

(Aus dem physiologischen Institut der Universität Strassburg.)

Zur Physiologie des Labyrinths.

VII. Mittheilung.

Die Erzeugung von Schallbildern in der Camera acustica.

Von

J. Rich. Ewald.

(Mit 8 Textfiguren.)

Seit dem Erscheinen meiner Hörtheorie¹⁾ im Jahre 1899 sind mehrere Arbeiten, die denselben Gegenstand behandeln, erschienen. Eine ausführliche Besprechung derselben behalte ich mir für eine künftige Gelegenheit vor.

Hier möchte ich zunächst auf einen Umstand aufmerksam machen, der mir in den Kritiken, die meine Hörtheorie erfahren hat, aufgefallen ist. Es scheint nämlich den Physiologen und Akustikern, die von meiner Arbeit Kenntniss erhalten haben, nicht besonders bemerkenswerth gewesen zu sein, dass sich meine Hörtheorie auf experimentell gefundenen Thatsachen aufbaut, eine Eigenschaft, die sie vor allen anderen Hörtheorien auszeichnet. Ich vindicire der resonirenden Membran im Labyrinth Schwingungsformen, die ich experimentell an resonirenden Membranen gefunden habe. Die anderen Hörtheorien leiten dagegen aus den Thatsachen der Hörempfindungen theoretische Eigenschaften der Labyrinththeile ab, die noch Niemand an ähnlichen Gebilden beobachtet hat.

Freilich heben fast alle Besprechungen meiner Arbeit ausdrücklich hervor, dass in meinen Untersuchungen die Entdeckung einer neuen Schwingungsform elastischer Membranen enthalten ist. Da ein wesentlicher Theil des inneren Ohres aus einer dünnen Membran

1) Dies Archiv Bd. 76 S. 147. Als besondere Schrift im Verlag von Emil Strauss, Bonn 1899, erschienen.

E. Pflüger, Archiv für Physiologie. Bd. 93.

besteht, und da ja auch die Helmholtz'sche Resonanztheorie dieser Membran die Rolle des Schallaufnahme-Apparates zuschreibt, so hätte man erwarten sollen, dass sich das Interesse der Forscher vor allen Dingen dem Studium der Membranschwingungen hätte zuwenden sollen. Dies ist aber nicht geschehen, und so ist es gekommen, dass man die Fähigkeit schmalen, in einem Rahmen ausgespannter, bandförmiger Membranen, Schallbilder zu erzeugen, bei denen stehende Wellen — ich möchte sie „Bandwellen“ nennen — rechtwinklig zur Längsausdehnung der Membran angeordnet sind, vollständig übersehen hat.

Während nun die Thatsache der Entdeckung dieser Bandwellen meinen Kritikern nicht entgangen ist, scheinen sie die praktische Seite meiner Untersuchungen nicht beachtet zu haben¹⁾. Ich

1) Falls ich übrigens zu den kritischen Aeusserungen über meine Hörtheorie ausser den gedruckten auch die schriftlichen und mündlichen rechnen darf, so kann ich erfreulicher Weise von einer Ausnahme sprechen. Denn Hermann v. Helmholtz ist diese Besonderheit meiner Hörtheorie nicht entgangen. Als ich ihm im Verlauf einer Unterhaltung die Entstehung des Schallbildes geschildert hatte, richtete er sofort an mich die Frage, ob ich schon versucht hätte, einen Apparat zu construiren, der ähnlich, wie nach meiner Vorstellung das Ohr functioniren solle, Schallbilder aufnehmen. Damals konnte ich ihm aber nur von äusserst primitiven Versuchen berichten.

Bevor ich die neue Schwingungsform der Membranen gefunden hatte, habe ich mich lange damit geplagt, eine Membran derartig herzurichten, dass sie der Helmholtz'schen Resonanztheorie genügt, wobei ich natürlich nur die aller-einfachsten Anforderungen, die die Theorie an die Membran stellt, und auch diese nur in elementarster Weise verlangte. Aber man möge die Membran wählen, wie man wolle, gross oder klein, dünn oder dick, gleichmässig (homogen) oder mit besonderer Einlage von parallelen Fäden, man möge sie in einer Richtung spannen oder in mehreren und sie in toto oder partiell in Bewegung setzen, — man gelangt nicht zu Resultaten, die auch nur den bescheidensten Wünschen entsprechen. Ein künstliches Ohr, das in der Art, wie es die Resonanztheorie verlangt, den Schall aufnimmt, habe ich ebensowenig wie Andere bisher construiren können. Der Wunsch liegt aber doch sehr nahe, an einem derartigen Modell die Hörtheorie zu demonstrieren, und wir werden wohl nicht fehlgehen, wenn wir annehmen, auch Helmholtz habe sich mit diesen Versuchen vergeblich abgemüht. Vielleicht, dass ihn die Erinnerung an solche Untersuchungen sofort daran denken liess, dass durch die Kenntniss der neuen Schwingungsform zugleich auch die Grundlage für die Construction eines künstlichen Ohres gegeben sei.

