

Über Klangfiguren gespannter Membranen und Glasplatten¹⁾;

von **Karl Antolik.**

Es ist auffallend, dass seit dem Bestehen der Poggendorff'schen, Wiedemann'schen und Drude's Annalen der Physik, also seit beinahe 100 Jahren in diesen keine einzige Abhandlung über schwingende Membranen erschienen ist und man auch in den besten Werken der Physik über diesen Gegenstand nur hie und da kurze Bemerkungen findet.²⁾

Das Meiste fand ich in »Gehler's phys. Wörterbuch«.³⁾ Im letzteren Werke ist sozusagen alles Wertvolle zusammengestellt, was sich auf die schwingenden Membranen bezieht. In Melde's »Akustik«⁴⁾ sind alle hieher gehörigen Versuche geordnet, mehrere sogar kritisch behandelt, »doch liegt das Experimentelle — wie wir mit Melde sagen können — noch sehr darnieder«. — Es wäre übrigens nicht viel, wenn ich auch alles, was sich auf die Membranen bezieht, hier zusammenfassen würde; ich glaube aber, dass es genügt, wenn ich nur dasjenige berühre, was mir wertvoll zu sein scheint. Jedenfalls sind die Membranen in akustischer Hinsicht auch schon deshalb sehr wichtig, weil sie uns das Problem der Chladni'schen

¹⁾ A jelen munka a magyar nyelven májusban jelenik meg s ekkor az egyesület tagjai külön-lenyomat alakjában kapják meg.

²⁾ Die Schwingungscuren von Telephon-Membranen von Robert Kempf-Hartmann (Drude's Ann. Bd. 8, pg. 481) gehören natürlich nicht hieher. — Auch in dem neuesten Spezialwerke von W. C. L. von Schaik und Prof. Dr. H. Fenker (1902.) sind die Membranen (pg. 239 - 242) nur sehr stiefmütterlich behandelt worden.

³⁾ Gehler's phys. Wörtb. VIII. pg. 220—226.

⁴⁾ Melde, Akustik 1883. pg. 103 - 133.

Klangfiguren näher bringen. »Dieses Problem ist, wie Melde sagt, in seiner allgemeinen Lösung ein so schwieriges, dass es selbst in unserer Zeit noch nicht völlig gelungen ist, dasselbe auf theoretischem und experimentellem Wege zu bewältigen, wiewol die hervorragendsten Mathematiker und Physiker diesem Gegenstande fortwährend ihre Aufmerksamkeit zuwandten.«¹⁾

Vorerst will ich die älteren Versuche in Kürze erwähnen und gehe alsdann zu den neueren und meinen eigenen Erfahrungen über.

Die Chladni'schen Klangfiguren sowohl, als auch die Versuche von Marx, Savart, Faraday, und anderer Forscher, mit vibrierenden Metall- und Glasplatten, sind allgemein bekannt. Diese ausgezeichneten Forscher befassten sich auch mit gespannten Membranen; es gelang ihnen aber, ihren eigenen Geständnissen nach, nicht die letzteren in genügend regelmässige Schwingungen zu bringen. Muncke²⁾, der sich selbst mit Membranen viel befasste, sagt Folgendes: »Die Untersuchungen der Schwingungen gespannter Membranen dürften unter allen akustischen Problemen die grössten Schwierigkeiten darbieten, wenn man die möglichen Arten theoretisch bestimmen und die erhaltenen Resultate durch die Erfahrung prüfen wollte, inzwischen würde die hierauf verwendete Mühe umso weniger lohnend sein, als die in der Wirklichkeit vorkommenden ohne Zweifel sehr einfach sind.« Wie sehr sich Muncke in seinen Folgerungen getäuscht hatte, werden wir aus dem Folgenden ersehen.

Viel richtiger urteilt über die Membranen der grosse Meister Chladni³⁾, indem er sagt »Eine an beiden Enden gespannte Membrane von überwiegend grösserer Länge als Breite schwingt unbezweifelt einer gespannten Saite analog; es lassen sich daher in jener eben diejenigen Knotenlinien annehmen, die in dieser vorhanden sind, obgleich auch neben diesen, den Ton begleitenden, noch andere von verschiedenen Ordnungen auf gleiche Weise, als bei starren schwingenden Blechen und Stäben vorhanden sein mögen.«

¹⁾ Melde, Akustik pg. 190.

²⁾ Muncke, Gehler's phys. Wörth. VIII. pg. 220.

³⁾ Chladni, Akustik, 1830. pg. 61—63, u. Gehler's phys. Wörth. pg. 221.

Marx, der sich seiner Zeit mit Membranen am meisten befasste, argumentiert sehr richtig, wenn er behauptet, dass die Töne durch die Membranen umso leichter hervorgebracht werden, je dünner und je gleichmässiger dieselben sind. Noch hätte er hinzufügen sollen: je grösser die Membranen sind und in je höhere Schwingungen sie versetzt werden. Allein Marx täuschte sich, indem er sagte:¹⁾ »Die einzige Art von Membranen, die sich zur Erzeugung von Tönen eignen, sind die aus Kautschuk oder Federharz;« denn Papier aller Art, Leinwand, Leder, Seide, selbst Atlas, tierische Blasen, Pergament, Stanniol u. s. w. lassen sich leicht in regelmässige Schwingungen bringen; sie tönen also und wir können gegen die auf denselben entstandenen Klangfiguren nicht den geringsten Einwand machen. Aus den oben erwähnten Worten Marx's kann man folgern, dass er nicht einmal ahnte, dass auf Membranen nicht nur Transversal-, sondern auch Longitudinal-Schwingungen und namentlich die den letzteren entsprechenden, schönen Klangfiguren möglich sind.

Ich muss mich auf Muncke noch einmal berufen, weil eben er es war, der alle auf die Membranen sich beziehenden Versuche sammelte und dieselben kritisch behandelte, aber auch, wie schon erwähnt wurde, selbst eingehend experimentierte. Muncke schreibt über die erhaltenen Resultate unverhüllt Folgendes:²⁾ »Allein wie anhaltend auch mein Bemühen war, so konnte ich doch auf der Aeoline, ausser dem vom Erfinder (Marx) erwähnten Schnarren, keinen Ton damit hervorbringen. Aufgestreutes Lykopodiumpulver wurde durch alle Bebungen bloss in hüpfende Bewegung mit vorherrschender Neigung nach dem Rande hin und selbst über diesen hinausgestossen. Einige Male glückte es mir jedoch ganz eigentümliche, hinlänglich kenntliche und scharf begrenzte Figuren zu erzeugen, deren Gestalt mit sehr geringen Abweichungen auf die in der Zeichnung mitgetheilten zurückkommen.« (Diese interessanten Figuren, um langweilige Beschrei-

¹⁾ Gehler's phys. Wörth. VIII. u. Schweigger-Seidel's Jahrbuch 1832.

²⁾ Gehler's phys. Wörth. VIII. pg. 225, und Melde, Akustik pg. 115.

bungen zu umgehen, füge ich hier (**Fig. 1**) bei. Es ist beachtenswert, dass die Klangfigur *c* eine echte, ja sogar regelmässige Membranfigur ist, welche in die Zehnteilungsklasse dritter Ordnung [10.₃.] gehört und also mit der (**Fig. 39**) dieser Abhandlung übereinstimmt; *a* ist ganz unregelmässig und *b* wurde etwas nachcorrigiert.) »Dagegen sollen sich (nach Marx) einige gerade Linien als Corden zeigen (?), auch verschiedene krumme Knotenlinien, deren Gestalt jedoch zu wenig regelmässig ist, als dass sie genau beschrieben werden könnten. Eine weitere Verfolgung dieser Versuche könnte vielleicht über

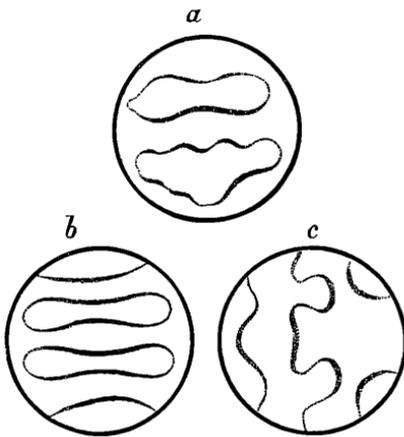


Fig. 1.

die noch sehr wenig genau erforschten Schwingungsgesetze gespannter Membranen mehr Licht verbreiten und Grundlage theoretischer Untersuchungen werden, die uns bis jetzt noch gänzlich fehlen, indem das eigentliche Verhalten derselben durch die rücksichtlich des Calculs schätzbaren Abhandlungen von Euler¹⁾ und Biot²⁾ über die Variationen gespannter, rechtwinklig viereckiger Paukenfelle noch keineswegs genügend aufgeklärt worden

ist, und es sogar noch fraglich ist, ob das Problem auf die von beiden versuchte Weise, wonach sich solche Membranen als eine Zusammensetzung rechtwinklig sich durchkreuzender Saiten betrachten lassen, überhaupt gelöst werden kann. Weit wichtiger würde es sein, einige von denjenigen Resultaten, zu denen Poisson³⁾ in seiner mehrmals erwähnten Abhandlung gelangt ist, wie er selbst wünscht, durch die Erfahrung zu prüfen.«

Von den älteren Forschern muss ich noch Savart erwähnen, der die Membranen dadurch in Schwingungen zu setzen wusste,

¹⁾ Euler, Nov. Comm. Ac. Petrop. tom. X. pg. 243. 1766.

²⁾ Biot, Mém. de l'Institut. Sciences phys. et math. tom. IV. pg. 21.

³⁾ Poisson. Mém. de l'Académie VIII. pg. 488. 1829.

dass er über deren, mit Sand bestreuten Oberfläche stark tönende Stimmgabeln oder Pfeifen hielt (Resonanzmethode). Die durch Savart gewonnenen Resultate finden wir in der Müller-Pouillet'schen Physik zusammengestellt.¹⁾ Ich muss hier allsogleich bemerken, dass Savart den echten Membranfiguren am nächsten kam, dass aber seine Figuren idealisiert, d. h. schlecht ergänzt sind und also der Wahrheit nicht genau entsprechen. Die Ursache dessen mag wohl darin liegen, dass seine Versuchsanordnung unzuweckmässig war und seine Membranen zu klein und zu steif sein mussten. Diesem Umstande muss es auch zuzuschreiben sein, dass Savart die wichtigen und nie fehlenden Knotenlinien am Rande der Klangfiguren ganz ausser acht liess. Ferner ist zu bemerken, dass gerade und sich durchschneidende Interferenzlinien, wie sie bei vielen Savart'schen Klangfiguren vorkommen, ganz unmöglich sind. Endlich werden Interferenz- und »Schwingungsmittellinien« überall mit einander verwechselt und scheinen »Schwingungsmittelpunkte« und »indifferente Flächen« Savart ganz unbekannt geblieben zu sein.

Savart konnte aber auch mit tönenden Pfeifen auf den Membranen keine richtigen Resultate erlangen, weil die Luftströme der Pfeifen immer ein schwirrendes Geräusch begleitet, aus welchem passende Impulse durch die Resonanz leicht verstärkt werden und störende Partialschwingungen hervorgerufen, welche, wenn sie auch unhörbar sind, doch die Membranen leicht übernehmen, weil sie eben für alle Töne mehr oder weniger empfindlich sind.

Übrigens finden wir über Savart's Resultate in Melde's Akustik sowohl, als auch in Bourget's²⁾ und W Weber's³⁾ Arbeiten eine ungünstige Kritik. Melde sagt⁴⁾: »Die Überführung eines Systems von Knotenlinien in das benachbarte durch etwaige allmälige Veränderungen des Erregungstones einer Anblasepfeife gelingt auch bei den kreisförmigen Membranen nicht und müssen die Annahmen Savart's, die diesem Funda-

¹⁾ Müll.-Pouil.-Pfaundler. 1886. Bd. I. pg. 792.

²⁾ Bourget. Ann. d. chim. et de phys. T. 60. 1860.

³⁾ Weber. Schweig.-Seidel's Journ. Bd. 15. 1825.

⁴⁾ Melde. Akustik 1883. pg. 129.

mentalgesetze aller schwingenden Systeme widersprechen, fallen gelassen werden.« Ich glaube, dass demzufolge auf die Versuche von Savart kein besonderes Gewicht zu legen ist; namentlich aber, da auch W. Weber in einer gründlichen Kritik der Versuche Savart's viele Widersprüche aufdeckte.

Die Arbeiten von G. Riccati¹⁾, Oerstedt²⁾, Strehlke³⁾, Biot⁴⁾ und Seebeck⁵⁾ haben jedenfalls einen grossen wissenschaftlichen Wert, aber experimentell wurden auch durch diese die Entdeckungen Chladni's nicht gefördert.

So standen die Sachen um das Jahr 1850. Schon in die neuere Zeit fallen die Versuche von Lamé⁶⁾, Bourget⁷⁾, C. Müller⁸⁾ und Melde. Die Resultate von Lamé, Poisson und Bourget sind in der »Akustik« von Melde, pg. 105—133, angeführt. In der Abhandlung von C. Müller finden wir einige unvollkommene Klangfiguren beigefügt, deren reichste aus 5 Knotenlinien besteht. In Melde's »Akustik« (pg. 124) finden wir ferner sieben Figuren, die aber auch nur aus einer oder zwei Linien bestehen, sehr unvollkommen ausgeführt sind und uns somit, ebenso wie die C. Müller'schen, kein klares Bild über die Schwingungen der Membranen bieten. Gesetzmässigkeit und echte Membranfiguren suchen wir auch in diesen beiden letzterwähnten Arbeiten vergebens. Übrigens finden wir in Melde's schon mehrmals erwähnten Werke (pg. 133) folgende Schlussworte, die in Bezug auf meine vorliegende Arbeit von ganz besonderer Wichtigkeit sind: »Was die Longitudinalschwingungen der Membranen anlangt, so leuchtet ein, dass auch diese existieren. Denn es ist denkbar, dass z. B. bei einer Kreismembran in der Richtung der Radien die Erschütterungen stattfinden.

¹⁾ Riccati. Siehe : Chladni's Akustik 1830. pg. 62.

²⁾ Oerstedt. Ann. d. chim. et de Phys. T. 25. 1824.

³⁾ Strehlke. Pogg. Ann. Bd. 80. u. 84. 1830.

⁴⁾ Biot. Mém. de l'inst. de France T. 4.

⁵⁾ Seebeck. Doves Repert. d. Phys. Bd. 8. 1849.

⁶⁾ Lamé. Leçon sur la théorie de l'élasticité. Deuxième ed. 1866.

⁷⁾ Bourget. Annales scientifiques de l'école norm. sp. III. pg. 55-59. 1866.

⁸⁾ C. Müller. Cand. math. »Untersuchungen über einseitig freischwingende Membranen und deren Beziehung zum menschlichen Stimmorgan.« Cassel 1877.

Poisson hat diesen Fall auch theoretisch behandelt, *doch liegt das Experimentelle noch sehr darnieder.*“

Ferner muss ich noch auf die neuesten Experimente und theoretischen Arbeiten von A. Elsas, Tomlinson und Tanaka reflektieren, da dieselben den vorliegenden Gegenstand wenigstens teilweise berühren.

A. Elsas¹⁾ behandelt die erzwungenen Transversal-schwingungen von Platten aus »starkem Cartonpapier« und erweitert so die Experimente Chladni's bedeutend. Echte Membranenfiguren sind aber in seinen zwei Abhandlungen nicht zu finden. Auch lässt die Versuchsanordnung von Elsas (pg. 476) manche Bedenken auftauchen, da durch die Belastung der Stimmgabeln deren Schwingungsart sehr beeinträchtigt wird. Weiter unten werde ich eine Methode angeben, wie Cartonplatten leicht und sehr zweckmässig in erzwungene Schwingungen versetzt werden können.

Tanaka's Forschungen²⁾ finden wir in der Abhandlung »Über Klangfiguren, insbesondere über die Schwingungen quadratischer Platten« zusammengefasst. Membranen sind zwar nicht einmal erwähnt worden, allein in seinen theoretischen Folgerungen gelangt Tanaka zu Resultaten, die in manchen Punkten mit den Schwingungsgesetzen der Membranen übereinstimmen.

Tomlinson befasst sich mit den secundären Savart'schen Figuren und namentlich prüft er die verschiedenen Pulver und deren Mischungen. Die Originalarbeit von Tomlinson steht mir nicht zur Verfügung, weshalb ich diesbezüglich nur das Referat von Auerbach³⁾ im Auszug hier beifüge; »Bald wurde nur Sand, bald nur Lycopodiumpulver, bald nur Pulver vom sublimierten Schwefel, bald Eisenfeile, bald endlich Mischungen dieser Stoffe auf die Platte gestreut, wonach sich sowohl für die Knotenlinien, als für die Bauchhäufchen verschiedene Details ergaben.«

¹⁾ A. Elsas. »Über erzwungene Schwingungen von Platten.« Wied. Ann. Bd. 19. u. 20. 1884.

²⁾ Tanaka. Wied. Ann. Bd. 32. 675. 1887.

³⁾ Auerbach. Wied. Beiblätter 1886. pg. 155.

Endlich muss ich noch erwähnen, dass es Melde gelungen ist auf der Oberfläche von Flüssigkeiten Klangfiguren hervorzubringen, die sonst nur auf vibrierenden Membranen beobachtet werden können.¹⁾ Namentlich ist in seiner Abhandlung die **Fig. 6** (Taf. II.) einer echten Membranfigur sehr ähnlich. (Siehe in dieser Abhandlung (**Fig. 40**).

Nun übergehe ich zu meinen eigenen Versuchen und werde dieselben so anführen, wie sie sich entwickelten, teils um den Gang meiner Experimente anzugeben, teils aber auch darum, damit diejenigen Forscher, die sich vielleicht mit diesem Gegenstande weiter befassen wollen, von Schwierigkeiten verschont bleiben mögen, mit denen ich zu kämpfen hatte. Endlich aber auch deshalb, weil wir bei jeder Erregungsmethode neue Erscheinungen und Eigentümlichkeiten wahrnehmen, deren weitläufige Beschreibung, ohne sie selbst beobachtet zu haben, doch unverständlich bliebe. Wer sich mit Membranen eingehender befassen will, der muss die meisten dieser Methoden selber durchmachen, um all' die komplizierten Schwingungserscheinungen klar und deutlich zu sehen.

