dass die drei resultirenden Töne in Bezug auf ihre Schwingungszahl in jeder Phase des Versuches der Anzahl der Löcherperioden entsprechen. Wenn man nämlich auf Kreisen unterhalb der Kreise mit den Löcherperioden und entsprechend den einzelnen Perioden ebenso viele Löcher anbringen lässt, also entsprechend den 16, 12, 8 Löcherperioden 16, 12, 8 Löcher und nun abwechselnd einmal die Kreise mit den Löcherperioden und dann die Controlkreise anbläst, so wird man sich sehr leicht überzeugen, dass einmal die drei Töne jeder der beiden Tongruppen unter einander genau in demselben Verhältniss zu einander stehen und dass zweitens auch die correspondirenden Töne dieselbe Tonlage haben.

Diesen Versuchen von König habe ich nun neue hinzugefügt und zwar zunächst einen Stimmgabelversuch. Während einer Umdrehung einer tönenden Stimmgabel um ihre Axe beobachtet man ausser der bekannten Interferenzerscheinung, die ich aus verschiedenen Gründen für Versuche nicht in Anwendung gezogen habe, zwei Stellungen, in welchen dieselbe stark, und zwei Stellungen, in welchen sie schwächer gehört wird. Stark wird dieselbe nämlich gehört, wenn man die Branchen in der Richtung

ihrer Schwingungsebene vor das Ohr hält, schwächer in der dazu senkrechten Ebene. Dieses ist um so mehr der Fall, wenn in der ersten Richtung die dem Ohr zugekehrten Flächen der Branchen grössere Dimensionen haben als die dazu senkrechten Flächen. Die Ursache hiervon ist einfach die, dass der mechanische akustische Effect auf das Ohr in der Richtung der Schwingungsaxe der beiden Branchen ein intensiverer ist. Wir erhalten somit nach dem Gesagten bei einer Umdrehung der Stimmgabel zwei periodische Intensitätsschwankungen des Tones, und habe ich dieses Verhalten zu einem Versuche in der Richtung der in Rede stehenden Frage benutzt, nämlich durch periodische Intensitätsschwankungen eines Tones einen neuen Ton zu erzeugen. Von Stimmgabeln benutzte ich unter anderen c^2 und f^2 , und wurden dieselben mittelst einer am Griff der Stimmgabel befindlichen Schraubenmutter an einem Rotationsapparat befestigt. Die Anzahl der Umdrehungen der Stimmgabel in einer Secunde wurde mittelst einer am Rotationsapparate angebrachten Sirene mit einem Löcherkreis von beiläufig 60 Löchern bestimmt. Die Anzahl der Löcher dividirt in die Anzahl der Schwingungen des Tones, welchen man beim Anblasen der Sirene in irgend einer Phase der Rotationsgeschwindigkeit erhält, giebt die Anzahl der Umdrehungen der Stimmgabel in einer Secunde bei der betreffenden Rotationsgeschwindigkeit an. Bei der schnellsten Rotation, deren mein Apparat fähig ist, erhielt ich beim Anblasen der Sirene den Ton f^4 mit 2816 Schwingungen, das macht 46 Umdrehungen der Stimmgabel in der Secunde. Es musste dementsprechend bei zwei Intensitätsschwankungen des Tones während einer Umdrehung der Stimmgabel ein Ton resultiren, welcher von seiner ersten Hörbarkeit bis zum G der grossen Octave ansteigt, um dann bei nachlassender Rotationsgeschwindigkeit bis zu seinem Verschwinden an Höhe abzunehmen. Dieses wurde nun auch beobachtet und konnte durch folgenden Controlversuch auch bestätigt werden. Wenn man eine rotirende Stimmgabel mit einem Rohr oder einem Schlauch anbläst, so hört man bei langsamer Umdrehung derselben zwei Stösse; tönt dieselbe, so fallen diese zwei Stösse mit den zwei vorher schon erwähnten periodischen Intensitätsschwankungen zeitlich zusammen. Bei schnellerer Umdrehung der Stimmgabel gehen diese Stösse in einen Ton über. Beobachtet man nun während der Rotation der tönenden Stimmgabel abwechselnd den in Rede stehenden resultirenden Ton und den direct erzeugten Controlton in Bezug auf

ihre Tonlage, so überzeugt man sich leicht, dass sie genau in dieselbe Lage der Tonscala fallen.