Für fachmännische Urtheile und Besprechungen, die mir von grossem Werth gewesen sind, habe ich zu danken: H. v. Helmholtz, P. Blaserna (der auch

lege aber grossen Werth auf den experimentellen Untergrund meiner Theorie. Eigentlich handelt es sich nämlich in meiner Arbeit gar nicht um eine Theorie. Ich versuche vielmehr, aus der praktischen Erfahrung heraus ein Ohr zu construiren. Meine Fragestellung lautet nicht: wie ist das Ohr eingerichtet? oder: wie muss es eingerichtet sein, um in der uns bekannten Weise zu functioniren? sondern ich untersuche Membranen und frage, unter welchen Umständen der Schall derart auf sie einwirkt, dass sie den Empfangsapparat eines Ohres darstellen können.

Diese empirisch-praktische Seite meiner Untersuchungen ist offenbar nicht genügend klar in meiner Publication zum Ausdruck gelangt. Ich komme desshalb hier ausführlicher darauf zurück, und zwar geschieht dies im Interesse der Sache. Mein Wunsch ist, auch diejenigen Physiologen, Akustiker und Ohrenärzte, welche rein theoretischen Untersuchungen abhold sind, auf diese Untersuchungsmethode aufmerksam zu machen, um dadurch den Einen oder den Anderen zu veranlassen, gleich mir diesen aussichtsvollen Weg zu betreten.

Die Möglichkeit, die Theorie eines Sinnesorgans an einem, wenn auch zunächst noch sehr unvollkommenen Modell demonstrieren zu können, scheint mir in der That von grösster Wichtigkeit zu sein, wenn ich natürlich auch zugebe, dass in dieser Möglichkeit noch kein endgültiger Beweis für die Richtigkeit der Theorie liegt. Aber man denke an das Auge, man versetze sich einmal in die Zeit am Ende des 16. Jahrhunderts, als man noch so gut wie nichts über die Functionsweise unseres Sehorgans wusste. Theorien über das Sehen gab es schon damals genug. Da erfand Porta die Camera obscura, und indem er diese als Augenmodell ansprach und die Bildchen in derselben zeigte, erhielt die Theorie der optischen Bilder im Auge eine fundamentale Stütze.

Man möge auch nicht vergessen, wie viel die physiologische Optik gerade dem Umstande verdankt, dass man das ganze Auge

meine Schallbilder gesehen hat. Ich bin dem berühmten Akustiker ganz besonders verpflichtet für die Anregung, die ich bei unserem Ideenaustausch durch ihn empfangen habe), Rudolph Koenig, E. Mach, L. Hermann, A. Fick, V. Hensen, ter Kuile, Felix Krueger, Max Meyer, Victor Goldschmidt.

oder Theile desselben durch ähnlich functionirende Apparate nachbilden kann. Durch das Studium der Camera obscura, der Glaslinsen, der optischen Bilder auf Papierschirmen u. s. w. hat man die Kenntnisse erworben, die die Lehre vom Sehen so weit entwickelt haben.

So erscheint also die Construction einer der Camera obscura analogen Camera acustica als eine sehr wichtige Aufgabe. Auf Grundlage der Bandwellen ist sie jedenfalls bis zu einem gewissen Grade der Vollkommenheit lösbar. Bisher habe ich keine besondere Form eines Ohrmodells beschrieben, weil mir hierzu die Kenntniss der Bandwellen noch nicht genügend vorgeschritten zu sein schien. Und auch jetzt gebe ich der Camera acustica nur ungern eine bestimmte Form, da sich noch nicht übersehen lässt, in welcher Weise sie noch besser den Verhältnissen des Ohres angepasst werden kann.

Doch vorerst einige neue Thatsachen über die Grösse und die Schwingungsform der Membranen, sowie über die Art, wie die Schallwellen auf sie übertragen werden können.

Die Grösse der Membranen.

Man darf annehmen, dass irgend welche Schwingungsform, welche sich an elastischen Körpern nachweisen lässt, auch dann noch zu Stande kommen kann, falls sich eine Dimension des betreffenden Körpers beliebig ändert. Die absoluten Grössen der schwingenden Körper gehen nämlich nie in den allgemeinen Ausdruck für das Schwingungsgesetz einer Schwingungsform ein. Wenn man daher nach Aenderung einer Dimension des schwingenden Körpers die anderen in Betracht kommenden Factoren ebenfalls ändern kann, so wird es immer gelingen, die verlangte Schwingungsform auch bei veränderter Grösse des betreffenden Körpers zu beobachten. Dies ist jedenfalls innerhalb sehr weiter Grenzen richtig. Dieselbe Schwingungsform, die z. B. eine lange Saite zeigt, kann man auch mit einer kurzen Saite hervorbringen, wenn man bei dieser die Dicke, die Spannung, die Elasticität u. s. w. in zweckentsprechender Weise ändert. Daher durfte ich mich zunächst damit begnügen, die neue Schwingungsform, die meiner Hörtheorie entspricht, an grösseren Membranen demonstrirt zu haben. Da aber die Grösse dieser

Membranen einer ganz anderen Grössenanordnung angehörte, als sie der Grundmembran im Ohre, selbst bei den grössten Wirbelthieren, zukommt, so war es dennoch für mich wünschenswerth, die Bandwellen auch an kleineren Membranen nachzuweisen. Dieser Wunsch wurde noch lebhafter, nachdem mir einer der oben erwähnten Fachmänner geschrieben hatte: „Ich glaube, dass Ihre Theorie ebenso schwer wie die von Helmholtz mit der Kleinheit der lamina spiralis zu vereinbaren ist.“

Nach vielen vergeblichen Versuchen mit gespannten und nachher durch Oel schlaff gemachten Gummimembranen, mit Häutchen aus Collodium, Celloidin, Gelatine, Seifenwasser u. a. m. bin ich durch folgendes Verfahren zum Ziel gelangt. Man verfertigt sich eine Kautschuklösung, indem man 1 g einer unvulcanisirten Paragummiplatte in kleine Stücke schneidet und mit 20 ccm Benzin übergiesst. Das Gummi löst sich nur theilweise. Nach 3 Tagen filtrirt man durch ein Drahtnetz und benutzt die Lösung, der man unter Umständen eine Spur reinen Oels zusetzen kann.