Erregung der Membranen mittels Glasröhren. Zuerst nahm ich einen flachen Holzring zur Hand, dessen beide Seiten mit Pergamentpapier bespannt waren und welcher Apparat mir sonst zu anderen akustischen Zwecken diente, um auf den ausgezeichneten Membranen einige Versuche mit vibrierenden Glasröhren anzustellen. An den flachen Rand des Ringes klebte ich einen Kork von ungefähr 1 cm. Höhe und legte auf diesen eine Fingerdicke, 132 cm. lange Glasröhre so auf, dass dieselbe in ihrem Schwerpunkte unterstützt war. Nachdem ich jetzt die Membran mit feinem Meersande bestreute und die Glasröhre mit der linken Hand niedergedrückt hatte, rieb ich das untere Ende derselben mit nassem Flanell. Als bald zeigten sich Spuren von eigentümlichen Knotenlinien. Da aber die Figuren nicht genügend scharf und deutlich waren, musste

¹⁾ Melde »Akustische Experimentaluntersuchungen.« Wied. Ann. Bd. 30. pg. 169. Taf. II. 1887.

ich auch andere Pulver anwenden. Kork- und Lycopodiumpulver erwies sich als geeignet, so auch fein zerriebenes Elfenbeinpulver, welches mittels einer Feile, oder aus Drehspänen in einem Mörser hergestellt wurde. (Sowohl Sand, als auch andere Pulver werden stets aus einem alten Leinwandläppchen auf die Membran gleichmässig gestreut.) Die Unvollkommenheit der Klangfiguren zwang mich Membranen aus allerlei Stoff, verschiedener Form und Grösse anzufertigen und es zeigte sich bald, welch' grosses Hindernis für das Gelingen der Figuren die relativ zu steifen Membranen waren. — Viel besser gelingen die Versuche, wenn wir dünne und leichte Membranen, deren Rahmen z. B. aus Holzringen von 20—25 cm. im Durchmesser bestehen, an eine recht lange und dicke Glasröhre mit Siegelack so aufkleben,

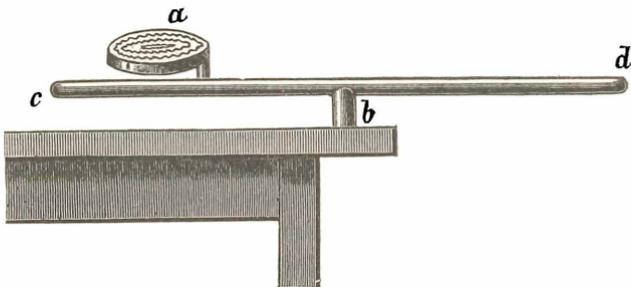


Fig. 2.

wie es (Fig. 2) versinnlicht. Die Glasröhre *cd*, die wir in der linken Hand halten, wird ganz einfach an irgend einen festen Körper gestützt — am besten auf ein stabiles Holzzylinderchen *b* — und mit nassem Flanell gerieben. (Wollen wir die so hervorgebrachten Klangfiguren einem grösseren Auditorium zeigen, so müssen wir die Membran mit Elfenbeinpulver bestreuen, welches, weil es elektrisch wird, so gut anhaftet, dass wir die Membran beliebig umdrehen können.) Während des letzten Verfahrens bemerkt man alsbald, dass die Membran beim stärkeren Reiben der Glasröhre einen durchdringend scharfen und eigentümlich schwirrenden Ton von sich gibt, wobei das Pulver heftig aufwirbelt und sich auf der Membran gleichmässig verteilt, oder aber in Kreisen sich lagert, welche heftigen Schwankungen unterworfen waren. Eine ganze Menge

von Tönen macht sich geltend — und es lohnt sich diesen interessanten Versuch zu wiederholen.

Erregung der Kartonplatten mittels Glasröhren. Alsbald wiederholte ich sehr erfolgreich die soeben beschriebenen Versuche mit Kartonplatten von 10—40 cm. im Durchmesser, indem ich dieselben am Rande, oder noch besser in der Mitte, mittels kleiner 5—10 mm. hoher Holzklötzchen unterstützte und mit Siegellack auf die Glasröhre klebte (**Fig. 2**). Die so erhaltenen Klangfiguren sind sehr schön und von Bedeutung, weil sie eben den Übergang von den Chladni'schen Klangfiguren zu den Membranenfiguren bilden.

Hier möchte ich eine Bemerkung einschieben, weil A. Elsas, der sich mit Kartonschwingungen viel befasste¹⁾, folgende Behauptung aufstellt: »Die Platte wird aus leichtem und weichem Material hergestellt, damit ihre Eigenschwingungen möglichst wenig in Betracht kommen, und weil die geringe Energie der Fadenbewegung in einem System von grosser Masse und Starrheit keine beobachtbaren Schwingungen hervorrufen kann; denn Platten, wie sie zur Erzeugung der Chladni'schen Klangfiguren gewöhnlich benutzt werden, können schwerlich durch eine leicht zugängliche Tonquelle in erzwungene Schwingungen versetzt werden.«

Die Ansicht von Elsas ist durch die obigen Versuche gründlich widerlegt, denn es können mittels dieser ausserordentlich bequemen und sicheren Methode (**Fig. 2**) Kartone von beliebiger Dicke und Grösse, glatte Holzplatten, ja sogar Metall- und Glasscheiben in erzwungene Schwingungen versetzt werden. — Die aus lauter konzentrischen Kreisen bestehenden Klangfiguren, in welchen hie und da auch radiale Knotenlinien vorkommen, gleichen der hier beigelegten **Fig. 56** und **60—64** und hängen ab von dem Tone der Glasröhre, von der Dicke der Platte und von der Schalleitungsfähigkeit des Materials ab. Auf Platten von gleichem Material sind die Wellenlängen immer gleich, wenn auch die Grösse der Klangfiguren verschieden ist; d. h. je grösser die runden Platten sind, umso mehr konzentrische, von einander gleich weit stehende, also einer halben Wellenlänge entsprechende

¹⁾ A. Elsas. Wied. Ann. Bd. 19. u. 20. pg. 476.

Knotenkreise treten auf. Jedoch muss bemerkt werden, dass die halbe Wellenlänge beim äussersten Knotenkreise, wegen der Akkommodation der Randschwingung der Platten, immer etwas kleiner ist, als die bei den anderen Kreisen; wogegen die dem innersten Kreise entsprechende halbe Wellenlänge gewöhnlich etwas grösser ist, was wahrscheinlich wieder der Akkommodation zuzuschreiben ist.

Auf quadratischen Platten laufen die wellenförmigen Knotenlinien nebeneinander horizontal und gewöhnlich auch vertikal ab, wodurch abgerundete, quadratische Flächen entstehen und andeuten, dass steife Platten, ebenso wie die Membranen sich in Schwingungsfelder teilen, welche in Kreisflächen mit entgegengesetzter Phase (+ —) schwingen. Diese Klangfiguren sind den Glasscheibenfiguren **61, 62, 63, 64** sehr ähnlich, und am schönsten, wenn sie auf schwarzen Kartonplatten mittels Elfenbeinpulver oder Lycopodium hervorgebracht werden. Bei weissen Kartonplatten kann man feines Eisenpulver anwenden

Kartons können übrigens in sehr regelmässige Schwingungen auch so versetzt werden, dass wir sie in ihrer Mitte durchstechen, auf ein passendes Glasrohr schieben, mit Elfenbeinpulver bestreuen und das untere Ende des vertikal stehenden Glasrohres mit nassem Flanell reiben. Hierbei wird die Glasröhre immer in der Mitte festgehalten, oder eingeklemmt.

Erregung der Membranen mittels gleitender Glasstäbchen. Nachdem ich zu Membranen wieder zurückkehrte, glitt mir bei einer Gelegenheit die nasse Glasröhre aus der Hand und da sie zugleich den Kork rieb, so entstand ein schriller Ton und auf der Membran Spuren von wunderbaren Knotenlinien. Ein Blick auf diese neuen Figuren genügte mir, um einzusehen, dass sie so hohen Tönen entsprechen, welche die höchsten aller bis jetzt bekannten Klangfiguren weit übertreffen. Ich setzte diese Versuche mit gespannter Aufmerksamkeit weiter fort, indem ich zugleich die Hilfsapparate zweckentsprechend fortwährend wechselte. Bald machte ich Membranen von verschiedener Form und Grösse, bald wechselte ich das Material, bald die Höhe der Korke und die Dicke der Glasstäbchen, bald wieder die verschiedenartigen

Pulver und versuchte endlich auch andere Tonquellen anzuwenden. (Die passendsten Methoden werde ich weiter unten beschreiben). So gelang es mir Klangfiguren hervorzubringen, deren Schwingungszahl über 100.000 Schwingungen beträgt. Zwei oder drei Millimeter von einander entfernte Knotenlinien (also halbe Wellenlängen), deren entsprechenden Ton man gar nicht mehr hört, gehören zu den leichtesten Experimenten, weil die Membranen gerade für die Schwingungen der höchsten Töne sich am besten eignen. Auf einer quadratischen Membran, deren Seitenlänge 400 mm. beträgt, kann man ohne Schwierigkeit 120 nebeneinander laufende, wellenförmige und *den Longitudinalschwingungen entsprechende Interferenzlinien hervorrufen*. (Siehe **Fig. 7.**) Die Teilchen der angewandten Pulver (auch feiner Sand) lagern sich in scharfen Linien mit solcher Regelmässigkeit auf der schwarzen Fläche der Membran, als wenn sie dort mit einer Stahlfeder gezeichnet worden wären.

Die Apparate sind sehr einfach. Es eignen sich dazu sehr gut Ringe von 2—3 mm. dicken Eisen-, Kupfer- oder Zinkblech, auch Glaszylinder und Trichter, namentlich aber runde, oder eckige, 2—3 cm. dicke Holzrahmen mit 3—4 cm. breiten Rändern.

Das Aufspannen der Membranen. Da gute Membranen von grösseren Dimensionen nicht sehr leicht zu machen sind, so will ich hier die nötigsten Kunstgriffe im Kurzen angeben. In der langen Reihe meiner Versuche erwies sich als bestes Material das schwarze Glanzpapier (»Satin-Papier«). Dieses muss auf der weissen Seite mit wenig nassem Flanell kreuz und quer, schnell und behutsam gerieben werden, doch so, dass es nicht zu nass werde; denn dadurch löst sich die auf der anderen Seite befindliche schwarze Farbe auf, die Membran wird fleckig und bleibt nicht genügend glatt. Ist das Papier genügend befeuchtet, so legen wir es zwischen zwei Bögen Löschpapier, Sorge tragend, dass es nicht runzlig werde. Hiezu eignet sich am besten eine zu diesem Zwecke schon vorbereitete Glasplatte, mit welcher das Löschpapier bedeckt und mit 4—5 Kg. Gewicht belastet wird. Bevor jedoch das Glanzpapier nass gemacht wird, muss schon der zum Kleben nötige, dünn gemachte Leim im aufgelösten

Zustande sein. Jetzt bestreichen wir schnell mit dem Leim, als den geeignetsten Mittel, den Holzrahmen möglichst gleichmässig und sorgen dafür, dass er sich auf den inneren Rändern nicht anhäuft, denn dadurch wird die Membran runzlig und unbrauchbar. Hierauf heben wir die Glasplatte samt dem oberen Löschpapier ab, drücken den Rahmen auf das noch genug nasse Glanzpapier (weisse Seite) und drehen die Membran um. Nun trachten wir mit reinen Händen alle Unebenheiten zu entfernen und der Membran eine möglichst gleichmässige Spannung zu geben. Endlich glätten wir den inneren Rand mit dem Finger derart, dass das Papier an den Rahmen vollkommen anliege. Die ganze Arbeit dauert 5—6 Minuten. Inzwischen verhärtet sich der Leim so weit, dass er nicht mehr nachgibt. Erst jetzt legen wir die Membran aus der Hand und lassen sie ganz austrocknen. Ist das geschehen, so streifen wir das um den Rahmen hervorragende Glanzpapier mit einer Korkfeile ab und die schöne Membran steht uns Jahrelang zur Verfügung. Mit solchen Membranen gelingen alle Versuche leicht.

Die Klangfiguren der höchsten Töne. Nun wollen wir unsere Experimente fortsetzen. Ganz hübsche und immer konzentrische Klangfiguren von kleiner Wellenlänge können wir einfach so erhalten, dass wir 30—80 cm. lange und etwa fingerdicke Stahlstäbe (sie in der Mitte haltend) mit ihrem unteren Ende auf irgend eine Membran schief ansetzen und dieselbe am oberen Ende mit einem leichten Stahlhammer klopfen. Wir hören sehr hohe Töne und sehen augenblicklich um den Stahlstab kreisförmige oder ovale Knotenlinien entstehen, sei es dass wir mit runden, oder aber *eckigen* Membranen arbeiten. (Diesen Klangfiguren können wir, je nachdem wir den Stahlstab stärker oder schwächer anschlagen, grössere oder kleinere Dimensionen geben. — Hiezu eignet sich feiner Sand am besten.) Diese Erscheinung beweist, dass die Bildung der Interferenzlinien auf Membranen auch ohne Reflexion der Wellen von dem Rahmen stattfinden kann. Die Sache ist auch deshalb beachtenswert, weil wir öfters beobachten können, dass irgend eine Membran nicht immer im Ganzen, sondern nur teilweise schwingt. Es zeigt

sich oft, und das namentlich bei Transversalschwingungen, dass auf der Membran eine, oder mehrere Kreisflächen sich bilden, an welchen der Sand in heftiger Bewegung ist, während ihre ganze Umgebung in voller Ruhe zu sein scheint. — Zweckmässiger ist jedoch: wir kleben an den Rahmen irgend einer Membran ein prismatisches, etwa 2 cm. langes, 3—4 mm. breites und etwa 5 mm. hohes Korkstückchen mit Siegelack an, bestreuen die Membran mit sehr feinem Sand oder Lycopodium und reiben das Korkprisma mit einem etwa 4 mm. dicken, 20—25 cm. langen und mit Petroleum befeuchteten Glas-

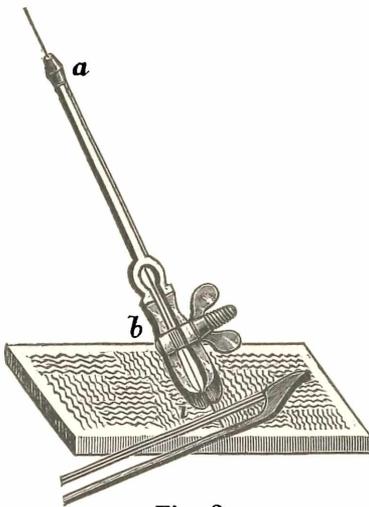


Fig. 3.

stäbchen nach Art eines Fiedelbogens. So entsteht ein hoher Ton und die ihm entsprechende Klangfigur, die uns, wenn die Membran rund ist, lebhaft an das Netz einer Kreuzspinne erinnert. Es gelingt uns schon mittels dieser einfachen Methode, auf einer Membran von 2 dm. Durchmesser, 20—26 konzentrische Knotenkreise hervorzubringen. Auf dieselbe Weise können wir auf einer viereckigen Membran von 30 cm. Seitenlänge 2—3000 kleine Knotenquadrate hervorrufen.

Erregung der Membranen mittels Stielklöbchen und berusster Glasstreifen. Um beliebig hohe Töne zu erzeugen, gebrauchen wir das sogenannte »Stielklöbchen« der Uhrmacher. Fig. 3 zeigt uns dasselbe und zugleich die ganze Versuchsanordnung. In das Stielklöbchen *ab* wird eine ungefähr 1·5 mm. dicke Stricknadel fest eingezwängt, mit der hervorragenden Spitze *i* auf den Holzrahmen irgend einer mit feinstem Sand bestreuten Membran angelegt und mit einem dünnen Fiedelbogen gestrichen. — Es versteht sich von selbst, dass die Stricknadel, deren hervorragendes Ende *i* bei den höchsten Schwingungen kaum 5—10 mm. lang

ist, im Stielklöbchen so lange verschoben (also gestimmt) werden muss, bis wir auf der Membran die reinsten Linien erblicken. Das Einstellen der Nadel macht aber keine Schwierigkeiten, denn es gelingt uns schon nach einer 2—4-maligen Probe das gewünschte Resultat zu erzielen. Diese Methode ist für messende Versuche die geeignetste, denn wir können durch das leichte Stimmen der Stricknadel beliebig grosse Wellenlängen hervorbringen.

Die allerhöchsten Schwingungen erreichen wir aber erst mittels nachfolgender Methode. An der Peripherie eines runden Zinkblech- oder Kupferrahmens irgend einer Membran machen wir mit einer Laubsäge senkrecht zwei parallele, etwa 6 mm. tiefe Einschnitte, welche ungefähr 5—6 mm. weit von einander entfernt sind. Hierauf biegen wir das so ausgeschnittene Zinkstückchen (Zähnen) mittels einer Rundzange vertikal nach oben und machen es mit einer feineren Feile glatt. Reiben wir endlich dieses Zähnen mit einem geschliffenen und berusteten Glasstreifen (5 cm. breiten und 25 cm. langen Spiegelscherben), so entstehen alsbald auf der mit feinstem Sand oder Lycopodium bestreuten Membran die gewünschten Klangfiguren. — Diese herrlichen Gebilde erregen unsere volle Bewunderung, namentlich wenn wir dafür sorgen, dass die Töne rein und ungemischt auftreten; d. h. dass sich zu den Longitudinalschwingungen keine isochronen Transversalschwingungen mischen. Denn es muss bemerkt werden, dass wir es in den meisten Fällen mit beiden Schwingungsarten zu thun haben. Dies erreichen wir gewöhnlich einfach dadurch, dass wir den Zinkrahmen stark an die Tischplatte drücken, oder aber mit französischen Schlüsseln fest anmachen. Es steht jetzt ganz in unserer Macht die Schwingungszahl beliebig zu erhöhen, d. h. die Wellenlängen immer kleiner und kleiner zu machen. Wir brauchen nur das Zähnen allmählich mit einer feineren Feile zu verkürzen und es so immer höher und höher zu stimmen. Oder wir können statt eines Zähnen gleich mehrere von verschiedener Höhe schneiden und so die Membran für allerlei Schwingungen bereit halten. Bricht das Zähnen beim Umbiegen an der Basis ein, so wird es unbrauchbar, weil es gemischte Schwingungen gibt.