Diesem Stimmgabelversuch habe ich nun eine Reihe von Versuchen an Sirenen folgen lassen. In meinem ersten Versuch liess ich auf einer Scheibe mit 3 Kreisen, welche in 96 gleiche Theile getheilt waren, die Löcher so ausschlagen, dass an den Theilungen immer alternirend auf dem ersten Kreise 4, auf dem zweiten 3 und auf dem dritten Kreise 2 Löcher ausgeschlagen wurden, während der anstossende Raum für die gleiche Anzahl Löcher undurchgeschlagen blieb, so dass also auf dem ersten Kreise 12 Piecen à 4 Löcher, auf dem zweiten 16 Piecen à 3 Löcher und auf dem dritten 24 Piecen à 2 Löcher vorhanden waren. Wurden nun diese Kreise während der Rotation der Scheibe angeblasen, so hörte man, ebenso wie in den früheren Versuchen, bei langsamer Umdrehung Stösse, die bei schnellerer Umdrehung in Töne übergingen, und zwar zuerst die Stösse der 24 Piecen, dann die der 16 und zuletzt die der 12 Piecen. Die Töne standen in jeder Phase des Versuches im Verhältniss von $1 : \frac{4}{3} : 2$, so dass man, wenn der tiefste der drei Töne die Höhe des kleinen c erreicht hatte, die 3 Töne in der Reihenfolge c, f, c' neben dem Ton c³, welcher der Eintheilung von 96 entsprach, hörte. Durch Controlltöne konnte man sich auch bei diesem Versuche in sehr überzeugender Weise vergewissern, dass die 3 Töne jeder der beiden Tongruppen sowohl unter einander in demselben Verhältniss standen, als auch, dass die correspondirenden Töne genau dieselbe Tonlage hatten.

Es wurde nun dieser Versuch in der Weise geändert, dass der der Eintheilung von 96 entsprechende Ton nicht intermittirend, wie in diesem Versuche, sondern periodisch seine Intensität ändernd, in das Ohr des Beobachters gelangte. Zu dem Zwecke wurden auf 3 Kreisen einer Scheibe je 96 Löcher so ausgeschlagen, dass bei gleichen Abständen auf dem ersten Kreise immer 2 grosse Löcher mit 2 kleinen, auf dem zweiten 3 grosse mit 3 kleinen und auf dem dritten 4 grosse mit 4 kleinen Löchern abwechselten.

Wurden nun diese 3 Kreise mit den resp. 24, 16, 12 Löcherperioden nach einander angeblasen, so resultirte, wie das von vorneherein erwartet werden musste, dasselbe wie in dem vorhergehenden Versuch. Man hörte neben dem Ton, welcher den 96 Löchern entsprach, 3 tiefere Töne, welche in jeder Phase des

Versuches im Verhältniss von $1 : \frac{4}{3} : 2$ standen, so dass man, wenn der tiefste der 3 Töne die Höhe vom kleinen *c* erreicht hatte, die 3 Töne wie in dem vorigen Versuch in der Reihenfolge von *c*, *f*, *c'* hörte.

Ich habe noch eine Reihe anderer Versuche immer mit demselben Resultate ausgeführt, doch halte ich es nicht für nothwendig, auf dieselben hier noch näher einzugehen, da die angeführten zur Discussion der in Rede stehenden Frage ausreichen.

Zunächst kann wohl nach den Ergebnissen dieser Versuche kein Zweifel mehr darüber bestehen, dass die in Rede stehenden Töne in Bezug auf ihre Tonlage, resp. ihre Schwingungszahl genau der Anzahl der Intermittenzen, resp. periodischen Intensitätsschwankungen eines Tones in jedem Momente des Versuches entsprechen. Eine andere Frage ist aber die, ob diese Intermittenzen, resp. periodischen Intensitätsschwankungen auch als solche und in ihrer Totalität und nicht durch eine Quote derselben die Ursache dieser Töne sind, oder ob doch nicht andere Wellenbewegungen in Frage kommen können, welche nicht im Widerspruch mit dem Ohm'schen Gesetze stehend die Empfindung der hier in Rede stehenden Töne hervorrufen. Da könnten nun zunächst Obertöne als hier intercurrirend in Betracht kommen. Abgesehen aber davon, dass es doch ein sonderbares Spiel des Zufalles sein würde, wenn immer gerade die Obertöne in den benutzten Tonquellen vorhanden wären, resp. in den Versuchen resultirten, welche in Bezug auf ihre Schwingungszahl der Anzahl der Intermittenzen, resp. periodischen Intensitätsschwankungen entsprächen, so liegen auch die bei den angeführten Versuchen resultirenden Töne alle tiefer als der Grundton der in diesen Versuchen in Frage kommenden Töne, was auch gegen eine solche Auffassung spricht. Auch in den Seebeck'schen¹⁾ Beobachtungen über Tonbildungen an der Sirene, wie namentlich in der Arbeit von Terquem (l. c.) über das Timbre der Töne, in welcher er unter Anwendung von Sirenen der verschiedensten Construction mit Hülfe der Fourier'schen Reihe die relativen Intensitäten der harmonischen Obertöne bestimmte, habe ich keine Erklärung für die in Rede stehenden Töne im Sinne des Ohm'schen Gesetzes gefunden. Von Obertönen kann also wohl keine Rede sein.

Es könnte nun aber die Frage entstehen, ob sich die in

1) Beobachtungen und Tonbildungen an der Sirene. *Annal. Pogg. T. LIII.* p. 417. 1841.