Aus einer kleinen, 0,075 mm dicken Aluminiumscheibe ist ein schmales, rechteckiges Stück herausgeschnitten. Taucht man die Scheibe unter die Kautschuklösung und hebt sie wieder heraus, so überzieht sich der Ausschnitt mit einem Häutchen von flüssigem Kautschuk, das bald an der Luft zu einer zarten Membran erhärtet. Damit die Membran brauchbar wird, sind aber einige Vorsichtsmaassregeln bei diesem Verfahren geboten. Man muss das Scheibchen mit einer Pincette halten, die von selbst federnd schliesst, damit man mühelos und ohne auf das Festhalten des Scheibchens achten zu müssen, dasselbe hin und her bewegen kann. Die Scheibe wird vertical eingetaucht. Der Ausschnitt der Scheibe, der parallel der Oberfläche der Lösung gehalten wird, kommt nur grade unter das Niveau, dann hebt man die Scheibe sogleich wieder aus der Flüssigkeit heraus und zieht mit Daumen und Zeigefinger der anderen Hand das Zuviel der Lösung, das sich unten an dem Scheibchen ansammelt, vorsichtig ab. Ohne Zeit zu verlieren, wird nun die Scheibe nach allen Richtungen hin und her geschaukelt, damit sich nirgends auf dem Häutchen Gummimasse anhäuft. Während dieser Bewegungen erstarrt das Häutchen zur Membran. Alles kommt darauf an, dass die Ränder des Ausschnittes in der Scheibe scharf und glatt sind;

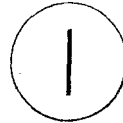


Fig. 1. Inmitten der Aluminiumscheibe sieht man die Schallmembran in natürlicher Grösse.

die kleinste, nur unter der Lupe sichtbare Rauigkeit bewirkt eine Ansammlung von Gummilösung und eine locale Verdickung der Membran, wodurch diese für viele Versuche unbrauchbar wird.

Die Grösse der von mir zuletzt benutzten Membranen betrug 0,55 mm in der Breite und 8,5 mm in der Länge. Die Dicke habe ich bisher nie gemessen; häufig waren die Membranen so dünn, dass sie die Newton'schen Farbenerscheinungen zeigten. Die

Fig. 1 gibt die richtigen Grössenverhältnisse wieder.

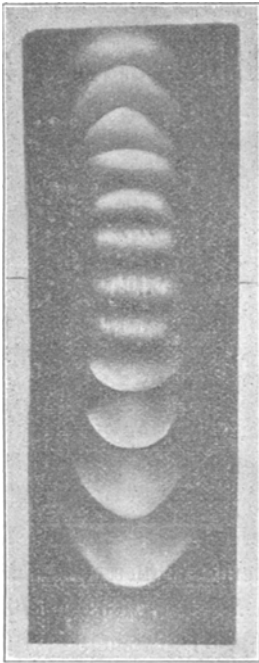


Fig. 2. Das Schallbild eines Tones auf der in Fig. 1 abgebildeten Membran.

Ein Stück eines Schallbildes, welches die in Fig. 1 abgebildete Membran bei einem hohen Ton¹⁾ zeigte, ist in Fig. 2 dargestellt. Das Bild gibt die wirkliche Grösse einer Mikrophotographie von einem Stück der Membran wieder. Da man schräg auf die Membran sieht, so befinden sich nur die Bandwellen in der Nähe der Mitte des Bildes im Focus des Mikroskops und sind allein scharf zu sehen. Die anderen Wellen zeigen Zerstreuungsbilder, sind aber in Wirklichkeit genau so gestaltet wie die scharf abgebildeten.

Obgleich es offenbar, wie oben ausinandergesetzt, für meine Hörtheorie gar nicht nothwendig war, die Schallbilder auch auf so kleinen Membranen zu demonstrieren, so muss ich es doch als einen besonders günstigen Umstand bezeichnen, dass es mir jetzt gelungen ist, Membranen zu verwenden, welche thatsächlich nicht grösser sind als die Grundmembran des menschlichen Ohres.

1) Der Ton war etwa a^4 . Er wurde zur Abbildung gewählt, weil er ungefähr in der Mitte lag zwischen dem höchsten und dem tiefsten Ton, den die Membran zeigte. Der ganze Umfang der Schallbilder betrug mehr als 6 Octaven. Da bei dem abgebildeten Schallbild die Wellen etwa 0,11 mm von einander liegen, so hätte die Membran theoretisch noch den Ton F zeigen können; thatsächlich sah man die Schallbilder nur bis etwa h^1 . Bei den tiefen Tönen liegt die Schwierigkeit nicht darin, dass die Membranen keine stehenden Wellen bilden, sondern es ist nur sehr schwer, die langen, flachen Wellen zu sehen.