In diesem Falle ist es am besten gleich ein anderes Zähnchen zu schneiden. Das Abfeilen müssen wir solange fortsetzen, bis wir ganz reine Klangfiguren erhalten. Manchmal genügt ein einziger Feilstrich, um die nötige Höhe zu erreichen, oder aber 1—2 Knotenlinien mehr hervorzurufen. Es ist gut, wenn wir den oberen Rand des Zähnchens rund abschleifen, damit der berusste Glasscherben möglichst wenige Punkte streiche. Oft ist es auch vorteilhaft, wenn wir den dicken Glasscherben beim Reiben mit der linken Hand an das Zähnchen fest andrücken, weil dadurch störende Schwingungen beseitigt werden; aber gewöhnlich wird der berusste Scherben nur sehr sanft gestrichen. (Um das auf der Membran liegende Pulver wieder zu ordnen, ist es am zweckmässigsten, wenn man den Rahmen der Membran etwa 3—4 cm. einseitig hebt und ihn auf die Tischplatte zurückfallen lässt. Beim Anwenden des *Lykopodiums* kann auch ein flacher, feinhaariger Pinsel gute Dienste leisten.)

Auf die nun beschriebene Art erreichen wir alsbald die höchsten, ja so hohe Töne, welche mit unserem Gehörorgan nicht mehr wahrnehmbar sind. Der berusste Glasscherben gleitet auf den Zähnchen stumm und scheinbar ohne Reibung, aber die zarten Knotenlinien erscheinen jeden Augenblick und zeigen Wellen von nur 2—3 mm. Länge. So z. B. erreicht man mittels eines 1.2 mm. hohen Zähnchens, auf einer Membran von 130 mm. Durchmesser, 60—80 (sogar 93) konzentrische Kreise, die leicht zu zählen, wenn auch ihrer Krümmungen wegen nicht leicht direkt zu messen sind. Da aber die Dimensionen der Membran bekannt sind, so können die Knotenlinien indirekt, also durch Abzählen gemessen werden.

Wollen wir die soeben beschriebenen Versuche auf Membranen mit hölzernen Rahmen anstellen, so gelingt uns auch das, wenn wir in den Rahmen mehrere, etwa 3 mm. dicke Kupferstifte einschlagen, bis zu den Höhen 1—5 mm. abfeilen und sie endlich mit dem berusteten Glasscherben sanft streichen. (Es sei nur noch bemerkt, dass auf den Holzrahmen, oder auch Blechringen gleichzeitig radiale, oder krumme Knotenlinien sich zeigen, welche dem dickeren und besser leitenden Material entsprechend, viel grössere Wellenlängen zeigen, als diejenigen sind, welche auf den Membranen selbst entstehen.

Diese Erscheinungen werden wir vorläufig unberücksichtigt lassen).

Die auf die soeben beschriebene Weise erhaltenen Klangfiguren entsprechen nicht den Transversal-, sondern den *Longitudinalwellen* der Membranen. Dass wir es hier wirklich mit Longitudinal- und nicht mit Transversalschwingungen zu thun haben, beweist vor Allem der Umstand, dass bei Transversalschwingungen der Sand senkrecht emporspringt, ja oft zu sieden scheint und ferner, dass sich hier immer »Schwingungsmittelpunkte«, oder »Schwingungsmittellinien« bilden (Staubwölkchen der Schwingungsmaxima). Siehe **Fig. 12, 16, 27, 31 und 34**. Bei reinen Longitudinalwellen entstehen dagegen die Staubwölkchen nie und der Sand hüpfst nicht, sondern gleitet ruhig und sanft von einer Knotenlinie zur anderen. Aber noch wichtiger ist der Umstand, dass bei Transversalschwingungen die kleinste Belastung der Membran — oft einige Sandkörner — sowohl den Ton, als auch die Form und die gegenseitigen Entfernungen der Knotenlinien beeinflusst, wogegen bei Longitudinalschwingungen die Belastung und also auch die Spannung der Membran gar nicht in Betracht kommt. Wir können bei Longitudinalschwingungen die Membranen bis zum Zerreißen belasten, ohne dass sich die Form oder die Wellenlänge der Knotenlinien ändern würde. Noch mehr: zu Longitudinalschwingungen brauchen wir nicht einmal die Membranen, sondern wir legen ganz einfach das Glanzpapier, oder auch gewöhnliches Schreibpapier auf die Tischplatte, bestreuen es mit Sand, setzen das Stielklöbchen an, reiben es mit dem Fiedelbogen und allsogleich erscheinen unsere bekannten Figuren in voller Reinheit. Wir mögen das Papier auch hier schwer belasten, oder an beliebig vielen Stellen durchlöchern, alles das ändert nichts an den Wellenlängen, nur höchstens, dass sich um die Löcher die Knotenlinien etwas anders krümmen. Alles dies widerspricht so sehr den Gesetzen der Transversalschwingungen, dass diese zwei Erscheinungen miteinander nicht verwechselt werden können. Endlich muss ich noch bemerken, dass die Knoten-

linien der Transversalschwingungen immer etwas verwaschen sind, wogegen die der Longitudinalschwingungen immer sehr rein und scharf auftreten. Diese letztere Bemerkung müssen wir stets vor Augen halten, um zu wissen mit welcher Schwingungsart wir es zu thun haben. (Ganz dasselbe Verfahren, wie mit dem auf der Tischplatte liegenden Papierbogen, können wir auch bei beliebig grossen und dicken Kartons einschlagen und erhalten sehr schöne, aber der grösseren Schalleitungsgeschwindigkeit in den Kartons entsprechende Klangfiguren mit grösseren Wellenlängen).

Betrachten wir nun die Resultate der höchsten Töne. Angenommen, dass wir Interferenzlinien vor uns haben, welche 5 mm. weit von einander abstehen, was also der halben Wellenlänge des betreffenden Tones entspricht, so müssen wir nach der Formel $n = \frac{c}{\lambda}$ (bei 20° C.) die Schwingungszahl 34477 erhalten; wenn wir nämlich annehmen, dass die Schalleitungsfähigkeit des Glanzpapiers der der atmosphärischen Luft gleich ist. Wenn wir aber nach Melde¹⁾ annehmen, dass die Schalleitungsgeschwindigkeit des schwarzen Glanzpapiers 1962 m., also 5·68-mal grösser ist, als die der atmosphärischen Luft, so müsste der Wellenlänge von 10 mm. die Schwingungszahl 195829·36 entsprechen. Es fragt sich nun, ob wir dieses Resultat nach Melde annehmen können, oder nicht? Ich glaube, dass nicht, denn wenngleich wir den sehr hohen Ton bei 10 mm. Wellenlänge (auf dem Glanzpapiere) kaum noch wahrnehmen können, so dürfte doch diese Zahl (195829·36) viel zu hoch sein, weil die Wellenlänge bei dem nächsten, schon bestimmt hörbaren Tone, nur 11 mm. beträgt und diesem die Schwingungszahl 31342·72 entspricht. Es muss also der hohe Sprung jedenfalls unberechtigt erscheinen; d. h. die Schalleitungsgeschwindigkeit des Glanzpapiers ist bei Longitudinalschwingungen höchstens so hoch zu setzen, als die der atmosphärischen Luft. — Dieses Problem muss vorläufig unentschieden bleiben! — Es scheint, dass bei Longitudinalwellen, welche auf Membranen entstehen, sowohl die Schalleitungsgeschwindigkeit der Luft,

¹⁾ Melde. Wied. Ann. 1892. Bd. 45. pg. 745. (Einseitig schwarzes Buntpapier [Satiné]).

als auch die des Materials der Membran ihre eigene Rolle spielt. Die Membran selbst bildet beiderseitig die Grenzflächen der zu erschütternden Luftschicht. Dem entsprechend sollte die Membran mit ihrer Schalleitungsgeschwindigkeit für sich, und die Luft wieder mit ihrer eigenen für sich schwingen. Da aber das Material der Membran eine grössere Schalleitungsgeschwindigkeit hat, so beeinflusst sie die trägere Luft der Art, dass sie sie mit sich weiter reisst und dadurch grössere Wellenlängen zu machen zwingt; hingegen verzögert und verkürzt die Luft die Wellenlängen der Membranen. Aus diesen zwei Komponenten entsteht eine Resultierende, welche weder den Wellenlängen der Membranen, noch aber denen der Luft entspricht. Ferner muss aber die in dem Material der Membran befindliche Luftschicht, also ihre Dicke und Menge und ebenso die Dicke der Membran, also die Menge ihres Materials sich auch bewähren. Demzufolge müssen die Knotenlinien umso weiter auseinanderrücken (grössere Wellenlängen ergeben), je dicker das Material der zu erschütternden Membran ist.

Um das zu entscheiden, nahm ich verschiedene Stoffe zur Hand und erregte sie mittels eines zu diesem Zwecke konstant gehaltenen Tones. Das Stielklöbchen diente dazu und wurde so eingestellt, dass es auf dem Glanzpapier Wellenlängen von 10 mm. hervorbrachte. Die Resultate waren

	hatte die Dicke	und ergab die Wellenlänge
Das Glanzpapier	0·07 mm.	10·00 mm.
Seidenpapier	0·03	7·50
Pauspapier (Kopierpapier)	0·04	8·0—8·50
Mit Gold überklebtes Papier	0·07	11·00
Gelatine-Platte	0·03	4·0—4·5
Gelatine-Platte	0·04	6·0—6·5
Gelatine-Platte	0·07	9·0—9·5
Gelatine-Platte	0·14	13·5—14·0
Einfaches Schreibpapier	0·06	10·0—10·5
Ministerpapier	0·07	8·8—9·5
Pergamentpapier	0·14	13·5
Weisses Lackpapier	0·12	12·5

	hatte die Dicke	und ergab die Wellenlänge
Weisses Kartonpapier	0·71 mm.	30·0 mm.
Packpapier, grau	0·10	13·5
Pappendeckel, braun	1·23	36·5
Pappendeckel, grau	2·43	49·0
Kautschukplatte (verlaufend abgeschliffen)	0·6-1·75»	26·0-48·0
Stanniol	0·02	4·0-4·5
Stanniol	0·03	6·0
Stanniol	0·15	13·5
Eisenblech	0·30	14·5
Kupferblech	0·10	18·5-19·0

Über Glasplatten werde ich weiter unten berichten.

Um jetzt zu entscheiden, wie die Wellenlängen mit der Dicke irgend eines Materials zunehmen, wurde das Glanzpapier gewählt, weil es auch sonst bei den meisten Versuchen angewendet wurde. Ich klebte die einzelnen Blätter sehr sorgfältig übereinander, indem ich die weisse Seite des Papiers mit Gummiarabikum möglichst dünn bestrichen habe. Alsdann wurden die Blätter gepresst, gut getrocknet und endlich an den Rändern scharf abgeschnitten.

Die Resultate waren

	mit der Dicke	ergab Wellenlängen von
1 Blatt Glanzpapier	0·07 mm.	10·0 mm.
2 Blätter	0·15	14·5
3	0·22	17·5—18·0
4	0·30	22·0—22·5
5	0·37	25·0
6	0·44	26·0—26·5
7	0·52	27·0—27·5
8	0·59	29·0
9	0·66	31·0—31·5

Es zeigte sich also, dass mit zunehmender Dicke des Materials die Wellenlänge anfangs schneller, später aber langsamer wächst; jedoch liess sich aus diesen wenigen Versuchen vorläufig keine feste Regel entnehmen.

Beurteilung der Schwingungszahlen sehr hoher Töne. Um auch die Schwingungszahlen aus den Klang-

Über Klangfiguren gespannter Membranen und Glasplatten. 91

figuren wenigstens annähernd bestimmen zu können, wähle ich vor Allem das *Stanniol*, weil es ein leicht zugängliches und auch sonst zweckmässiges Material ist; ferner aber, weil es in seinen Poren keine Luftschichten enthält und endlich, weil seine Dicke sehr klein ist und so die Wellenlängen sich immer mehr den Luftwellenlängen nähern. (Die Reibung zwischen Luft und *Stanniol* musste wegen messenden Schwierigkeiten vorläufig ganz vernachlässigt werden.)

Ich nahm einen flachen, kreisrunden Zinkblechring von 131 mm. inneren und 212 mm. äusseren Durchmesser zur Hand, schnitt nach der schon beschriebenen Weise ein ungefähr 6 mm. hohes, 50 mm. breites und 1.45 dickes Zähnchen am äusseren Rande des Ringes, überklebte den Ring mit reinem *Stanniol* möglichst gleichmässig (wenngleich bei Longitudinalwellen die Spannung nicht in Anbetracht kommt), bestreute es mit sehr feinen Sand oder *Lykpodium* und strich endlich das Zähnchen mit dem berussten Glasscherben. Weniger als 26 konzentrische Kreise liessen sich auf *Stanniol* rein, wegen isochronen Transversalschwingungen nicht hervorbringen; es musste also das Zähnchen weiter abgefeilt werden. Auf diese Art erhielt ich folgende Resultate:

Das Zähnchen war mm.	es entstanden konzentr. Kreise		
5.5 hoch, (5.0 breit 1.45 dick)	26		(Der Ton war sehr hoch, aber hörbar.)
5.0	30	u. auch 60	(Der Ton war sehr unangenehm.)
4.5	35—36	70—72	(Der Ton war schon unhörbar.)
4.0	40—42	80—84 (?)	
3.5	44—45	88 (?)	(? unsicher)
3.0	48—49	und (?)	(? unsicher)
2.5	53—54		
2.0	60—62		
1.5	66—70		
1.2	73—76		

Weiter liessen sich die Versuche nicht verfolgen.

Auf einem flachen, kupfernen Ringe von 130 mm. inneren und 220 mm. äusseren Durchmesser erhielt ich auf *Stanniol* folgende Resultate:

Das Zähnchen war mm.	es entstanden konz. Kreise		
8·0 hoch, (3·64 breit 2·43 dick)	28	u. 56	(Der Ton war sehr hoch u. unangenehm.)
7·5	30	60	»
7·0	32—33	u. 66	»
6·5	36	u. 72	(Der Ton war schon unhörbar.)
6·0	40	80	
5·5	44	88	(? unsicher)
5·0	46		
4·5	50		
4·0	54—55		

Weiter liessen sich die Versuche mit Sicherheit nicht verfolgen. Noch muss ich bemerken, dass bei den tieferen Tönen sich die Transversalschwingungen beimischen und die Abzählung der Knotenkreise erschweren. Aber bald erkennen wir diejenigen Interferenzlinien, welche zusammengehören und gezählt werden sollen und welche zu vernachlässigen sind; bei höheren Tönen kommen störende Einflüsse seltener vor. Ferner muss noch hervorgehoben werden, dass die berusste Glasplatte nur sanft an den Zähnchen gestrichen werden soll, da sich mit dem grösseren Drucke die Anzahl der Knotenlinien beträchtlich ändern kann.

Wie schon erwähnt, war bei 26 Knotenkreisen der Ton sehr hoch und unangenehm, bei 30—32 Kreisen war er unerträglich und übte einen betäubenden Druck auf das Gehirn; bei 33—34 Kreisen war es sehr unsicher, ob der Ton überhaupt noch hörbar sei, und oberhalb dieser Grenzen konnte ich den Ton nie wahrnehmen.

Nach diesen Versuchen wurde der 131 cm. breite Zinkblechring wieder mit Glanzpapier überklebt, und ich erhielt c. p. ungefähr 2·5 mal so grosse Wellenlängen, als auf dem Stanniol. Es konnten 10—30 (respektive 20—80) konzentrische Knotenkreise hervorgebracht werden, und da sie sehr scharf waren, so konnte man sie auch direkt messen. Bei 10 mm. Wellenlänge, also bei 34,400 Schwingungen (20° C.) war der Ton ausserordentlich hoch, aber noch wahrnehmbar, wogegen bei $\lambda = 8$ mm., also bei 43000 Schwingungen keine Spur

mehr konstatiert werden konnte. Auch schon bei $\lambda = 9$ mm. (38222 Schwingungen) konnte nicht unzweifelhaft entschieden werden, ob der Ton noch hörbar ist, oder nicht. — Aus diesen Versuchen würde sich also ergeben, dass bei sehr hohen Tönen die Schalleitungsgeschwindigkeit des Glanzpapieres ungefähr so gross ist, wie die der atmosphärischen Luft. — Berechnen wir endlich bei den auf Stanniol hervorgebrachten 32 Knotenkreisen, deren $\lambda = 4\cdot094$ mm. gemessen wurde, die Schwingungszahl des Tones, so ergibt sich (bei 20° C) die Zahl 84201. Das wäre, wenn man die Schwingungszahl des höchsten hörbaren Tones in freier Luft auf etwa 35000 setzt, ungefähr das 2·5-fache der Luftvibrationen. Daraus müssten wir den Schluss ziehen, dass die Schalleitungsgeschwindigkeit des Stanniols bei den Longitudinalwellen dieser hohen Töne ungefähr zwei und einhalbmal kleiner ist, als die der atmosphärischen Luft.

Die soeben angeführten Versuche und Tabellen beweisen nun unstreitig, dass die Schalleitungsgeschwindigkeiten der Körper bei Longitudinalschwingungen hoher Töne sehr veränderliche Werte haben und dass dieselben umsomehr erniedrigt werden, je höher die Töne und je dünner das Material ist, auf welchem eben die Klangfiguren entstehen.

Die gewonnenen Resultate widersprechen unseren älteren Erfahrungen so sehr, dass wir uns nach den Ursachen dieser auffallenden Erscheinungen umsehen müssen. Aus diesem Grunde machte ich einige vorläufige, aber sehr sorgfältige Versuche über die Schalleitungsgeschwindigkeit (Celerität) in engen Glasröhren von 13, 15 und 20 mm. im Durchmesser und es ergaben sich mit ausgezeichneten Stimmgabeln (Siehe meine Tonleiter pg. 101—102) für die Skala c' — c'' bei 20° C. folgende Resultate:

für die Glasröhre von 13 mm. Diameter:					
		Schwz.		mm.	m.
1.*)	c'	256	$\lambda' =$	1299·68	Celerität = 332·71808
25.	c''	512	$\lambda'' =$	636·00	» = 325·63200
					diff. = 7·08608

*) In freier Luft: $c' \dots 256 \dots \lambda' = 1345\cdot7$ mm. ... Cel. = 344·5 m.

für die Glasröhre von 15 mm. Diameter:

		Schwz.	mm.		m.
1.	c'	256	$\lambda' = 1298\cdot88$	Celerität =	332·51328
25.	c''	512	$\lambda'' = 635\cdot20$	» =	325·22240
				diff. =	7·29088

Für die Glasröhre von 20 mm. Diameter:

		Schwz.	mm.		m.
1.	c'	256	$\lambda' = 1300\cdot48$	Celerität =	332·92288
24.	c''	512	$\lambda'' = 636\cdot80$	» =	326·04160
				diff. =	6·88128

Es zeigt sich auch hier, dass höhere Töne (wenigstens in Glasröhren) eine kleinere Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben, als tiefere. (Übrigens werde ich über diesen Gegenstand und die im Gange begriffenen Versuche bei einer anderen Gelegenheit ausführlicher berichten.) Die Ursache der hemmenden Wirkung müssen wir der Reibung, der sich hier bildenden Wärme und vielleicht auch der Reibungselektrizität zuschreiben.