Rede stehenden Töne nicht nach einer der von Helmholtz für die Entstehung der Combinationstöne angegebenen mathematischen Theorien erklären liessen, und es käme da als sehr wichtig der an seiner Sirene gemachte Stimmgabelversuch und die darangeknüpfte mathematische Theorie in Betracht. Wir haben es auch in unseren Versuchen mit Tönen von periodisch wechselnder Stärke zu thun, und es könnten somit die Beobachtung von Helmholtz und seine Theorie gewissermaassen als Paradigma für die vorliegenden Beobachtungen dienen. Man kann sich nun aber leicht überzeugen, dass diese Theorie für die in Rede stehenden Töne nicht zutrifft, wenn man in einem der angeführten Versuche, z. B. in dem zuletzt angegebenen, einfach darauf hin beobachtet. Wählt man z. B. aus meinem zuletzt angeführten Versuche nur den einen Kreis von 12 Löcherperioden mit abwechselnd 4 grossen und 4 kleinen Löchern, so müsste man beim Anblasen derselben nach der Helmholtz'schen Theorie 3 Töne wahrnehmen können, nämlich entsprechend der Anzahl Löcher 96, und der Anzahl der periodischen Intensitätsschwankungen 12 die 3 Töne, welche in Bezug auf ihre Schwingungszahlen den Zahlen 96, $96 + 12$ und $96 - 12$ bei der betreffenden Rotationsgeschwindigkeit der Sirene entsprechen. Das ist nun nicht der Fall; man hört den Ton, welcher den 96 Löchern entspricht; von den Tönen, welche den Zahlen $96 + 12$ und $96 - 12$ entsprechen, hört man aber nichts. Statt der beiden Töne hört man nur einen Ton, und zwar einen Ton, welcher in Bezug auf seine Schwingungszahl der Anzahl der periodischen Intensitätsschwankungen, also der Zahl 12 in jeder Phase des Versuches entspricht, in jeder Phase in immer gleichbleibendem Verhältniss zu dem anderen der Anzahl der Löcher 96 entsprechenden, gleichzeitig gehörten Ton steht, niemals in Bezug auf seine Höhe mit demselben convergirt noch divergirt, sondern stets mit demselben parallel läuft. Somit kann auch diese Theorie nicht zur Erklärung der in Rede stehenden Tonempfindung im Sinne des Ohm'schen Gesetzes herangezogen werden. Die beiden anderen Theorien von Helmholtz können aber hier nicht in Frage kommen, und würde eventuell gegen sie nur dasselbe angeführt werden können. Es müssen somit die hier in Rede stehenden Töne als aus den Intermittenzen, resp. den periodischen Intensitätsschwankungen eines Tones, also nicht aus einfach pendelartigen Schwingungen resultirend, angesehen werden.

Zum Schluss möchte ich noch auf ein Moment zu Gunsten der in Rede stehenden Frage aufmerksam machen, das ist die Analogie, welche zwischen den in Frage stehenden Tönen und den aus einfach pendelartigen Bewegungen resultirenden Tönen besteht. Je regelmässiger eine Wellenbewegung ist, die von einer Schallquelle ausgeht, um so mehr und um so reiner wird der daraus resultirende Schall als Ton empfunden; je unregelmässiger dieselbe ist, um so mehr bekommt er den Charakter eines Geräusches. Dieses Gesetz gilt nun sowohl für die aus einfach pendelartigen Bewegungen resultirenden, wie für die in Rede stehenden aus Intermittenzen und periodischen Intensitätsschwankungen eines Tones resultirenden Töne, wie man sich durch folgende Versuche überzeugen kann. Wenn man auf dem Kreise einer Sirenen Scheibe eine beliebige Anzahl Löcher, z. B. 96, so ausschlagen lässt, dass die Entfernungen sämmtlicher Löcher von einander ungleich sind, so resultirt beim Anblasen derselben ein Schall, welcher je nach der Schnelligkeit der Rotationsbewegung an Höhe zu- oder abnimmt, im Uebrigen aber vollständig den Charakter eines Geräusches hat. Analoges beobachtet man nun auch in Bezug auf die in Rede stehenden Töne. Wenn man auf einem Kreise, der in 96 gleiche Theile getheilt ist, Löchergruppen so ausschlagen lässt, dass entweder bei gleicher Entfernung der Löchergruppen von einander die Zahl der Löcher einer jeden Gruppe eine verschiedene ist, oder dass bei gleicher Zahl der Löcher der einzelnen Gruppen die Entfernung der Gruppen von einander variirt, so resultirt nicht, wie in den angeführten Versuchen, ein Ton, sondern ein Schall mit dem Charakter eines Geräusches.

Ich resumire die Ergebnisse meiner Untersuchungen in folgende zwei Sätze:

1. Die bekannten mathematischen Theorien über die Entstehung der Combinationstöne, wie die gegen die Theorie der Entstehung der Combinationstöne aus Schwebungen gemachten Einwände sind nicht ausreichend, diese Theorie zu entkräften.
 2. Dem Gehörorgane muss ausser seinen bekannten Fähigkeiten eine weitere neue Eigenschaft zugesprochen werden, auch Bewegungen, die nicht einfach pendelartig sind, als Töne zu empfinden.
-