Die Beobachtung und das Photographiren der Schallbilder kleiner Membranen.

Bei der Kleinheit der Membranen konnte die Beobachtung der stehenden Wellen natürlich nicht mehr mit unbewaffnetem Auge ausgeführt werden. Bei tiefen Tönen würde es ja noch allenfalls angehen, die einzelnen Wellen auch ohne Mikroskop zu sehen und zu zählen, wenn sich aber auf der Membran 500 und mehr stehende Wellen ausbilden, wenn man diese nicht nur zählen, sondern auch ihre Abstände messen will, wenn es sich schliesslich darum handelt, bei Kombination mehrerer Töne die verschiedenen Grössen der einzelnen Wellen gegeneinander abzuschätzen, so bleibt eben nur die mikroskopische Betrachtung der Membran übrig. Ich benutze

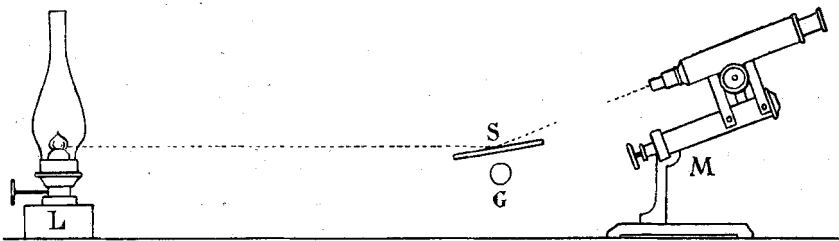


Fig. 3. Die Beobachtung der Schallbilder durch das Mikroskop. Die Grössenverhältnisse sind nicht richtig wiedergegeben.

ein Seibert'sches Mikroskop mit einem Objectiv Nr. 0 und einem Okular Nr. 0. Bei einer 30 maligen linearen Vergrösserung beträgt der Focalabstand etwa 23 mm.

Aus meiner vorigen Mittheilung wird man sich erinnern, dass man zum Wahrnehmen der stehenden Wellen schräg auf die Membran sehen musste. Das Licht, welches von einem Fenster herrührte, spiegelte sich auf der einen Seite der Wellenzüge, während die andere dunkel blieb. Diese Methode wird auch bei der mikroskopischen Beobachtung der kleinen Membranen angewendet, und hierzu ist die folgende in Fig. 3 abgebildete Anordnung der Apparate nöthig.

Die Aluminiumscheibe *S*, in der sich die Membran befindet, wird mit Hülfe eines besonderen Halters in einem Stativ derart befestigt, dass sie mit der Tiscebene einen Winkel von etwa 17° bildet. Das Stativ besitzt eine Einrichtung, diesen Winkel mittelst

einer Schraubenvorrichtung (Fig. 8 bei *b*) bequem vergrössern oder verkleinern zu können. Die eine schmale Seite der bandförmigen Membran ist dem Beobachter zugekehrt und ist zugleich diejenige, die den grösseren Abstand vom Tisch hat. Unterhalb der Scheibe befindet sich das tönende Instrument, etwa eine Galton-Pfeife, deren Querschnitt bei *G* angedeutet ist. Das Mikroskop *M*, welches die ja nicht seltene Einrichtung besitzt, es um eine horizontale Achse schräg stellen zu können, wird so vor die Aluminiumscheibe gestellt, dass sein Tubus einen Winkel von etwa 46° mit dem Tisch bildet, also einen Winkel von etwa 29° mit der Ebene der Membran. Da man durch das Mikroskop schräg auf die Membran sieht, so kann man gleichzeitig nur einen queren Streifen derselben scharf sehen. Die näher gelegenen Partien befinden sich oberhalb der Focalebene, die entfernteren unterhalb derselben. Als Leuchtquelle genügt eine kleine Petroleumlampe *L* ohne Milchglasschirm, bei der man also die Flamme direct sehen kann. Sie ist etwa 115 cm von der Membran entfernt und befindet sich in gleicher Höhe über dem Tisch.

Die auf die Membran fallenden Lichtstrahlen treffen dieselbe unter einem Winkel von etwa 17° , und da das Mikroskop einen Winkel von etwa 29° mit der Membran bildet, so reflectirt die Membran kein Licht in das Mikroskop, und sie erscheint daher im Gesichtsfeld zunächst ganz dunkel. Es würde jedoch eine kleine Drehung der Scheibe *S* um die horizontale, von rechts nach links gehende Achse genügen, um die Membran in eine solche Lage zu bringen, dass sie das Licht der Flamme in das Mikroskop reflectirt und dann blendend hell aussieht. Mit Hülfe der oben bereits erwähnten Schraubenvorrichtung (Fig. 8 bei *b*) stellt man die Membran vor dem eigentlichen Versuch, d. h. bevor die Töne erzeugt werden, so ein, dass sie eben noch dunkel erscheint. Dann erzeugen, sobald die Töne auf die Membran einwirken, die stehenden Wellen Schallbilder, die aus hellen, glänzenden Querstreifen bestehen.