Klangfiguren tieferer Töne, mit grösseren Wellenlängen. Nach obigen Experimenten suchte ich die Ursache der Veränderlichkeit der Wellenlängen zu finden. Um das zu erreichen, wandte ich mich mit grossem Vertrauen den Glasröhren zu, in der Meinung, dass dieselben ganz konstante Töne geben würden!

Jetzt setzte ich die Membran ganz einfach auf den Tisch, nahm eine Glasröhre zur Hand, stützte sie mit ihrem Schwer-

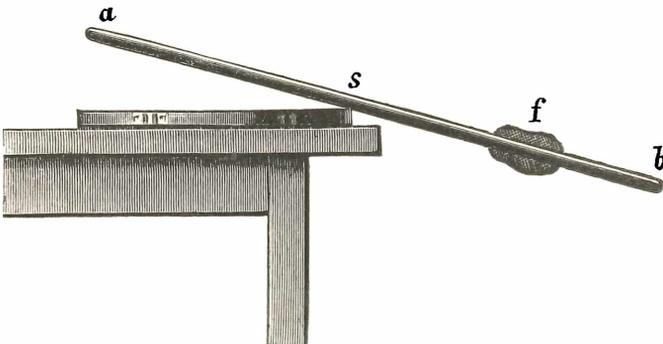


Fig. 4.

punkte an den Rand des Rahmens (also ohne Kork), drückte sie mit der linken Hand fest an und rieb mit der rechten Hand ihr freies Ende mit nassem Flanell f (**Fig. 4**). So erhielt ich ganz befriedigende Resultate, namentlich wenn ich mehrere Glasröhren von verschiedener Dicke und Länge nahm und die geeignetste für den Versuch auswählte. Allein es zeigte sich bald, dass die Töne der Glasröhren ebenfalls veränderlich sind. Anfangs konnte ich das mit meinem Gehörorgan nicht beurteilen, aber die auf den Membranen in Zwischenräumen von wenigen Sekunden neuerdings hervorgebrachten Knotenlinien machten mich bald aufmerksam, dass ich mich in meiner obigen Annahme täusche. Es war mir unbegreiflich, dass auf einer und derselben Membran, einem und demselben

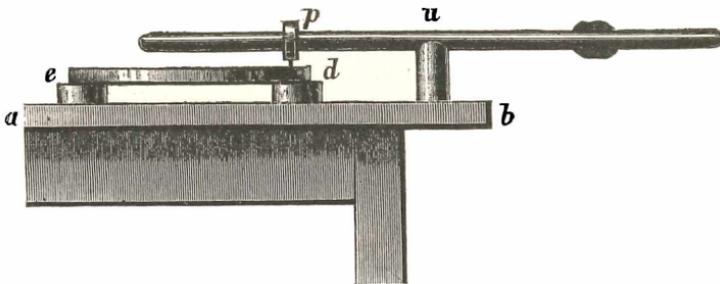


Fig. 5.

Ton entsprechend, 2—3 Interferenzlinien mehr oder weniger auftreten können. Um also Versuchsfehlern möglichst vorzubeugen, stellte ich die weiteren Versuche folgendermassen an. (**Fig. 5**) An den Rand eines Tisches wurde ein Holzklötzchen u fest angemacht und auf dieses eine Glasröhre in ihrem Schwerpunkte mittels Sieglack befestigt. Aldann schob ich auf die Glasröhre einen kleinen Korkring p , an dessen unterem Rande die Spitze einer dicken Nähnadel mit Sieglack fest angepasst war, soweit als es eben am zweckmässigsten gefunden wurde. Hierauf drückte ich die Nadelspitze in den Holzrahmen der Membran ein, die mit feinstem Sand bestreut wurde und rieb die Glasröhre möglichst sanft mit nassem Flanell. Es ist leicht einzusehen, dass jetzt die Resultate befriedigender ausfielen. (Der Sand wurde durch Anklopfen des Rahmens wieder-

geordnet) Trotz aller Vorsichtsmassregeln jedoch geschah es noch immer, dass nach einigen Minuten eine oder zwei Knotenlinien mehr oder weniger sich zeigten. Die Ursache dieser Erscheinung müssen wir dem

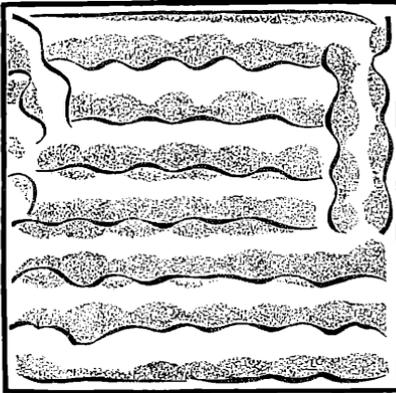


Fig. 6.

Wechsel der Temperatur der nassen Glasröhre zuschreiben; denn da wir es auch hier mit Longitudinalwellen zu thun haben, so kommt die Spannung der Membran nicht in Betracht. Manchmal geschieht es auch, dass die scharfen Interferenzlinien sich spalten und wir jetzt statt 15, 30 Linien erhalten. Dies deutet darauf

hin, dass die Glasröhre, wahrscheinlich durch Abkühlung, für einen höheren Oberton, den wir bis jetzt nicht bemerkten, geeigneter geworden ist; es bleiben im letzteren

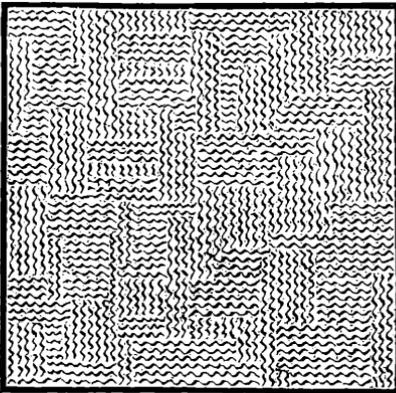


Fig. 7.

Falle die vorigen Interferenzlinien auf der Membran, aber es drängen sich auch neue hinzu. Diese Erscheinung kommt übrigens auch bei den Saitentönen häufig vor. In der **Fig. 6** sehen wir eine schöne und eben im Entstehen begriffene »Linien-spaltung«, wogegen die **Fig. 7** eine ganz reine und den

Longitudinalschwingungen entsprechende Klangfigur darstellt.

Transversalschwingungen der Membranen. Um jetzt mit ganz bestimmten Tönen arbeiten zu können und auch die Transversalschwingungen in Anspruch zu nehmen,

wandte ich mich zu den schwingenden Saiten und Stimmgabeln. Pfeifen wurden wenig benutzt, weil sie, wie schon erwähnt wurde, sehr störende Partialschwingungen hervorrufen.

Das Monochord (**Fig. 8.**) schien zu diesem Zwecke geeignet zu sein, doch zeigte es sich bald, dass hier grosse Schwierigkeiten zu überwinden sind. Erst jetzt sehe ich, warum es den vortrefflichen Forschern, die sich mit diesem Gegenstande so ausdauernd befassten, nicht gelang Membranen in regelmässige Schwingungen zu bringen. Sie irrten sich erstens darin, dass sie dicke und kleine Membranen gebrauchten, namentlich aber, dass sie ihre Versuche nicht bei den höheren, sondern bei den tieferen Tönen angefangen haben. Vielleicht wäre es mir nie gelungen die anzuführenden Resultate zu erreichen, wenn mich der Zufall nicht zuerst auf die höchsten

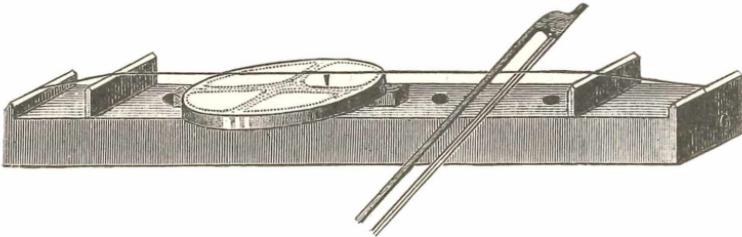


Fig. 8.

Töne geleitet hätte. Nur das Studium der letzteren und die sichere Überzeugung, dass das Problem gelöst werden kann, führte mich zu Erfolgen. Nach längerem Experimentieren kam ich zu der Überzeugung, dass ich das Ziel nur dann erreichen werde, wenn ich recht dicke Stahlsaiten nehme und diese sehr stark spanne, was aber auf meinem Monochorde nicht möglich war, weil sowohl die Sättel, als auch die Seitenlehnen Elfenbeinunterlagen hatten und somit schon bei mässigeren Spannungen zu bersten anfangen. Ich nahm daher ein starkes Brett, welches in der Mitte ein grosses Loch hatte und über welches die Membran zu liegen kam. Die Aufgabe dieses Loches ist die von der Tischplatte reflektierten Luftwellen abzuschwächen und störende Kollisionen zu verhüten. Das Brett selbst lag auf zwei 35 cm. hohen und breiten Gläsern. Nun spannte ich auf

das Brett mittels zwei sehr starken und durchlöcherter Stahlschrauben eine dicke Stahlsaite, welche mir bis c'''' zu stimmen gelang. Nach längeren Suchen fand ich die beste Tonübertragungsmethode und kehrte alsdann wieder zum Monochorde zurück. Als gut hat sich folgendes Verfahren erwiesen an die Saite des Monochordes (**Fig. 8.**) wird ein kleines Korkkegelchen mit Siegellack geklebt und die Membran darunter geschoben, welche alsdann mittels zwei keilförmiger Brettchen beliebig gehoben und angepasst werden kann. Der Steg wird so eingestellt, dass die Saite oberhalb der Membran möglichst kurz sei. Es ist auch hier besser, wenn wir die Membran oberhalb der gespannten Saite anbringen, weil dadurch die Reflexion der unteren Luftwellen mehr abgeschwächt wird. Diese Versuche können auch bei tieferen Tönen als befriedigend angesehen werden, namentlich wenn wir die Korkspitze an die Membran kleben, damit diese durch die Saite unbedingt mitgerissen werde und damit einzelne Schwingungen nicht ausbleiben, oder vielmehr keine störenden Kollisionen stattfinden; ferner aber, wenn wir die schwingende Saite solange stimmen, bis sie mit irgend einem Eigentone der Membran vollkommen übereinstimmt. Schöne und ganz reine Klangfiguren erhalten wir überhaupt nur dann, wenn die Saite mit der Membran unisono schwingt. Als Angriffsstelle eignet sich der Mittelpunkt der Membran wohl am besten, aber wir erhalten auch so reine Klangfiguren, wenn die Membran in irgend einem anderen Punkte, namentlich aber in einem »Schwingungsmittelpunkte« angegriffen wird. So ein Schwingungsmittelpunkt kann nur experimentell, also durch Verschiebungen der Membran gefunden werden, weil er für jeden einzelnen Ton anderswo zu liegen kommt.

Bei diesen Versuchen entsprechen natürlich alle Klangfiguren den Transversalschwingungen der Membranen.

Bald merkt man aber auch bei diesen Experimenten, dass der Ton der Saite fortwährend variiert zwischen Grenzen, die mit dem Gehörorgane nicht wahrnehmbar sind, denn die Klangfiguren ändern ihre Gestalt, aber auch die Wellenlänge. Die Ursache der Veränderlichkeit des Tones muss in dem Temperaturwechsel und der sich fortwährend ändernden Spannung

der Membran gesucht werden. Es ist aber auch noch ein anderer Übelstand zu beachten: nämlich dass sich zu den Transversalschwingungen leicht isochrone Longitudinalschwingungen beimischen und die Klangfiguren modifizieren. Mit welcher Schwingungsart wir es zu thun haben, lässt sich, wie schon erwähnt wurde, daran erkennen, dass die den Longitudinalwellen entsprechenden Knotenlinien viel schärfer sind, als die anderen. Weitere Störungen entstehen noch dadurch, dass der Fiedelbogen, der möglichst schmal ist und stark gespannt sein muss, sich nie ganz genau auf einer und derselben Stelle der Saite führen lässt und also störende Partialtöne hervorruft. Diesen Übelstand suchte ich dadurch zu beseitigen, dass ich an das Monochord — möglichst nahe der gespannten Saite — ein gabelförmiges Bleistück setzte, welches hin und her verschoben werden konnte, aber seinem eigenen Gewichte zufolge sich durch den Fiedelbogen nicht wegrücken lies. Doch gelang es mir auch so nicht diesen Fehler ganz zu beseitigen.

Viel leichter und sicherer als mittels Saiten, können wir Membranen mit vertikal befestigten Glasstäben oder Glasröhren in sehr regelmässige Transversalschwingungen bringen. (**Fig. 9**) Zu diesem Zwecke nehmen wir 20—30 mm. dicke und beliebig lange Glasröhren, welche in ihrer Mitte in ein längliches Brettchen (Holzleiste) mittels Siegellack so befestigt werden, wie es beiliegende Figur versinnlicht. Das untere, rund abgeschmolzene Ende der Glasröhre wird mit einem etwa 10 mm. langen und 3—4 mm. dicken Siegellacktröpfchen (Spitze) *a* versehen. Hierauf suchen wir den Mittelpunkt der Membran und bringen dorthin auch ein möglichst kleines und spitziges Siegellacktröpfchen an. Guter horizontaler Lage wegen, namentlich aber damit die von der

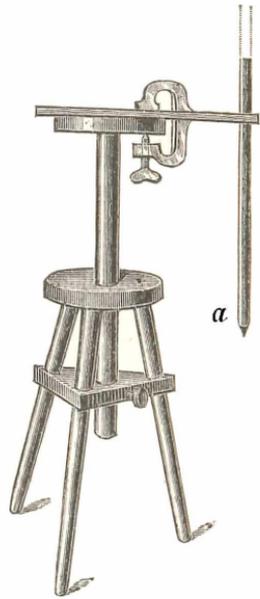


Fig. 9.

Tischplatte reflektierten Luftwellen keine Störungen verursachen, also abgeschwächt werden, stellen wir die Membran auf zwei gleich hohe Batterie-Gläser, schieben sie unter das vertikale Glasrohr, bringen die beiden Siegellackspitzen an einander und verschmelzen sie mittels eines dickeren und heiss gemachten Eisendrahtes mit einander und bestreuen endlich die Membran mit irgend einen Pulver. Wird nun die Glasröhre mit nassem Flanell gerieben, so entsteht augenblicklich eine sehr schöne Klangfigur, wie wir sie z. B. in **Fig. 43** abgebildet sehen. Der Durchmesser meiner Membranen beträgt 100—350 mm. Je grösser die Membranen sind und je besser wir deren Mittelpunkt getroffen haben umso regelmässiger entwickelt sich auch die Klangfigur. Wollen wir die Angriffspunkte der Membranen wechseln, so müssen wir an die unten abgerundete Glasröhre statt der Siegellackspitze ein möglichst kleines und weiches Stückchen Hirschleder ankleben. Natürlich wird dieses Lederstückchen mit der Membran nicht verklebt.

Diese Methode hat nur den Nachteil, dass wir auf diese Art keine tieferen Töne hervorrufen können.

Versuche mit Stimmgabeln. Will man Membranen mit Stimmgabeln in Transversalschwingungen versetzen, so müssen deren Töne, wie schon erwähnt wurde, mit den Eigentönen der Membranen vollkommen übereinstimmen. Jedoch müssen hier auch noch folgende Bedingungen eingehalten werden. Erstens darf die Membran nie auf der Tischplatte liegen, wegen der schon mehrmals erwähnten Kollisionen der reflektierten Luftwellen, sondern sie muss frei und möglichst horizontal, etwa in einer Höhe von 30—40 cm. oberhalb der Tischplatte aufgestellt werden. Ferner muss man dafür Sorge tragen, dass der Sand möglichst rein, nicht zu grob, aber auch nicht zu fein sei. Und endlich muss man viele Stimmgabeln zur Verfügung haben, um gute Resultate zu erzielen. Ich arbeitete mit 32 Stimmgabeln, will aber hier nur diejenigen in Betracht ziehen, deren Schwingungszahlen sehr genau bestimmt und an die Stimmgabeln eingraviert wurden. Zu diesen und auch auch anderen akustischen Zwecken liess ich mir eine vollständige Tonleiter von 25 Stimmgabeln

Über Klangfiguren gespannter Membranen und Glasplatten. 101

anfertigen, deren Intervalle, Wellenlängen und Schwingungszahlen ich möglichst genau berechnete.¹⁾ Um aber die einzelnen Stimmgabeln nicht immer weitläufig beschreiben zu müssen und da ich bei meinen Versuchen alle Töne, mit welchen ich zu thun hatte, immer mit dieser Tonleiter verglichen habe, so will ich hier eine vollständige Tabelle beilegen und in diese auch die Saitenlängen aufnehmen, um so ein klares Bild der ganzen Tonleiter zu geben:

Nr.	Einteilung	Töne	Intervall-Formeln	Intervall-werte	Saiten-längen	Schwin-gungszahlen	Wellen-längen bei 12° C. (λ)
1	24 24	c'	$\sqrt[24]{2^0}$	1·000000	1·000000	256·0000	m.
2	25 24		$\sqrt[24]{2^1}$	1·029302	0·971532	263·5014	1·2907
3	26 24	cis'	$\sqrt[24]{2^2}$	1·059463	0·943874	271·2226	1·2539
4	27 24		$\sqrt[24]{2^3}$	1·090508	0·917004	279·1700	1·2182
5	28 24	d'	$\sqrt[24]{2^4}$	1·122462	0·890999	287·3500	1·1832
6	29 24		$\sqrt[24]{2^5}$	1·155350	0·865537	295·7703	1·1495
7	30 24	dis' es'	$\sqrt[24]{2^6}$	1·189207	0·840896	304·4370	1·1135
8	31 24		$\sqrt[24]{2^7}$	1·224053	0·816958	313·3576	1·0853
9	32 24	e'	$\sqrt[24]{2^8}$	1·259920	0·793629	322·5397	1·0541
10	33 24		$\sqrt[24]{2^9}$	1·296840	1·771105	331·9910	1·0241

¹⁾ Diese Stimmgabeln wurden bei H. Max Kohl in Chemnitz zu meiner vollen Zufriedenheit gemacht. — Der Preis beträgt 330 Mk.