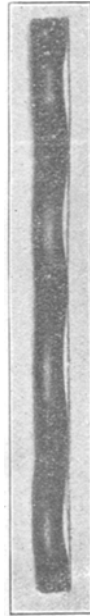
Dass man in Folge der Schrägstellung der Membran gleichzeitig nur eine kleine Strecke derselben scharf sehen kann (vgl. Fig. 2), wurde bereits erwähnt. Will man die ganze Membran untersuchen, so muss man das Mikroskop nach vorn oder hinten auf dem Tische verschieben und den Tubus dabei tiefer oder höher schrauben.

Wie ich in meiner vorigen Mittheilung angegeben habe, mussten früher bei Beobachtung der grossen Membranen dieselben mit Oel überzogen werden, um das Licht besser zu reflectiren. Dies ist bei

den kleinen Membranen nicht mehr nöthig, da sie schon an und für sich stark genug glänzen.

Das Photographiren der Schallbilder vollzieht sich in ganz derselben Weise, wie man sonst photographische Aufnahmen mikroskopischer Objecte macht. Nur muss auch die photographische Camera in gleicher Weise wie das Mikroskop die Einrichtung besitzen, dass sie sich um eine horizontale Achse drehen lässt, damit man sie in die Verlängerung des schräg stehenden Tubus des Mikroskops bringen kann. Natürlich werden auch auf der Photographie immer nur wenige Wellen scharf abgebildet, während die anderen, je weiter sie von der Focalebene entfernt sind, desto grössere Zerstreuungsbilder geben. Diese letzteren sehen etwas anders aus, je nachdem, ob sie von Wellen ausgehen, die dem Mikroskop zu nahe oder zu entfernt sind, woraus sich erklärt, dass die beiden Enden der Membran nicht ganz gleich erscheinen. Auf der einen Seite wenden sich die Zerstreuungsbilder gewissermaassen dem Beobachter zu, auf der anderen Seite von ihm ab.

Man kann der Membran auch eine solche Lage unter dem Mikroskop geben, dass man von der Längsseite aus sehr schräg auf sie sieht. Man bekommt dann ungefähr einen Querschnitt durch die Länge der Membran zur Anschauung und erhält Bilder, die die Amplitude der Wellen zeigen. In Fig. 4 ist die photographische Aufnahme eines solchen Bildes wiedergegeben.



Von dieser Methode, die Schallbilder zu untersuchen, habe ich aber bisher wenig Gebrauch gemacht, da sie weniger leicht ausführbar und weniger empfindlich ist. Die Wellen müssen relativ hoch sein, um auf diese Weise gute Bilder zu liefern.

Fig. 4.
Querschnitt
durch ein
Schallbild.

Merkwürdig sind die Bewegungen, die die einzelnen Punkte der Membran ausführen, wenn man die stehenden Wellen nicht sehen kann. Jeder Punkt macht im Gesichtsfelde des Mikroskops eine kleine hin und her gehende Bewegung, und aus den Bildern dieser kleineren Wege setzen sich Curven zusammen, welche von der Mitte des Gesichtsfeldes aus in kreisförmigen Bogen nach rechts und links verlaufen. Es handelt sich dabei um ein optisches Phänomen, denn wenn man die Membran unter dem Mikroskop verschiebt, so wandern

die Curvencentren in gleicher Weise auf der Membran, d. h. sie bleiben immer in der Mittellinie des Gesichtsfeldes. Fig. 5 ist die Wiedergabe eines Photogramms.

Endlich sei auch noch die freilich nur selten eintretende Erscheinung der Längstheilung einer Membran erwähnt. Aus mir unbekannten Gründen — kleine Unregelmässigkeiten der Membran geben offenbar die Veranlassung — theilt sich manchmal eine Membran der Länge nach in zwei gleiche Hälften. Ein Ton erzeugt dann auf jeder Hälfte ein Schallbild, und zwar stehen die Wellen genau

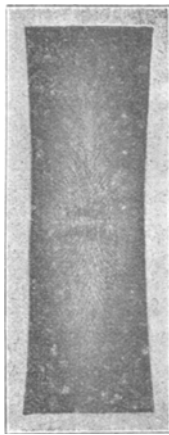


Fig. 5. Die optischen Curven auf einer schwingenden Membran.

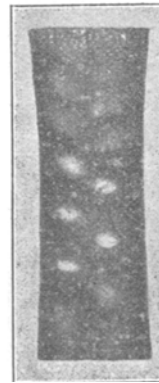


Fig. 6. Längstheilung einer Membran mit dem Schallbilde eines Tones.

ebenso weit von einander wie sonst ohne Theilung der Membran. Die Wellen der beiden Schallbilder stehen wechselständig, wie aus der Fig. 6 zu sehen ist.

Ob sich auch im menschlichen Ohr eine derartige Längstheilung ausbilden kann, und ob dadurch besondere Gehörsanomalien entstehen, kann erst erwogen werden, wenn die Kenntniss dieser Erscheinung eine vollständigere geworden sein wird.

Die Schallübertragung auf die Membran.