Nr.	Einteilung	Töne	Intervall- Formeln	Intervall- werte	Saiten- längen	Schwin- gungszahlen	Wellen- längen bei 12° C. (λ)
11	34 24	f'	$\sqrt[24]{2^{10}}$	1·334840	0·749153	341·7191	m. 0·9949
12	35 24		$\sqrt[24]{2^{11}}$	1·373953	0·727827	351·7320	0·9666
13	36 24	fis'	$\sqrt[24]{2^{12}}$	1·414213	0·707107	362·0385	0·9391
14	37 24		$\sqrt[24]{2^{13}}$	1·455652	0·686977	372·6470	0·9124
15	38 24	g'	$\sqrt[24]{2^{14}}$	1·498308	0·667420	383·5664	0·8864
16	39 24		$\sqrt[24]{2^{15}}$	1·542210	0·648420	394·8058	0·8612
17	40 24	gis' as'	$\sqrt[24]{2^{16}}$	1·587400	0·629909	406·3745	0·8342
18	41 24		$\sqrt[24]{2^{17}}$	1·633914	0·612027	418·1821	0·8128
19	42 24	a'	$\sqrt[24]{2^{18}}$	1·681790	0·594605	430·5390	0·7897
20	43 24		$\sqrt[24]{2^{19}}$	1·731071	0·577677	443·1544	0·7670
21	44 24	b'	$\sqrt[24]{2^{20}}$	1·781797	0·561231	456·1398	0·7454
22	45 24		$\sqrt[24]{2^{21}}$	1·834010	0·545253	469·5066	0·7242
23	46 24	h'	$\sqrt[24]{2^{22}}$	1·887748	0·529732	483·2633	0·7035
24	47 24		$\sqrt[24]{2^{23}}$	1·943062	0·514652	497·4240	0·6835
25	48 24	c''	$\sqrt[24]{2^{24}}$	2·000000	0·500000	512·0000	0·6640

Über Klangfiguren gespannter Membranen und Glasplatten. 103

Die Anwendung der Stimmgabeln zur Erregung der Membranen finden wir schon bei den Savart'schen Versuchen. Auch Melde erwähnt mehrere Methoden.¹⁾ Ich habe alle durchgemacht. Als ich aber nur sehr unvollkommene Resultate erhielt, war ich gezwungen zweckmässigere Erregungsmethoden zu suchen.

Anfangs wurden die Stimmgabeln auf die hölzernen Rahmen der Membranen senkrecht angeschraubt und zwar auf denjenigen Punkt, welcher sich nach vorhergehendem Suchen zur Übertragung der Schwingungen am besten eignete. Das vorläufige Aufsuchen des geeignetesten Punktes geschah so, dass die einzelnen Stimmgabeln mittels des Tuchhammers (Tampon) zum Vibrieren gebracht und mit dem Stiele schnell auf den Rahmen der schon vorbereiteten Membran gesetzt wurde. Von welchem

Punkte aus die Membran am leichtesten erregbar war, auf diesen wurde die Stimmgabel eingeschraubt und hierauf mit dem Fiedelbogen gestrichen. Später änderte ich diese Methode, da sie etwas unbequem war und die Rahmen sehr

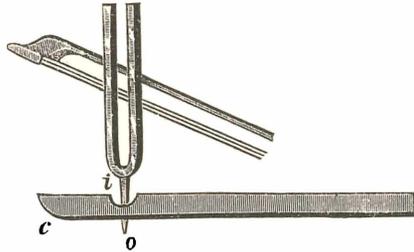


Fig. 10.

viel litten. Jetzt wurden die Stimmgabeln in hölzerne Leisten, wie es die **Fig. 10** versinnlicht, festgeschraubt, mit der Spitze *o* an den Rahmen stark angedrückt und endlich mit dem Fiedelbogen gestrichen. Die Resultate können als befriedigend angesehen werden. Da aber Melde in seiner Akustik (pag. 110) eine »besonders brauchbare« Methode erwähnt, die »darin besteht, dass man an einem Zinken einer Stimmgabel ein kleines Stückchen weichen Filzes ankittet und, nachdem die Gabel angeschlagen oder angestrichen ist, sie so hält, dass sie mit dem Filze die Membran leise berührt«, so habe ich auch diese Methode angewendet. Ich fand aber, dass auch diese Erregungs-

¹⁾ Melde, Akustik 1883. pg. 110–112.

art viel zu wünschen übrig lässt. Die Klangfiguren gelingen nur halbwegs und auch nur dann, wenn zufällig beide Tonquellen unisono schwingen; gewöhnlich wird die Membran so heftig erschüttert, dass man überhaupt keine Klangfigur erhält. Aber auch Kollisionen finden statt, welche die Erscheinungen stören und unsicher machen. Um also sicherer zu gehen und diese Methode für »erzwungene Schwingungen« zu verwenden, habe ich sie so modifiziert, wie es die **Fig. 11** versinnlicht. An ein Edelman'sches Arbeitsstativ wird eine 0·5 mm. dicke und 10 mm. breite Stahlleder *a b c* mittels dünnen Kupferdrahtes befestigt und bei *b* mit Siegellack verkittet, um

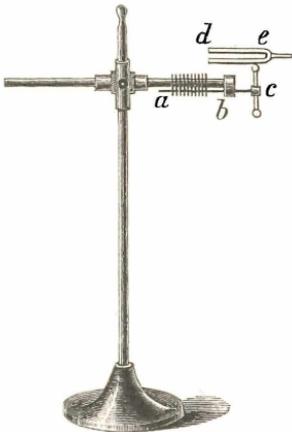


Fig. 11.

keinen Nebenerschütterungen unterworfen zu sein. An dem frei hervorragenden, 25 mm. langen Ende *b c* wird ein ungefähr 30 mm. hohes, 3 mm. breites und vertikal stehendes Holzstiftchen auch mittels Siegellackes befestigt. Das Holzstiftchen ist an an beiden Enden mit weichen Hirschlederlappchen versehen. Jetzt wird das Holzstiftchen an die an zwei hohen Bechergläsern liegende Membran sanft angelegt, beliebig verschoben und endlich mit dem unteren Theile *e* einer tönenden Stimmgabel berührt. Die Membran übernimmt die sanften Schwingungen

leicht und es entstehen gewöhnlich ganz hübsche Klangfiguren. Sollte die Erschütterung der Membran zu schwach sein, so kann man die Stimmgabel vom Punkte *e* angefangen, weiter bis *d* gleiten lassen und so die nötige Intensität erzielen. Diese Methode ist bequem und für »erzwungene Schwingungen« gut brauchbar.

Die »Streichstäbchen-Methode«, welche Melde in seiner Akustik (pg. 111) erwähnt, muss als sehr unzuweckmässig bezeichnet werden, weil die Töne durch die Reibung der Glasstäbchen ausserordentlich variieren, also nie reine Klangfiguren geben und die Membranen in kürzester Zeit verdorben werden.

Vielleicht passt diese Methode für sehr kleine und dicke Membranen, — für sehr empfindliche keinesfalls.

Vor allen Stimmgabel-Methoden muss die schon erwähnte »Resonanzmethode«, die darin besteht, dass wir die tönenden Stimmgabeln nahe an die Oberfläche der Membran halten, als die beste und korrekteste bezeichnet werden. Es handelt sich nur darum, dass uns viele und gute Stimmgabeln zur Verfügung stehen.

Aber bei allen vorgeführten Methoden, auch selbst bei der Resonanzmethode hat es sich herausgestellt, dass mit dem kleinsten Temperaturwechsel sowohl die Töne der Membranen, als auch die der Stimmgabeln zwischen kleinen Grenzen fortwährend schwanken und so die Wellenlängen, respektive die Knotenlinien modifizieren.

Die Membranen, angeregt durch die Stimmgabeln, geraten entweder in Eigenschwingungen, wobei sie heftig und schön ertönen, oder sie werden gezwungen die Schwingungen der Stimmgabel anzunehmen. Eine und dieselbe Membran hat, wie ich bald zeigen werde, einen Grundton und mehrere Eigentöne. Diese können leicht und ohne Zwang hervor gebracht werden, und bilden gewöhnlich regelmässige Klangfiguren. Wird aber eine Membran gezwungen irgend einen Ton anzunehmen, der ihr nicht eigen ist, so übernimmt sie auch diesen, wenn er genug intensiv ist, um die Membran erschüttern zu können. (Erzwungene Schwingungen.) Finden dabei die Wellenlängen genug Platz, um sich zu entwickeln, d. h. selbständige Aliquotschwingungsteile zu bilden, so entstehen auch Klangfiguren, welche, je nach der Entwicklung der Wellenlänge regelmässig, oder anscheinend unregelmässig sein können. Bei solchen erzwungenen Schwingungen verstummt die Stimmgabel auffalend schnell und die Membran tönt nur leise. Als Grundton bezeichne ich immer denjenigen tiefsten Eigenton der Membran, den sie ohne Zwang annimmt und dabei die möglichst einfachste, aber vollkommene Klangfigur bildet. Hat man z. B. eine genug grosse, kreisrunde Membran zur Verfügung, deren Grundton mit dem Grundtone irgend einer Stimmgabel vollkommen übereinstimmt, so erhalten wir nur eine einzige, kreisförmige Knotenlinie a

dicht am Rande der Membran. (Fig. 12). Hierbei fällt der einzige Schwingungsmittelpunkt *l* der Klangfigur mit dem geometrischen Mittelpunkte der Membran zusammen.

Als Eigentöne der Membranen werden diejenigen höheren Töne bezeichnet, welche mit anderen Stimmgabeln

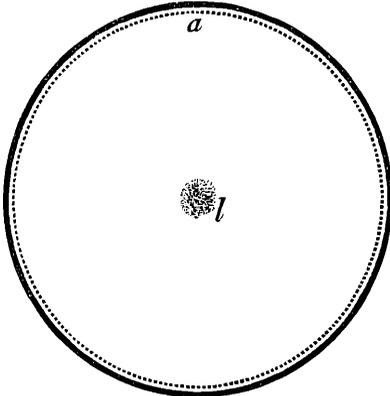


Fig. 12.

(höherer Schwingungen) angeregt, auch ohne Zwang mitschwingen und dabei kompliziertere, aber regelmässige Klangfiguren zeigen. Aber jede gute Membran kann mehrere Eigentöne haben und somit auch mehrere Töne ungezwungen annehmen; d. h. sie kann mit mehreren Stimmgabeln in Einklang gebracht werden und regelmässige Klangfiguren zeigen. So z. B. brachte ich auf einer Mem-

bran von 180 mm. Seitenlänge folgende Eigentöne und die ihnen entsprechenden Klangfiguren hervor: (Siehe Tabelle pg. 101—102).

	mm.	Stimmgabel Nr.
Quadr. Membran von 180 Seitenlänge:	1	8*, 9, 12, 18, 19, 22, 25.
	200	3, 5, 8*, 9, 11, 12*, 13, 14*, 16, 19*, 20, 24*), 25.
	300	1, 4, 6, 9, 13, 17, 19*, 20, 23.
	300	(andere) 2, 7*, 10, 11*, 15, 18, 21*, 22, 25.
	400	1, 5, 6, 8, 11, 14*, 16, 18, 20, 24.
Runde	200 Diameter:	1, 5, 17*, 18, 21.
	300	4, 9*, 14, 18, 25.
	342	6, 10, 19, 20*, 24, 25*.
	340	2, 3*, 6, 8, 13*, 14, 18, 21*, 22, 25.

*) Etwas verschobene, unvollkommene Klangfiguren.

Hiebei müssen wir trachten die Stimmgabel oberhalb eines Schwingungsmittelpunktes der Membran zu halten. Diese Schwingungsmittelpunkte (Schwingungsmaxima) sehen wir gleich nach den ersten Erschütterungen der Membran und brauchen sie nicht lange zu suchen. Endlich ist noch zu bemerken, dass Membranen bei Transversalschwingungen nie zu sehr mit Sand belastet werden dürfen, denn dadurch ändert sich ihre Spannung und somit auch ihr Eigenton. Die Glanzpapier-Membranen sind so empfindlich, dass es im Winter genügt die Zimmertür auf- und zuzumachen, um den Ton, mit welchem wir eben zu thun haben, zu verändern. Ja ein Hauch genügt, um den Eigenton der Membran zu verändern. Es ist das ein gutes Mittel, um Membranen etwas anders zu stimmen. Soll z. B. der Ton etwas tiefer sein, so hauchen wir die Membran an, soll er aber etwas höher werden, so genügt es, wenn wir mit einem steifen Papierblatt die Luft oberhalb oder unterhalb der Membran in Bewegung setzen. Diese Kunstgriffe genügen oft, um die Reinheit irgend einer eben im Entstehen begriffenen Klangfigur zu befördern. Man muss also trachten bei messenden Versuchen die Temperatur der Membranen möglichst konstant zu erhalten.

Erregung der Membranen mittels Scheibensirenen. Ein *vorzügliches* Mittel die Membranen in transversale Schwingungen zu bringen, haben wir in der Seebeck'schen Scheibensirene. Es war mir längst bekannt, dass eine rasch rotierende Sirene schwache Töne von sich gibt, wenn ich oberhalb ihrer Löcherreihen die Handfläche parallel und möglichst nahe hielt. Diese Erscheinung gab mir den Anlass dazu, Membranen auf diese Weise zu erregen und so dieselben ohne Zwang in Eigenschwingungen zu versetzen.

Meine Scheibensirene, aus starkem Messingblech gemacht, mit dem Durchmesser von 400 mm., hat 8 Löcherreihen mit 64, 71, 78, 86, 95, 105, 116, 128 Löchern. Eine andere Scheibe von ganz gleichen Dimensionen, aber 12 Löcherreihen, gab dieselben Resultate. (Es muss also keine Sirene sein.)

Stelle ich also irgend eine Membran parallel und möglichst nahe oberhalb einer löcherigen Scheibe und bringe die letztere

mittelst einer Centrifugalmaschine in Gang, so entsteht alsbald ein tiefer Ton. Geht die Scheibe etwas schneller, so verschwindet der erste Ton und bald hört man einen höheren zweiten, dritten, vierten u. s. w. Diese Töne können wir beliebig lange erhalten, wenn wir die Scheibe gleichmässig drehen. Und eben darin liegt der grosse Vorteil dieser Erregungsmethode. Oft erschallt aber ein sehr lauter Ton, der auch bei geschlossenen Türen durch zwei Säle hörbar ist. Das ist wahrscheinlich der natürlichste Eigenton der Membran. Auf diese Art gelang es mir auf einer runden Membran von 230 mm. Diameter die Töne cis', gis', cis'', dis'', g'' und c''' hervorzubringen. Auf einer viereckigen Membran von 180 mm. Seitenlänge erhielt ich: as, e', ges', a', cis'', fis'', bei einer anderen von 300 mm. Scitenlänge erhielt ich: c', es', g', b', c'', e'', fis'', bei einer anderen von ganz denselben Dimensionen: c', f', a', c'', e'', f'' und auf einer Membran von 400 mm. Seitenlänge: b, d, f, g, b', d'', es'' und as.'' Aus diesen Resultaten lässt sich keine feste Regel entnehmen.

Es muss aber bemerkt werden, dass sich während des Versuches die Spannungen der Membran ändern, ferner dass die Centrifugalmaschine nur mit der Hand gedreht wurde, dass also die successiven Schnelligkeiten nicht genug regelmässig sind und endlich, dass man mit der Hand grosse Schnelligkeiten nicht erreichen kann, dass also nicht alle Töne hervorgebracht werden, welcher die Membran fähig ist. Zu diesem Zwecke müsste man passende Apparate eigenst konstruieren und dieselben mit elektrischem Antrieb anordnen. Auch dürfte man dabei einen zählenden Mechanismus nicht entbehren. Jedenfalls muss die Lösung dieser schönen Aufgabe einem begeisterten Mechaniker überlassen werden. Nur möchte ich noch bemerken, dass zu diesen Versuchen eigentlich keine Sirene, sondern blos nur eine Scheibe nötig ist, an welcher möglichst viele Löcher, oder vielleicht noch besser |_|-förmige Spalten in etwa 20 Reihen dicht neben einander ausgeschnitten wären.

Wichtig ist bei diesen Versuchen, dass die entstehenden Klangfiguren gewöhnlich sehr schön sind, — und hoch interessant ist es zu sehen, wie dieselben sprungweise sich ändern. Oft liegen die Interferenzlinien schön parallel neben einander und

Über Klangfiguren gespannter Membranen und Glasplatten. 109

im nächsten Augenblicke verschwinden sie, um anderen, auf die vorigen senkrecht stehenden, Platz zu machen. Man sieht zugleich, wie die Erhöhung des Tones und die Zahl der Knotenlinien wächst. Oft sieht man auch, dass die Dimensionen der Membran den Wellenlängen der Töne nicht entsprechen und also auch keine rechten Klangfiguren sich bilden können. Das Pulver wirbelt in diesem Falle rechts und links, ohne Ruhe zu finden.

Oft hört man zwei, drei, ja auch mehrere Töne auf einmal, oft schwankt die Höhe derselben, die wechselnde Schnelligkeit der sich drehenden Scheibe getreu nachahmend. Dass sich in solchen Fällen keine Klangfiguren bilden können, ist selbstverständlich. Bei diesen Versuchen sieht man am besten, wie gross bei Transversalschwingungen der Einfluss der Belastung ist. Und es muss besonders hervorgehoben werden, dass wir hier mit der Menge des auf zu streuenden Sandes sehr sparsam sein müssen, um nicht ungewünschte Resultate zu erhalten, oder aber die Membran nicht erregen zu können. Endlich verdienen diese Experimente unsere volle Aufmerksamkeit auch deshalb, weil sie uns alle Vorgänge der Schwingungsarten der Membranen klar verdeutlichen.

So experimentierte ich lange Zeit hindurch mit dem Vorhaben, dass, wenn mir die Bestimmung des Tones aus den Klangfiguren auch nicht gelingen wird, ich doch wenigstens auf Spuren einer Gesetzmässigkeit der Knotenlinien gelangen werde. Ich zeichnete deshalb die neuen Figuren der Transversalschwingungen, ob mir der Ton bekannt war oder nicht, sorgfältig ab und verglich sie miteinander. Während ich die verschiedenen Zeichnungen machte, kam es öfters vor, dass irgend ein Teil der einen oder der anderen Figur sich nicht so entwickelte, als ich es erwartet habe: einzelne Linien blieben aus, andere bildeten sich undeutlich, oder gestalteten sich so eigentümlich, dass ich sie als wahr auf das Papier nicht niederlegen wollte und deshalb über einzelne Figuren oft lange nachgrübelte, um sozusagen den logischen Zusammenhang der Linien zu finden. Dadurch prägten sich einzelne unregelmässige Figuren in mein Gedächtnis ein und ihre Vergleichung wurde mir immer leichter und leichter. Endlich sah ich ein, dass wir

in allen Fällen eigentlich nur mit einer einzigen Regel zu thun haben, dass man oft die scheinbar kompliziertesten Figuren mit einem Blicke auffassen und aus dem Gedächtnisse nachzeichnen kann. Es zeigte sich nämlich, dass man all, die schönen, oft genug phantastisch gestalteten Figuren auf sehr einfache geometrische Grundformen zurückführen kann. Diese Grundformen sind, bei kreisförmigen Membranen, konzentrische Kreise, welche von diametralen Linien senkrecht durchkreuzt, — aber nicht geschnitten — werden. Diese Hauptregel gilt auch für quadratische Membranen, jedoch mit dem Unterschiede, dass hier die Knotenlinien, statt sich konzentrisch zu gestalten, sich den Seiten der Rahmen parallel anpassen. Wir haben es also in allen Fällen mit aufeinander senkrecht stehenden, aber sich nicht schneidenden Knotenlinien-Systemen zu thun. (Deformationen werden gelegentlich weiter unten behandelt werden.) Halten wir ferner die Regel fest vor den Augen, dass alle Membranen, welcher Gestalt sie auch immer sein mögen, in geometrisch regelmäßigen Kreisflächen (also nicht wie es Euler meint: »wonach sich Membranen, als ein Zusammensetzung rechtwinklig sich durchkreuzender Saiten zu betrachten sind«), oder in mehreren, aber immer kreisförmigen Abteilungen (Schwingungsfeldern) schwingen wollen, so gelangen wir bald zu der Einsicht, dass z. B. auf einer kreisrunden Membran (**Fig. 12**), welche mit ihrem Grundton angeregt wird, sich nur eine einzige in sich selbst geschlossene kreisförmige Knotenlinie am Rande der Membran bilden kann. (Wir können uns zwar speziell in diesem Falle die Schwingungsart der Membran auch so vorstellen, wie es Euler that, als wenn sie nämlich aus unendlich vielen, ihrem Durchmesser entsprechenden, gleich langen und gleich gespannten Saiten bestehen würde und dass also alle Knotenpunkte zusammengenommen einen Knotenkreis bilden, — ganz so, wie bei der einfachsten Schwingungsart einer Saite, wenn ihre zwei Knotenpunkte an den zwei Enden auftreten. Aber wir würden uns sehr täuschen, wenn wir die Membran immer aus

unendlich vielen Saiten bestehend denken würden; denn schon bei der Oktave der schwingenden Saite, wenn sich nämlich auch in ihrer Mitte ein Knotenpunkt bildet, gelangen wir bei gleicher Betrachtung der Membran zu einem Resultate, welches ganz unmöglich ist. Es müsste nämlich nach dieser Auffassung sich in der Mitte der Membran auch ein Knotenpunkt bilden, was aber, solange der Mittelpunkt der Membran frei schwingen kann, also nicht fest gehalten wird (wie bei den Chladni'schen Scheiben), unmöglich ist. Wie sollen

wir uns hier die entgegengesetzt schwingenden Phasen (+ —) der Membran vorstellen? Wir müssten rein einen um den Mittelpunkt wirbelnden Wellenring annehmen! Viel einfacher ist die nachfolgende Erklärung. Teilt sich eine Membran in zwei schwingende Teile, so nimmt sie entweder die Form der **Fig. 13**, oder die der **Fig. 14** an.

In **Fig. 13** sehen wir eine innere Kreisfläche mit der Interferenzlinie b und dem Schwingungsmittelpunkte l' — und die äussere ringförmige Fläche mit der Interferenzlinie a und der Schwingungsmittellinie ll .

Hiebei muss, wenn die ringförmige Fläche a sich in der Phase (+) befindet, die kreisförmige Fläche b in der Phase (—) sein. — Alle Schwingungs-

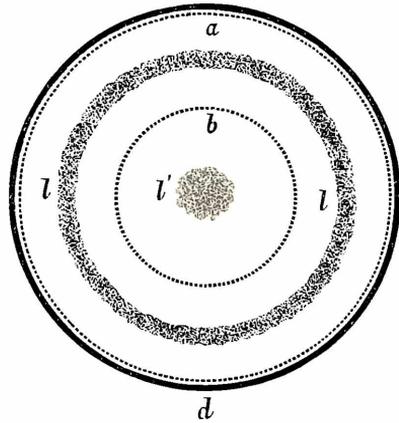


Fig. 13.

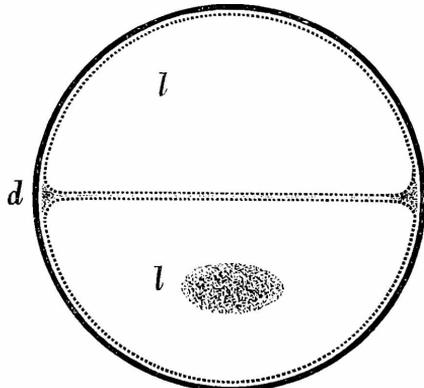


Fig. 14.

phasen und ihre Gesetzmässigkeit repräsentiert die **Fig. 29**. Teilt sich aber die Membran so, wie es die **Fig. 14** versinnlicht, so schwingt sie in zwei ganz gleichen Hälften, wobei, während die eine Hälfte sich nach oben bewegt (+), die andere gerade in entgegengesetzter Phase ist, also nach unten schwingt (—). Es wollen sich auch jetzt auf der Membran zwei schwingende Kreisflächen bilden; da aber dadurch die Spannungen des Materials verschiedenartig modifiziert werden, so müssen sich die Kreisflächen diesen Spannungen akkommodieren. Wir erhalten in diesem Falle zwei, halbkreisförmig deformierte Flächen und um diese herum die ihnen entsprechenden, immer in sich selbst geschlossenen Knotenkreise.

Es ist jetzt leicht einzusehen, dass wenn sich eine Membran in 4 schwingende Kreisflächen teilen muss, dass die vier Flächen so deformiert werden, wie wir es in der **Fig. 18** sehen. Dabei schwingen die benachbarten Teile natürlich immer in entgegengesetzten Phasen (+ —), und wir erhalten vier in sich geschlossene, den Kreisflächen entsprechende und nur deformierte Knotenlinien. Das hier sich entwickelte hohlseitige Viereck *d* in der Mitte der Klangfigur ist keine Knotenfläche, sondern nur ein indifferenten Raum, auf welehem das Pulver in Ruhe bleibt, weil sich dort keine schwingende Kreisfläche entwickeln konnte. Solche indifferente Flächen sind oft sehr gross, oft aber auch sehr klein und können daher mit Knotenpunkten, sowie auch mit Schwingungsmittelpunkten leicht verwechselt werden!

Nun wollen wir *die Teilungsklassen der Klangfiguren* systematisch vornehmen, sie auch benennen und die neuen Erscheinungen immer gelegentlich anführen. **Fig. 12** zeigt uns einen einzigen Knotenkreis *a* am Rande der Membran, mit einem rundlichen Stauffleck in der Mitte. Wir wollen diese Klangfigur »Nullteilungsfigur erster Ordnung« nennen und sie so bezeichnen: O_1 .— **Fig. 13** zeigt uns zwei konzentrische Knotenkreise *a* und *b*, deren einer unmittelbar am Rande, der andere aber ungefähr in der Mitte des Radius der Membran liegt. Nennen wir diese Klangfigur »Nullteilungsfigur zweiter Ordnung« und bezeichnen sie: O_2 .—

Der Knotenkreis b kann mit der Schwankung des Tones kleiner oder grösser werden, bei dem Grundtone verschwindet er gänzlich und es bleibt auf der Membran nur der Knotenkreis a **Fig. 12**. So können die Nullteilungsfiguren (als einfache konzentrische Kreise) dritter, vierter, fünfter u. s. w. Ordnung auf einer und derselben Membran mit der Steigerung des Tones fortwährend wachsen. Mir gelang, wie schon erwähnt wurde, auf einer und derselben Membran von 120 mm. Durchmesser 50—60 Kreise mit Leichtigkeit, aber auch 80—90 Kreise mit nicht zu grosser Schwierigkeit hervorzurufen, zu zählen und zu messen. Spuren von radialen Knotenlinien sieht man gewöhnlich bei allen konzentrischen Klangfiguren höherer Ordnung, aber bei denjenigen tieferer Ordnung können sie auch ganz ausbleiben. Dieser Fall scheint namentlich bei Transversalschwingungen möglich zu sein; bei Longitudinalschwingungen sieht man immer die zackigen Einbiegungen, welche meiner Ansicht nach den Einflüssen der radialen Komponenten zuzuschreiben sind. Ist bei Transversalschwingungen der sehr feine Sand etwas staubig, oder mit Lycopodiumpulver gemengt, so werden auf den immer mit l bezeichneten Stellen entweder verwaschene Staubfleckchen, oder aber ganze Staubringe sich bilden. Das Lycopodium setzt sich, wie bekannt immer auf diejenigen Stellen, die am heftigsten schwingen, d. h. auf die sogenannten »Schwingungsmittelpunkte«, respektive »Schwingungsmittellinien« an. Ich werde diese Erscheinungen nur hie und da in die Klangfiguren aufnehmen, da wir ohnehin alsbald sehen werden, wo sie unbedingt gesucht werden müssen, und erwähne sie wiederholt nur deshalb, weil sie mit den Knotenlinien leicht verwechselt werden können.

Zweiteilungsklasse der Klangfiguren. In **Fig. 14** sehen wir zwei Knotenhalbkreise, deren Durchmesser quer durch die Mitte der Membran parallel nebeneinander laufen. Wir können diese Klangfigur »Zweiteilungsfigur erster Ordnung« nennen; kurz (2. 1.) — Während des Veruches sehen wir die Bewegung des Sandes von den zwei Schwingungsmittelpunkten ausgehen und sich von dort nach allen Seiten ausbreiten. Diese Tatsache erleichtert bei

transversalen Schwingungen sehr die Erkenntnis des Entwicklungsganges der Klangfiguren und wir wollen sie stets vor den Augen halten, weil sie uns in den meisten — oft sehr komplizierten — Fällen eine leichte Orientierung gewährt.

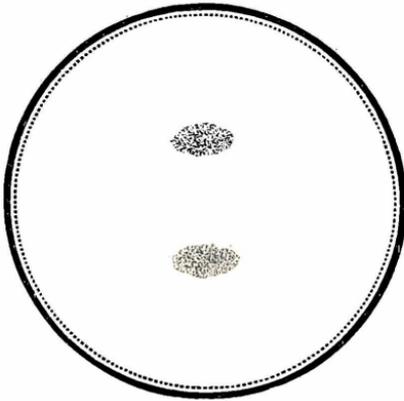


Fig. 15.

Durch die Erhöhung des Tones entsteht die **Fig. 15** »Zweiteilungsfigur zweiter Ordnung«; kurz (2. 2) — Wird der Ton noch mehr erhöht, so erhalten wir die **Fig. 16**

»Zweiteilungsfigur dritter Ordnung«; kurz (2. 3) — u. s. w. Die **Fig. 17** (2. 4) ist deshalb beachtens-

wert, weil sie uns beweist, dass eine Membran gleichzeitig — zwei verschiedenen Tönen entsprechend — zwei verschiedene Klangfiguren zeigen kann. Diese Figur wurde mittels der Stimmgabel Nr. 6 (295·7 Schwingungen) auf einer Membran von 300 mm. Durchmesser hervorgebracht. Wahrscheinlich ist es der Grundton und die Oktave der Stimmgabel und der Membran. — Solche Fälle kommen genug häufig vor.

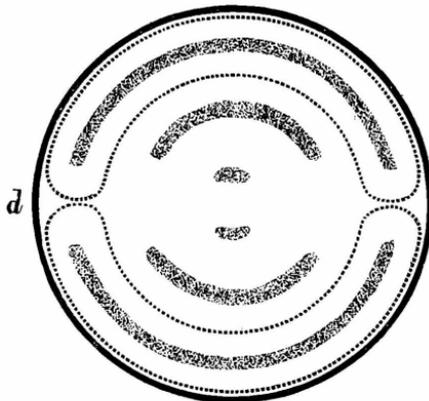


Fig. 16.

Dreiteilungsklasse der Klangfiguren. **Fig. 22** kommt nur selten vor und ist eigentlich erst im Entstehen, denn im Kurzen reißen die schmalen Stellen bei *aaa* durch und wir haben ein an allen Ecken

abgestumpftes Dreieck vor den Augen, welches sich aber bald wieder zu einem Knotenkreise umstaltet, wie wir es bei **Fig. 13**

sehen. Diese Veränderungen müssen in unmerklichen Übergängen des Tones oder der Spannung der Membran gesucht werden. Ich hätte diese Figur (22) nicht beigelegt, wenn sie uns nicht an die Klasse der »Dreiteilung« lebhaft erinnern würde, die aber meiner Ansicht nach *nicht existiert*. (Wir müssen diese Klangfigur in die »Sechsteilungsklasse« verlegen.) Schon **Fig. 23**, die dreiteilig zu sein scheint, beweist, das wir es hier mit der Klasse der Sechsteilung zu thun haben; denn wir können bei dieser sechs Schwingungsmittelpunkte *ccc* beobachten. Diese Figur ist auch deshalb wichtig, weil wir hier zum ersten Male sehen, wie über den Schwingungsmittelpunkten *ccc* die Knotenlinien — ohne schein-

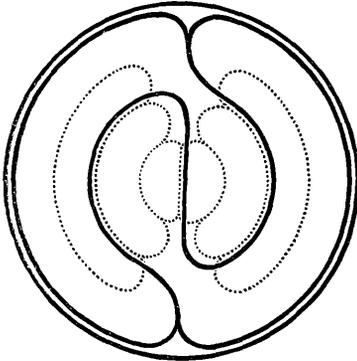


Fig. 17.

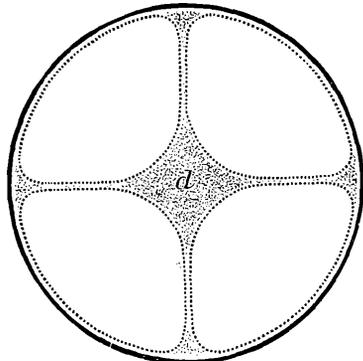


Fig. 18.

baren Grund ausbleiben können. Wir wollen diese Erscheinung von nun an »Linienchwund« nennen.

Vierteilungsklasse der Klangfiguren. Wir ahnen schon die Teilungsregel und dieser gemäss sollten wir jetzt eine Figur erwarten, bei der sich vier Kreisbögen am Rande der Membran zu entwickeln anfangen, allein diese Figur konnte ich nicht hervorrufen; ein vollständiges Exemplar der »Vierteilungsklasse« sehen wir jedoch in **Fig. 18** (4. 1.), bei welchem sich die Knotenlinien schon berühren. Die Scheitel der vier Kreissegmente können sich dem Mittelpunkte der Membran auch mehr nähern, so dass die Figur beinahe ein Krenz vorstellt. Als Anfangsfigur der »Vierteilungsklasse« dürfte

die **Fig. 19** (4. 1) gelten, wenn wir uns um die Punkte *cc* die fehlenden Knotenlinien denken. Und es muss schon hier hervorgehoben werden, dass das Verschwinden von Knotenlinien

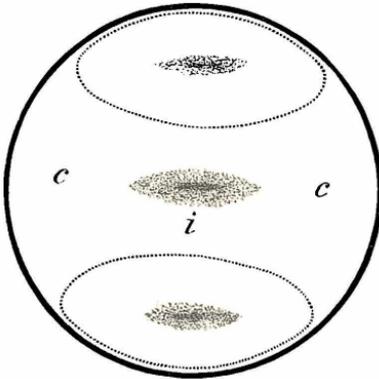


Fig. 19.

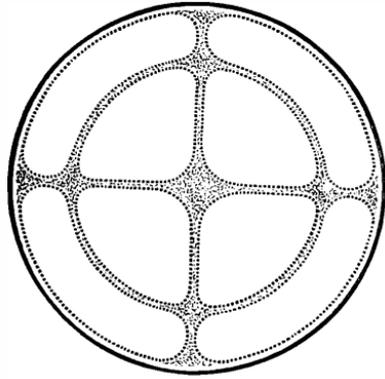


Fig. 20.

meistens in symmetrisch abwechselnder Ordnung geschieht, wie wir es bei **Fig. 23** sehen. Aber auch Ausnahmen kommen vor. Ferner sei bemerkt, dass der Staubfleck *i* **Fig. 19** kein Schwingungsmittelpunkt, sondern nur ein indifferenten Raum

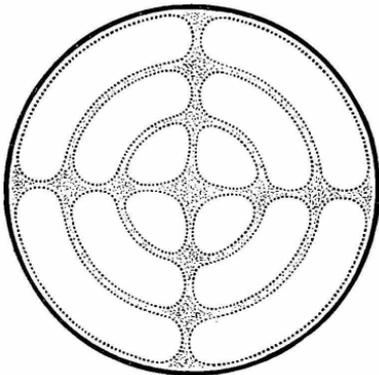


Fig. 21.

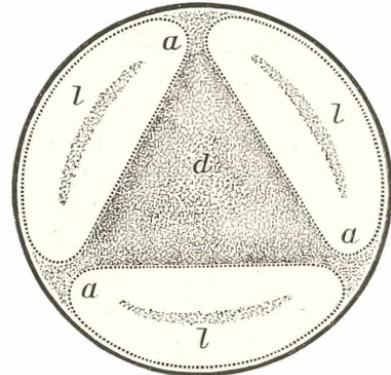


Fig. 22.

ist, um welchen wir uns ein hohlseitiges Viereck vorstellen müssen (wie *d* 18). Mit steigender Höhe der Töne entwickeln sich **Fig. 20** (4. 2.) und **Fig. 21** (4. 3.) — Es ist auffallend, dass bei

den kreisförmigen Klangfiguren die dem Mittelpunkte näher liegenden Kreissegmente länger sind, als die ihnen von auswärts folgenden. Ein Blick auf die **Fig. 32** und **Fig. 42** macht uns die Sache noch klarer. Die Ursache dessen mag wohl darin liegen, dass dort die Schwingung der Membran intensiver ist, als an den Rändern. Es sei noch bemerkt, dass die **Fig. 18** auch auf einer quadratischen Membran von 280 mm. Seitenlänge hervorgebracht werden konnte, wobei der Erregungspunkt am Rande der Membran war, — also eine runde Klangfigur auf einer quadratischen Membran! — Dabei ist noch zu bemerken, dass bei diesem höchst seltenen Falle der äussere Knotenkreis ungefähr 40 mm. vom Holzrahmen entfernt war und dass auf dieser äussersten Fläche sonst keine Knotenlinien entstanden. — In dieser Teilungsklasse lassen sich auch 5 konzentrische Kreise (4. 5.) leicht hervorrufen.