Auch in Bezug auf die Art und Weise, wie man die Membran in Schwingungen versetzt, gilt dasselbe, was oben bereits über die Grösse der Membran gesagt wurde. Es ist für die Schallbildtheorie durchaus nicht nothwendig, dass der Schall den Membranen

in derselben oder in ähnlicher Weise, wie es im menschlichen Ohr geschieht, übermittelt werde. Hier findet gewöhnlicher Weise die Uebertragung der Schwingungen von dem tönenden Körper auf das Ohr durch die Luft hindurch statt. Bei meinen früheren Versuchen war mir aber diese Art der Uebertragung nicht gelungen; es musste immer, wie sich der Leser erinnern wird, die Membran mit einer Stimmgabelzinke direct berührt werden, um die Schallbilder zu erzeugen. Jetzt ist es mir geglückt — und wer sich für die Schallbildertheorie interessirt, wird dies jedenfalls als einen weiteren Fortschritt begrüßen —, dass auch die Schallübertragung ganz analog dem Vorgange beim Ohr ausgeführt werden kann. Es genügt in der That die Schallübertragung durch die Luft. Wenn man z. B. die Galton-Pfeife unterhalb der Membran befestigt (Fig. 3 bei G), derart, dass die Mundöffnung der Pfeife einen Abstand von $\frac{1}{2}$ —2 cm von der Membran hat, so entstehen die Schallbilder allein durch Luftübertragung. Ein directes Anblasen der Membran spielt dabei keine Rolle, denn man kann bei genügender Annäherung³ (ohne Berührung) der Galton-Pfeife die Mundöffnung derselben nach unten, also von der Membran abgewendet, wirken lassen, ohne dadurch die Schallbilder zu beeinträchtigen.

Bei diesen Versuchen mit der Galton'schen Pfeife ist es sehr interessant, zu beobachten, wie sich bei Verschraubung der Pfeife die Wellen an einander drängen oder von einander entfernen, je nachdem, ob man den Ton erhöht oder vertieft. Man sieht da nie eine Unterbrechung, nie eine Unregelmässigkeit in der Verschiebung; völlig gleichmässig mit der Drehung der Schraube ändert sich das Schallbild in der einen oder der anderen Richtung. Dafür ist aber natürlich Voraussetzung, dass die Membran keine groben Fehler hat.

Auch folgender Versuch ist bemerkenswerth. Man kann bei Verschraubung der Pfeife den Ton über die oberste Hörgrenze des menschlichen Ohres erhöhen, so dass man ihn nicht mehr hören kann, während doch das Schallbild mit seinen immer enger an einander liegenden Wellen noch eine Zeit lang zu sehen ist. Die Galton-Pfeife gibt also auch noch höhere Töne, als das menschliche Ohr hören kann. Bei noch weiterer Verschraubung verschwindet dann aber das Schallbild plötzlich, und man hört nur noch das Blasegeräusch des Luftstroms wie bisher.

Hat man bei einer Membran die Zahl der stehenden Wellen auf einer bestimmten Membranstrecke mit dem Ocularmikrometer

gemessen, so gelingt es, die Galton'sche Pfeife immer wieder nach dem Schallbilde auf genau denselben Ton einzustellen. Die Genauigkeit und Einfachheit, mit der man auf diese Weise einen sehr hohen musikalischen Ton zur Anschauung bringen kann, übertrifft alle bisher bekannten Methoden. Ich glaube daher, dass sich die Bandwellen zur Messung und Vergleichung sehr hoher Töne ausgezeichnet eignen würden.

Will man Schallbilder erzeugen, die sich aus zwei Tönen combiniren, so hat man nur nöthig, unterhalb der Membran statt einer Galton'schen Pfeife deren zwei anzubringen.

Lücken in der Reihe der Schallbilder.

Sehr mit Unrecht hat man in der Thatsache der Gehörlücken eine Bestätigung der Helmholtz'schen Resonanztheorie zu finden gemeint. Alle Hörtheorien müssen bewegliche Theile im Ohr voraussetzen, welche durch die Schallwellen Impulse erhalten. Dass bei bestimmten Frequenzen der Anstösse die beweglichen Theile unter Umständen weniger gut oder gar nicht functioniren, lässt noch gar keinen Schluss auf die specielle Anordnung des Aufnahmeapparates zu.

Bei der Durchprüfung von Schallmembranen habe ich wiederholt kürzere oder längere Lücken beobachtet. Tiefere und höhere Töne gaben mit Leichtigkeit gute Schallbilder; dazwischen sprachen die Membranen nicht an. Kleine Unregelmässigkeiten der letzteren sind offenbar der Grund für dies plötzliche Versagen. Bei guten Membranen ändern sich dagegen die Schallbilder völlig continuirlich mit der Zunahme der Tonhöhe.

Will man also die Gehörlücken als Kriterium für eine Hörtheorie heranziehen, so würden sie in erster Linie für meine Hörtheorie sprechen, da ich sie sogar experimentell beobachtet habe.

Die Camera acustica.

Wie die Camera obscura im Wesentlichen den functionellen Bau des Auges darstellt, so soll die Camera acustica die Functionen des Ohres erläutern. Sie wird aber auch einem praktisch wichtigen Zwecke dienen können, indem sie gestattet, experimentell einzelne im Gehörapparat befindliche Einrichtungen nachzubilden und zu

untersuchen. Für den Gehörapparat hat bisher ein derartiges Studium am Modell vollkommen gefehlt. Man war immer nur auf das unzugängliche eigene Ohr angewiesen, oder, wenn man an Thieren experimentirte, so war jede genauere Beurtheilung des Erfolges ausgeschlossen. Daher ist ja auch die Lehre vom Gehörapparat so ausserordentlich arm an experimentellen Untersuchungen. Gut unterrichtet sind wir nur über die Physik des Schalles, ohne Rücksicht auf die physiologischen Verhältnisse im Thierkörper. An Theorien mangelt es ja nicht; sie experimentell zu beweisen, ist bisher nicht geglückt. Ich hoffe, durch die Camera acustica einen ganz neuen Weg zur Erforschung des Gehörorgans zu eröffnen.

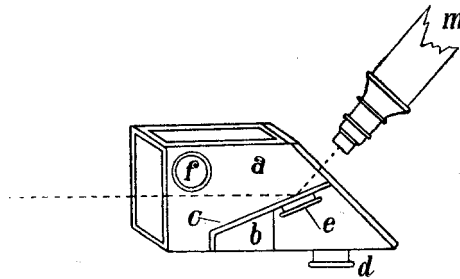


Fig. 7. Die Camera acustica. Perspektivische Ansicht und Darstellung des Querschnitts sind mit einander combinirt. Verkleinerung etwa 1:2,5.

Die Camera acustica besteht aus einem mit Wasser gefüllten Kasten, in dem sich auf einer den Kasten in zwei Theile theilenden Scheidewand in Form einer im Winkel gebogenen Platte *c* die Schallmembran befindet. Diese Platte *c* kann aus dem Kasten herausgenommen werden; damit sie fest steht, sind an ihr zwei seitliche Platten *b* angebracht. Die Aluminiumscheibe (Fig. 1) mit der Schallmembran liegt in der kleinen Kapsel bei *e*. Da es bisher keine andere Methode gibt, um die stehenden Wellen gut zu beobachten, wie die auf Lichtreflection beruhende, so muss dafür gesorgt sein, dass sowohl die Lichtstrahlen von der Beleuchtungsquelle auf die Membran fallen können, wie auch die Möglichkeit vorliegen, mit dem Mikroskop unter geeignetem Winkel die Membran beobachten zu können. Zu ersterem Zweck besteht die eine Wand des Kastens aus einer Glasscheibe, durch die das Licht geradlinig in das Wasser eindringen kann. Die Scheidewand, die Aluminiumscheibe und die Schallmembran liegen in einer Ebene, und diese bildet mit dem Boden des Kastens einen Winkel von 17° . Unter diesem

Winkel fällt also auch das Licht auf die Membran. Die dieser Glaswand gegenüber liegende Seite des Kastens besteht ebenfalls aus Glas und bildet mit dem Boden desselben einen Winkel von 44° . Durch diese Glaswand sieht man mit dem Mikroskop *M* auf die Membran. Es ist dann die Achse des Tubus in einem Winkel von 29° gegen die Schallmembran gerichtet, und die Lichtstrahlen gehen dabei senkrecht durch die Glaswand. Es sind also alle Bedingungen erfüllt, um in der oben (Seite 491) angegebenen Weise die Schallbilder im Mikroskop zu beobachten. Da die in dem Kasten befindliche Scheidewand *c* an einem kurzen Henkel (der in den Figuren nicht abgebildet worden ist) leicht aus dem Kasten herausgenommen

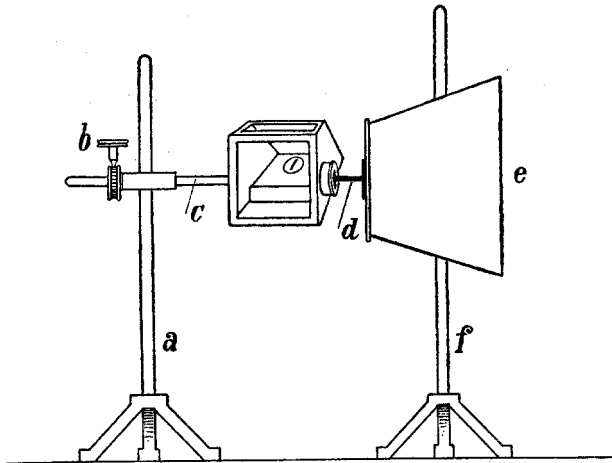


Fig. 8. Zuleitung des Schalles zur Camera acustica.

werden kann, so lässt sich die Aluminiumscheibe mit der Schallmembran in bequemer Weise einsetzen und die letztere leicht erneuern. Hat man den Kasten ganz mit Wasser gefüllt, so wird er oben durch einen Deckel (in den Abbildungen ist er fortgelassen) verschlossen und enthält nun keine Luft mehr, sondern nur Wasser, welches überall von den Wänden des Kastens eingeschlossen wird.

Durch die schräge Scheidewand wird der Innenraum des Kastens in zwei Abtheilungen getheilt: in die Vorderkammer und in die Hinterkammer (Vestibularraum und Tympanalraum). Der Teil *a* der einen Seitenwand des Kastens, der der Vorderkammer entspricht, besitzt ein rundes Loch *f* (Fenestra ovalis), das mit einer gewöhnlichen Gummimembran überspannt ist. Ein ebensolches Loch *d* mit darüber gespannter Gummimembran (Fenestra rotunda) befindet sich auch in

der Bodenfläche des Kastens im Bereich der Hinterkammer. Drückt man auf die Membran der Fenestra ovalis, so buchtet sich die der Fenestra rotunda nach unten aus, und die Schallmembran muss sich ebenfalls in dieser Richtung bewegen, da sie ja einen Theil der zwischen Vorder- und Hinterkammer befindlichen Scheidewand ausmacht.