Fünfteilungsklasse der Klangfiguren. Es ist sehr wahrscheinlich, dass diese und überhaupt eine *unpaarige Teilungsklasse nicht existiert*. Nur vorübergehend muss ich erwähnen, dass hie und da Figuren zum Vorschein kommen, bei welchen man die paarige Teilung nicht finden kann; so suchen wir sie z. B. in der **Fig. 45** und **Fig. 47** vergebens. Wir dürfen aber nicht vergessen, dass bei vielen Klangfiguren einzelne Knotenlinien oft ausbleiben, oder in die benachbarten überspringen (»Linien sprung«) und dadurch überraschend modifiziert werden. Diesen Gegenstand wollen wir bei der »Achtteilungsklasse« eingehender behandeln.

Sechsteilungsklasse der Klangfiguren. Diese Klasse kann aus der **Fig. 22** (6. 1.), **23** (6. 1.), **24** (6. 1.), **25** (6. 1.), **26** (6. 2.), **27** (6. 2.), **28** (6. 2.), **29** (6. 3.) und **30** (6. 4.) ohne weiterer Erklärung erkannt werden; es sei nur bemerkt, dass die **Fig. 26** ohne Nebenerscheinungen, die **Fig. 27** aber mit allen Nebenerscheinungen versehen ist. Solche Nebenerscheinungen (»secundäre Figuren«) erzielen wir sehr leicht, wenn wir zu dem Sande ein wenig Lykopolidium beimischen.

Es möge hier eine scheinbar unregelmässige **Fig. 25** beigefügt und näher betrachtet werden. Im ersten Augenblicke können wir uns kaum orientieren in welche Klasse diese zu

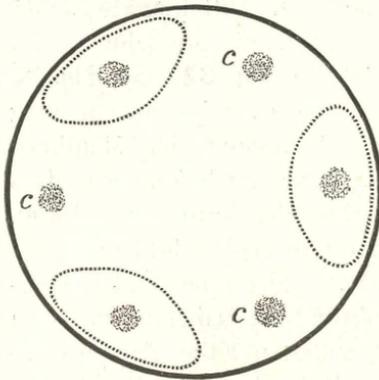


Fig. 23.

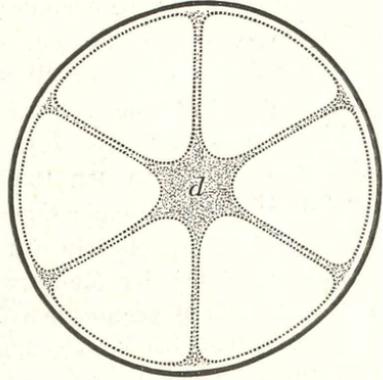


Fig. 24.

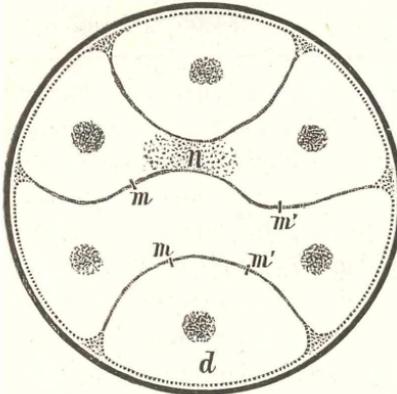


Fig. 25.

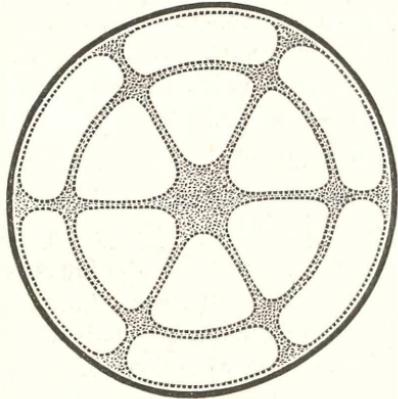


Fig. 26.

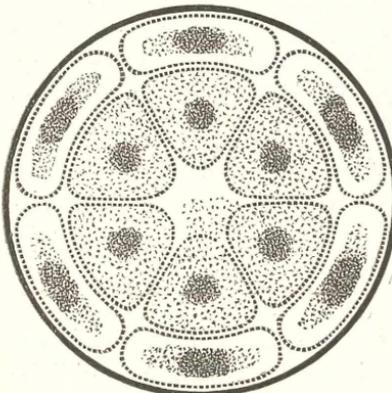


Fig. 27.

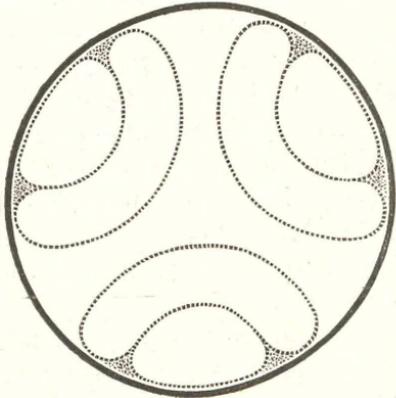


Fig. 28.

setzen sei, wenn wir aber auch die Schwingungsmittelpunkte hervorrufen, ferner in den Punkten mm und $m'm'$ uns kleine

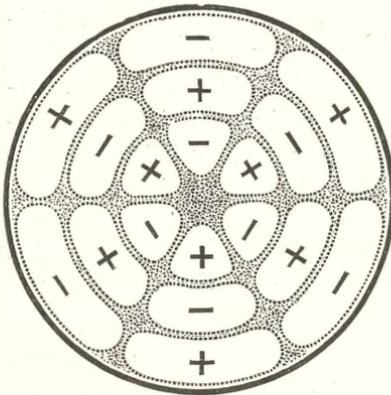


Fig. 29.

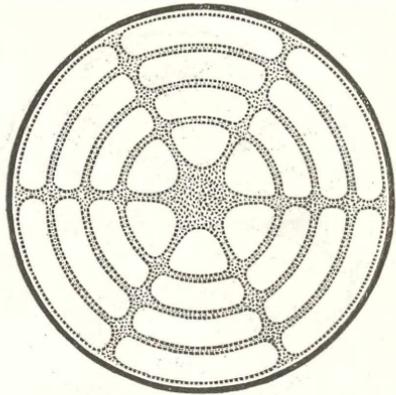


Fig. 30.

Verbindungbögen nach rechts und links vorstellen und endlich den »Liniensprung« bei n zerrissen denken, so haben wir es eigentlich mit der **Fig. 24** zu thun. Hier wurde die Membran in dem Schwingungsmittelpunkte d mittels einer Stimmgabel angeregt. (Resonanzmethode)

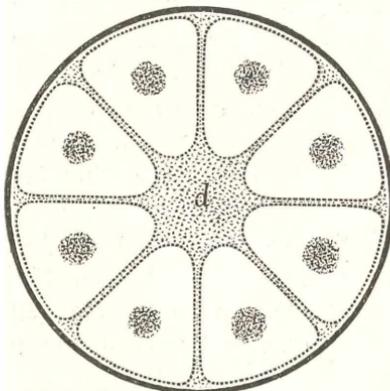


Fig. 31.

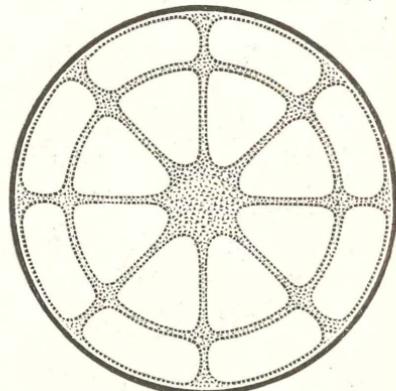


Fig. 32.

Achtheilungsklasse der Klangfiguren. Die **Fig. 31** (8. 1.) und **Fig. 32** (8. 2.) sind ganz regelmässig. Aber

die **Fig. 33**, bei welcher nur Lycopodium angewendet wurde, macht uns schon Schwierigkeiten. Die breiteren Streifen $a a' a'' a'''$ sind Spuren von Knotenlinien, wogegen die schmälern und

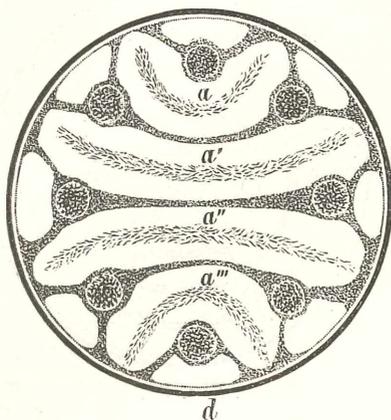


Fig. 33.

mit den Schwingungsmittelpunkten verbundenen in Wirklichkeit Schwingungsmittellinien sind. Diese Klangfigur ist deshalb wichtig, weil sie uns beweist, dass auch die sekundären Figuren die allgemeine Regel befolgen. Hier sieht man zugleich, wie die Interferenzlinien am Rande der Figur sich mit den Schwingungsmittellinien vermischen und die Unterscheidung beider erschweren können. Vergleichen wir die oberen Hälften der **Fig. 33**, **Fig. 34** und **Fig. 35** miteinander, so wird uns die Schwingungsart

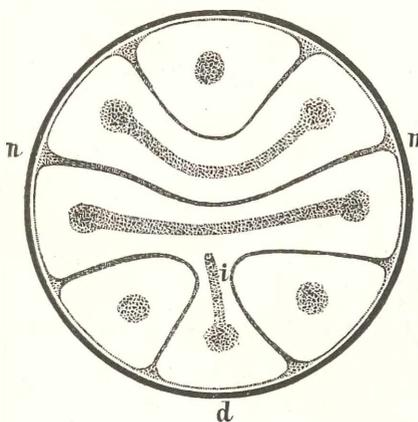


Fig. 34.

viel klarer, namentlich aber, wenn wir uns in den unteren Hälften der **Fig. 34** und **Fig. 35** bei i Liniensprünge vergegenwärtigen, wie sie zwischen nn' , zu sehen sind. Dann finden wir auch, dass alle drei Figuren ihrem Wesen nach gleich sind und vielleicht mit (8.2) bezeichnet werden sollen. Diese drei und die nachfolgenden **Fig. 36**, **Fig. 37** und **Fig. 38** wurden auf einer Membran von 157 mm. Durchmesser auf folgende Art hervor-

gebracht: am Rande eines Glastrichters war ein kleiner Kork angeklebt, der die Membran berührte und mit einem nassen Glasröhrchen gerieben wurde. (d ist also der Erregungspunkt.)

Ich bestreute die Membran mit Sand und Lycopodium, änderte mit Hilfe des linken Zeigefingers den Druck des Korkes und erhielt die obigen Variationen, die ich des Vergleiches halber beifüge. Wie viele derartige Modifikationen möglich sind, lässt sich natürlich nicht entscheiden, — ich habe hier nur die auffallendsten angeführt. Endlich dürfen wir nicht vergessen, dass bei der **Fig. 34** fünf und bei der **Fig. 35** vier Knotenlinien ausgeblieben sind. Diese scheinbare Unregelmässigkeiten drängen sich noch auffallender bei **Fig. 36**, **Fig. 37** und **Fig. 38**, so dass wir ohne der Schwingungsmittelpunkte weder die Teilungsklasse, noch aber die Ordnung derselben bestimmen können.

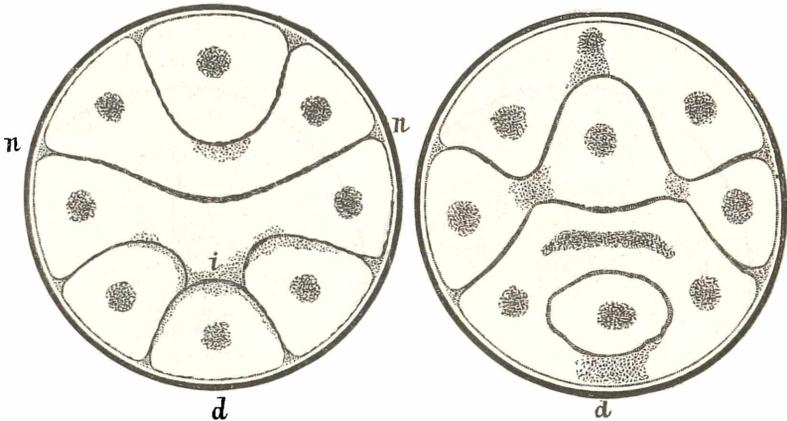
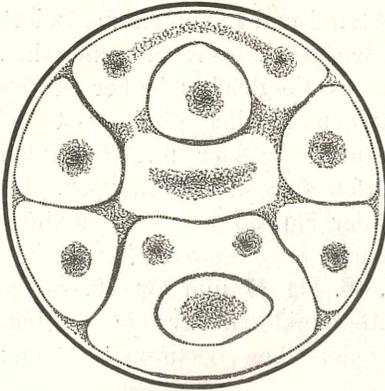


Fig. 35.

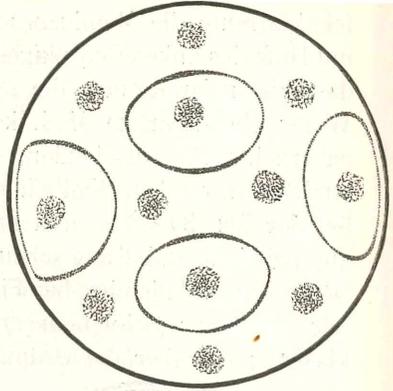
Fig. 36.

Bei der Achtteilungsklasse, um mich kurz zu fassen, konnten die Speichen der Klangfiguren noch sehr rein und leicht hervorgebracht werden, wogegen bei höheren Klassen (12, 14, 16, 18, 20 u. s. w.) sich immer mehr und mehr Schwierigkeiten bieten, aber die konzentrischen Knotenkreise umso reiner und leichter auftreten. Zugleich sieht man, dass bei konzentrischen Kreisen höherer Ordnungen an denjenigen Stellen, an welchen sich die Speichen hätten entwickeln sollen, jetzt überall zarte Einbiegungen entstehen und die Knotenlinien schon zackig machen. (Siehe Membran **Fig. 2**.)

Es wäre unzweckmässig die höheren Teilungsklassen weiter zu entwickeln, da die Reihenfolge bereits klar vor uns liegt; aber es wird doch nicht überflüssig sein hier noch einige



d
Fig. 37.



d
Fig. 38.

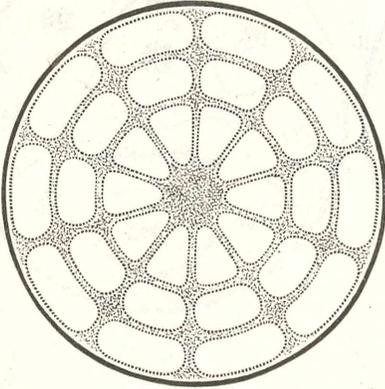


Fig. 39.

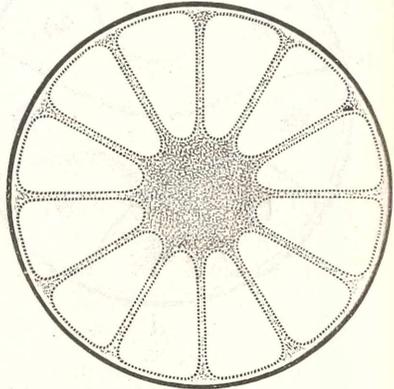


Fig. 40.

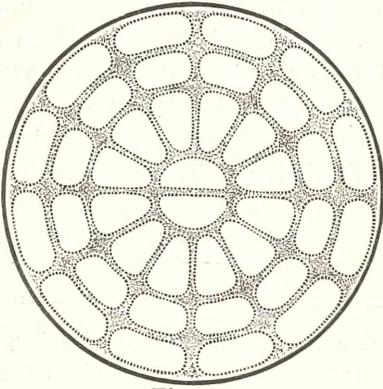


Fig. 41.

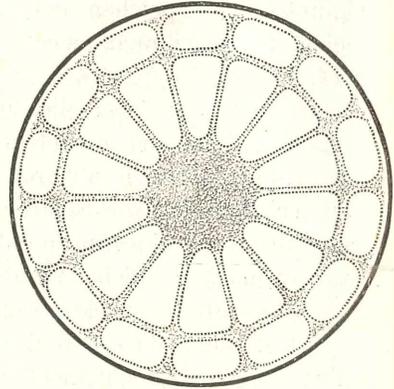


Fig. 42.

Exemplare der höheren Klassen beizufügen, um ihre Eigentümlichkeiten zu zeigen. Als solche sollen dienen: die **Fig. 39** (10. 3.), **Fig. 40** (12. 1.), **Fig. 41** (12. 3.), **Fig. 42** (14. 2.) und **Fig. 43** (16. 6.) Diese bedürfen wohl keiner weiteren Erörterung.