An der Wand gegenüber der Fenestra ovalis ist an dem Kasten ein runder Stab (Fig. 8c) befestigt, der, in einem Stativ *a* eingeklemmt, mit Hülfe der oben auf Seite 492 bereits erwähnten Schraubenvorrichtung gestattet, die ganze Camera und daher auch die Schallmembran um eine horizontale, zur Membran quer verlaufende Achse zu drehen.

Endlich ist noch der sehr einfache Schallzuleitungsapparat zu beschreiben. Ein kurzer Schalltrichter *e*, dessen Boden mit einer Gummimembran überspannt ist, wird von einem Stativ *f* gehalten und befindet sich ebenfalls in der Achse der Fenestra ovalis. Die Verbindung zwischen der Gummimembran (Trommelfell) des Schalltrichters und der Membran des ovalen Fensters wird durch eine einfache Columella *d* hergestellt. Letztere besteht aus einem kurzen Eisenstäbchen, welches an beiden Enden zwei kleine Scheibchen trägt.

Singt man einen Ton in den Schalltrichter hinein, so überträgt sich der Schall wie beim menschlichen Ohr zunächst auf ein Trommelfell, dann durch eine Columella (Reihe der Gehörknöchelchen) auf das ovale Fenster. Der Schall dringt dann in das Wasser der Camera ein und setzt die Schallmembran von der einen Fläche aus in Schwingung, während die andere Fläche der Membran an einen Raum grenzt, der durch die Fenestra rotunda abgeschlossen ist.

Dass der Schall wirklich auf diesem Wege, nämlich durch die Columella, fortgepflanzt wird, lässt sich leicht zeigen, indem man den Mund beim Singen des Tons seitwärts vom Schalltrichter hält. Sofort verschwindet dann das Schallbild.

Wie beim Ohr ist aber auch eine Schallübertragung ohne Leitung durch die Columella möglich. Entfernt man Schalltrichter und Columella, so kann man das tönende Instrument, etwa eine kleine Orgelpfeife, in geringer Entfernung vor der Fenestra ovalis tönen lassen und sieht wiederum das Schallbild im Mikroskop.

Setzt man eine Stimmgabel direct auf die feste Wand der Camera auf, so entsteht ein Schallbild mit sehr hohen Wellen (Knochenleitung).

So übergebe ich denn die Camera acustica in ihrer ersten Gestalt der wissenschaftlichen Welt. Ich bin mir dabei wohl bewusst, dass diese Gestalt keine endgültige Form darstellt. Die Einfachheit des Apparats — darauf lege ich grossen Werth — lässt wohl nichts zu wünschen übrig. Auch dieser Umstand sollte für die Richtigkeit der Theorie sprechen. Das Grundprincip aller Vorrichtungen in unserem Körper ist immer sehr einfach. Das, was alle Ohren der höheren Wirbelthiere gemeinsam haben, ist nichts als eine bandförmige, in einem Rahmen ausgespannte Membran, die sich unter Flüssigkeit befindet, und an deren Längsseite Nervenfasern treten. Auch die Camera acustica besteht nur aus einer solchen Membran. Schall jeder Art wirkt auf dieselbe ein. Jede verschiedene Schallart muss auch ein verschiedenes Schallbild erzeugen und daher auch der intermittirte Ton ein anderes wie der ursprüngliche Ton¹⁾). Dabei sind alle Schallbilder vollständig durch ihre Anordnung in der Längsrichtung der Membran charakterisirt, und wenn wir uns die eine Längsseite der Membran mit Nervenfasern besetzt denken, so muss jeder verschiedene Schall auch eine verschiedene Nervenerregung hervorrufen.

Vorläufig kann man freilich den Schallbildern der Camera acustica noch nicht ansehen, ob der Ton von einer guten oder schlechten Violine herrührt. Wer dies oder Aehnliches jetzt schon von dem Apparat verlangt, dem kann ich nur rathen, sich recht schnell mit an's Werk zu setzen, damit die Camera acustica möglichst bald eine ideale Vollkommenheit erhält. Andere Leser werden aber mit mir der Ansicht sein, dass für den ersten Anfang damit schon viel erreicht ist, dass man in der Camera acustica auf einer so kleinen Membran der meiner Hörtheorie entsprechende Schallbilder sieht, dass man Töne von Geräuschen unterscheiden kann, hohe Töne von tiefen Tönen, dass man sehen kann, wie zwei verschiedene Töne eine Consonanz bilden, dass sich auch die Schallübertragung durch das Trommelfell oder ohne Gehörknöchelchen oder durch Knochenleitung demonstrieren lässt. Und das alles mit den einfachsten, dem Gehörorgane entsprechenden Mitteln, ohne elektrische Läutewerke, kugelförmige Resonatoren oder zweiunddreissigtausend abgestimmte Claviersaiten, von welchen Dingen bisher Niemand etwas im Ohre gefunden hat.

1) Neue Hörtheorie S. 32 oder dieses Archiv Bd. 76 S. 172.