Endlich will ich noch einige unregelmässige Klangfiguren beifügen, um zu zeigen, wie schwer es manchmal ist deren Teilungsklasse zu bestimmen. **Fig. 44** scheint auf den ersten Blick in die Achtteilungsklasse zu gehören, setzen wir jedoch zwischen *ab*, *ce*, und *fg* je zwei Schwingungspunkte ein, so erhalten wir eine 11-teilige Klasse! Da diese Teilung aber unmöglich ist, so bleibt uns nichts anderes übrig, als die drei Kreise bei den Punkten *i* zerrissen zu denken. Dadurch entstehen je zwei Linien sprünge gegen die Peripherie zu und die Klangfigur erhält die Form (14. 3.) — Noch schwieriger ist die **Fig. 45** zu enträtseln, da hier auch Linienspaltungen vorkommen; sie scheint (10. 2.) zu sein. — Die **Fig. 46** scheint in die Klasse (20. 4) und die **Fig. 47** in die Klasse (26. 4.) zu gehören. Bei

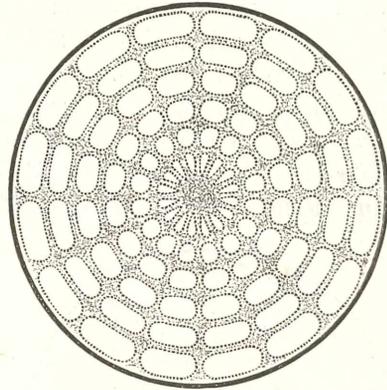


Fig. 43.

der letzten Figur war der Erregungspunkt in *d*. — **Fig. 48**, die mittels einer Stimmgabel vom Punkte *d* erregt wurde,

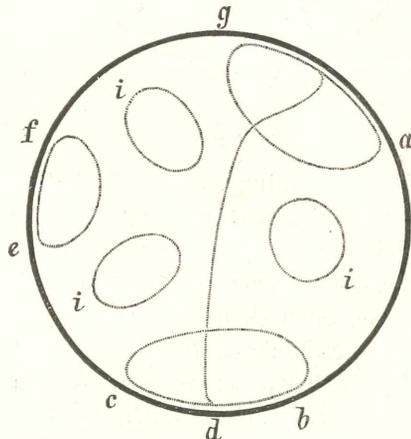


Fig. 44.

der letzten Figur war der Erregungspunkt in *d*. — **Fig. 48**, die mittels einer Stimmgabel vom Punkte *d* erregt wurde,

gehört zu den regelmässigeren Figuren, denn wenn wir uns an die drei Stellen a , a' und a'' , wo sich der Sand anhäuft, Knotenmittelpunkte und Linien sprünge gegen die Peripherie zu denken, so haben wir die Klangfigur (12. 3.) vor uns. Die Anhäufung des Sandes in den Punkten a , a' und a'' (Fig. 48) beweist unstreitig, dass dort Linien sprünge stattfanden. Überhaupt müssen Linien sprünge immer dort gesucht werden, wo die Biegungen der Knotenlinien sehr nahe an einander kommen und sich die Sandkörner in grösserer Menge anhäufen. (Siehe bei Fig 25 die Stelle n). — In Fig. 49 sehen wir eine sehr unregel-

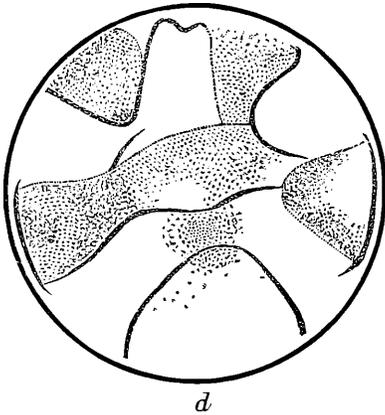


Fig. 45.

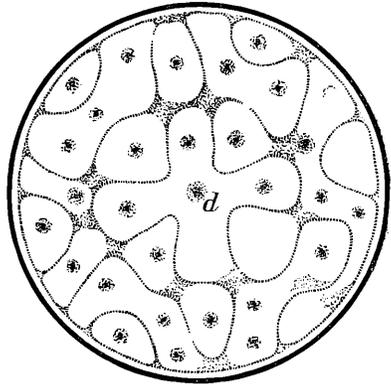


Fig. 46.

mässige Bildung, die noch dadurch gestört wird, dass sich auch eine Linienspaltung zeigt. Die Membran befand sich in einem 285 mm. breiten Messingring von 140 mm. inneren Durchmesser, welcher bei t fest eingeklemmt, bei d mit einem Fiedelbogen gestrichen wurde und den Ton *ges* von sich gab.

(Nebenbei möge noch erwähnt werden, ohne viel Gewicht darauf legen zu wollen, dass man auf Membranen mittels hoher Saitentöne auch spiralförmige Klangfiguren erzeugen kann. Die Versuche gelingen genug leicht, wenn wir eine grössere Membran unter die Saite des Monochordes legen und den Angriffspunkt in ihre Mitte verlegend, die möglichst höchsten Töne hervorrufen, was leicht zu erzielen ist, wenn wir die

Saite, möglichst nahe an einem Sattel, mit mittelmässigen Druck des Fiedelbogens streichen. Da wir bei diesem Versuch bemerken können, dass die konzentrischen Knotenkreise — oft auch Ellipsen — an irgend einer Stelle reissen, so wird dadurch die Erscheinung leicht erklärbar: es geschieht nämlich ein Linien sprung um eine halbe Wellenlänge durch alle Interferenzkurven hindurch, wobei, wie wir es schon wissen, die einzelnen benachbarten Knotenteile mit einander — wenigstens scheinbar — in innige Verbindung geraten.)

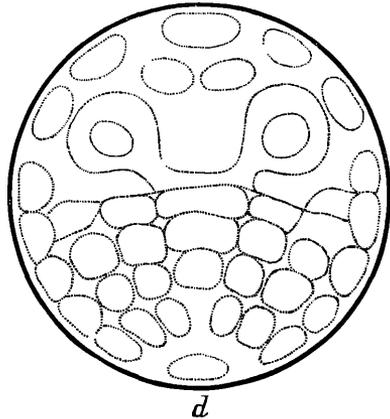


Fig. 47.

Betrachten wir die Resultate auf den quadratischen Membranen, so sehen wir allsogleich, dass wir es hier, ebenso wie bei den kreisförmigen, mit zwei auf einander senkrecht stehenden Linien systemen zu thun haben. Wir wollen einige Beispiele anführen, indem wir die Untersuchungen bei den tiefsten Tönen anfangen. — Zwar schwer, aber doch gelang es mir mittels einer 1 mm. dicken und 3 m. langen Stahlsaite, auf einer Membran von 400 mm. Seitenlänge, eine Klangfigur rein hervorzubringen, wie sie in Fig. 50 beigelegt ist. (Mittels Stimmgabeln können derlei Figuren leicht hervorgebracht werden.) Die Membran

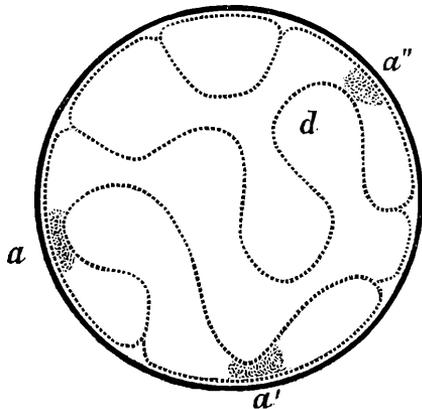


Fig. 48.

teilte sich in vier Teile, deren Schwingungsmittelpunkte zeigen,

dass wir es mit Transversalschwingungen zu thun haben. Ebenfalls mit dieser Stahlseite gelang es mir noch eine Klangfigur hervorzubringen, die nur einer halben Wellenlänge ent-

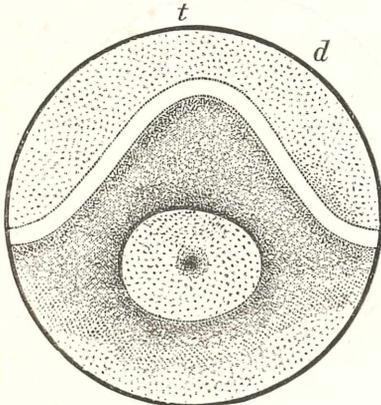


Fig. 49.

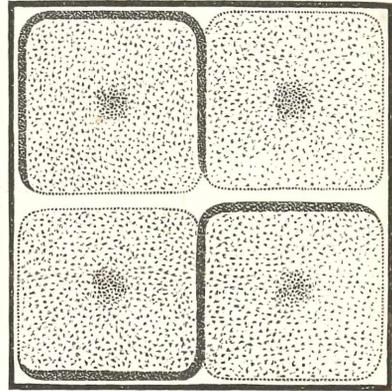


Fig. 50.

spricht. **Fig. 51.** Der Ton war sehr tief, konnte aber nicht bestimmt werden. — Figuren von mehreren Wellenlängen gelingen sehr leicht und können am besten mit Sirenscheiben, oder mit Stimmgabeln hervorgebracht werden. So entstand die

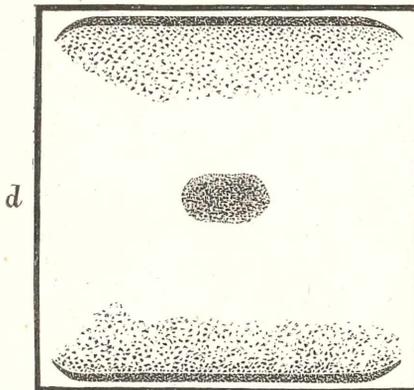


Fig. 51.

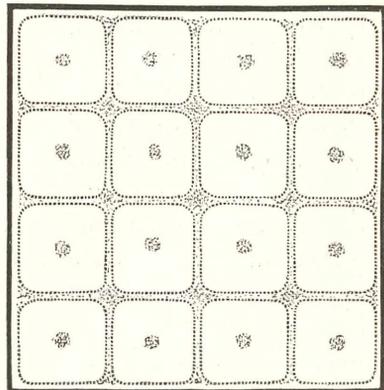


Fig. 52.

die **Fig. 52** (4. 4.) welche mit einer Stimmgabel von 256 Schwingungen (c') auf einer Membran von 400 mm. Seitenlänge (Resonanzmethode) hervorgebracht wurde. Nach den Schwin-

gungsmittelpunkten zu urteilen, haben wir es hier mit zwei-zwei sich kreuzenden ganzen Wellen zu thun. ($\lambda = 200$ mm.) Versuchen wir mittels dieser Wellenlänge die Schalleitungsgeschwindigkeit der Membran (Glanzpapier) zu bestimmen, so ergibt sich nur 51·200 m. Es müsste also die Zahl 51·200 m., um die Schalleitungsgeschwindigkeit der Luft (bei 20° C.) zu erreichen, noch mit 6·733 multipliziert werden, wogegen Melde dieselbe 5·09-mal grösser fand. — Also auch hier wieder-spricht das Resultat unseren älteren Erfahrungen. — **Fig. 53** wurde auf einer Membran von 400 mm. Seitenlänge mittels der Stimmgabel Nr. 15 (Tab. pg. 102) hervorgebracht. Sie ist deshalb interessant, weil sie uns ganz dieselben Deformationen,

Linien-sprünge, Linien-schwund und indifferente Flächen zeigt, welche wir bei den kreisförmigen Klangfiguren gesehen haben. Auch hier müssen wir als Grundlage ihrer Bildung schwin-gende Kreisflächen an-nehmen, sonst wäre uns ihre Schwingungsart ganz unverständlich. Noch sei bemerkt, dass auf Mem-branen gleichzeitig auch mehrere Schwin-arten entstehen kön-nen, indem sich Partialschwingungen bilden und so die Klangfiguren beträchtlich modifizieren. Ich könnte sehr viele defor-mierte Klangfiguren hier beifügen, da sie aber nur Wiederholungen der uns schon bekannten kreisförmigen wären und da wir ähnliche Deformationen noch bei den starren Platten sehen werden, so soll hiemit die Reihe der quadratischen Membranen geschlossen werden.

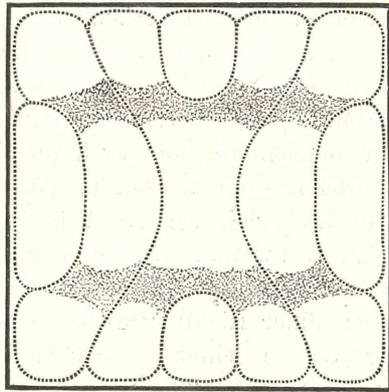


Fig. 53.

Aber nicht unerwähnt möchte ich lassen die ryth-mischen Bewegungen des Quecksilbers auf Membranen und einige hieher gehörige Schwingungs-erscheinungen, da uns auch diese die Eigentümlichkeiten der

schwingenden Membranen klarer machen und erleichtern. Wir erhalten sehr zierliche rhythmische Bewegungen, wenn wir Quecksilbertropfen auf einer recht grossen und mit Lycopodium bestreuten Membran gleiten lassen. Die sehr regelmässig gezackten Streifen übertreffen weit diejenigen, welche wir mittels glühend-flüssigen Antimons auf schwarzen Papier hervorbringen können, namentlich wenn wir die Membran vor dem Versuche stark rütteln, um auf ihr eine gleichmässige Lycopodiumfläche zu erhalten und sie auch während des Versuches durch anhaltendes Klopfen in Vibration erhalten. Jedoch viel wichtiger und lehrreicher gestalten sich die Versuche, wenn wir die auf der Membran zerstreuten Quecksilbertropfen durch regelmässiges Klopfen mittels eines Glasstäbchens in Vibration versetzen und näher beobachten. Einzelne Tropfen vergegenwärtigen uns die bekannten Leidenfrost'schen Erscheinungen in grösster Schönheit, andere scheinen zu sieden und indem ihr Mittelpunkt hoch aufspringt, reissen kleinere Tröpfchen ab und machen regelmässig hüpfende Bewegungen auf der ganzen Oberfläche der Membran. Auf grösseren Tropfen bemerken wir zwei sich senkrecht kreuzende Bewegungen mit 4—8 Randanschwellungen (Randbäuchen), von welchen, wenn die die Bewegungen heftig genug sind, kleinere Tröpfchen in horizontaler Richtung abgeschleudert werden. Auf Tropfen von der Grösse einer Handfläche bemerken wir konzentrische Kreise und 10—20 Randbäuche, welche sich um die Peripherie des Quecksilbers zu drehen scheinen. Bestreuen wir das Quecksilber mit Lycopodium, so sehen wir das Pulver in zwei, oder auch mehreren Strömen quer über die Mitte der Quecksilberfläche gleiten und auf der anderen Seite zurückkehren. Die Strömungen laufen ungestört nebeneinander, weichen sich aus und schneiden nie einander. Wir sehen hier die Strehlke'schen Erscheinungen im Grossen reproduziert. Vergrössern wir die Quecksilberfläche noch mehr, so können wir auf ihrem Umfange 25—100 Randbäuche zählen, wobei die schon beschriebenen Erscheinungen noch deutlicher hervortreten und wir zu der Überzeugung gelangen, dass sowohl die Sommering'schen Wirbelströme, als auch die Melde'schen Figuren, welche auf Flüssigkeiten entstehen, auf die Strehlke'sche Grund-

erscheinung zurückgeführt werden können. Und wenn Melde in seiner Akustik (pg. 211) hervorhebt, »dass das Zustandekommen der eigentümlichen Wirbelbewegungen, wie so manche andere Bewegung, welche man bei den Tropfen wahrnimmt, keineswegs bis jetzt eine genügende Aufklärung gefunden haben«, so möchte ich die Ursache derselben einzig und allein in den isochronen Longitudinalsschwingungen der Membranen suchen; denn jede Bewegung des Sandes und des Lycopodiums verrät auf Membranen, wie auch auf starren Platten, welche in Longitudinalsschwingungen versetzt sind, ganz dieselben Erscheinungen.

Wir können diese interessanten Versuche noch weiter fortsetzen, indem wir die Quecksilberfläche vergrössern und nun die Erschütterung der Membran mittels einer langen und mit nassem Flanell geriebenen Glasröhre bewerkstelligen. Die Glasröhre stützen wir an den Rahmen der Membran (siehe **Fig. 4**) und trachten die möglichst tiefen, schnarrenden Töne hervorzubringen. Gerät das Quecksilber in regelmässige Schwingungen, so zeigen sich jetzt auch die Faraday'schen »crispations« genannten Erscheinungen und alle Gesetzmässigkeiten, welche wir auch auf den transversalschwingenden Membranen beobachten.

Singen wir in der Nähe der Membran eine Skala recht kräftig, so gerät die Oberfläche des Quecksilbers bei den geeignetsten Tönen in sehr regelmässige, stehende Schwingungen, deren entsprechende, sehr zarte, aber höchst regelmässige und am besten im reflektierten Lichte direkt zu beobachtende Klangfiguren von grosser Schönheit sind. Diese Klangfiguren können solange aufrecht erhalten werden, als der Ton anhält. Sie gleichen denjenigen Klangfiguren, welche wir mittels berrusster Glasscherben auf dem Stanniol hervorbrachten. (pg. 65—66.) Lassen wir endlich auf die reine und vibrierende Quecksilberfläche Sonnenstrahlen fallen und fangen dieselben, nachdem sie reflektiert wurden, auf einer sehr nahe stehenden, weissen Kartonplatte auf, so erhalten wir auch sehr regelmässige Lichtbilder der Klangfiguren, die sich, ihrer grossen Intensität wegen photographieren lassen

Endlich wäre hier der geeignete Ort anzuführen: welche Töne den einzelnen Klangfiguren entsprechen. In Kürze

kann man sagen, dass jeder Ton jede mögliche Klangfigur auf geeigneter Membran hervorbringen kann. Die Gestalt irgend einer Klangfigur hängt nur davon ab, ob und wie sich die Membran in selbständige stehende Schwingungen versetzen lässt. Finden die den Tönen entsprechenden Wellen genug Platz auf der Membran, um sich ungehindert zu entwickeln, so entstehen auch Knotenlinien und bilden sich Klangfiguren; ist das aber nicht der Fall, so kann zwar die Membran in sehr heftige Erschütterungen geraten, aber es entstehen keine Klangfiguren. —

Tonübertragungsmethode auf Metall- und

Glasplatten.

Nach all' diesen Versuchen trieb mich die Neugier zu untersuchen, ob sich Töne auch auf starre Platten übertragen lassen; dies umsomehr, da Chladni und alle anderen Forscher, mit Ausnahme Elsas, nur diejenigen Klangfiguren der schwingen-

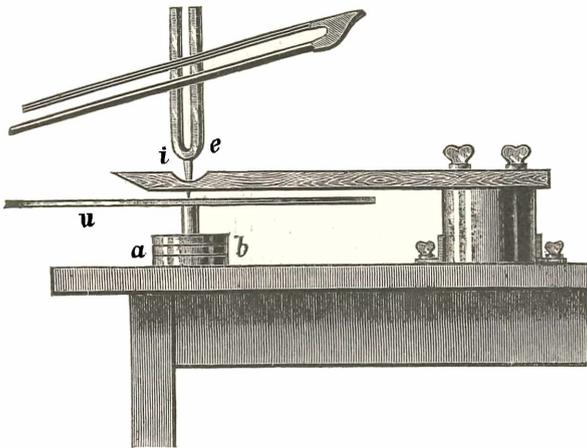


Fig. 54.

den Platten untersuchten, welche durch ihre Eigenschwingungen entstehen. Gleich bei den ersten Versuchen bemerkte ich, dass die Sandkörnchen hie und da kleine Bewegungen verraten und so hielt ich die Lösung dieser Aufgabe für sicher. Die **Fig. 54** zeigt die Anordnung der Versuche. Die Glasplatte *u* stand auf der kleinen Unterlage *a b* und konnte der Stiel der Stimmgabel an ihren Mittelpunkt beliebig stark angedrückt werden. Die Methode hat sich sehr gut bewährt und wurde immer angewendet, wenn die starren Platten von ihrem Mittelpunkte aus, oder aber von irgend einem anderen Punkte ihrer Oberfläche angeregt werden mussten. Um höhere Töne hervorzubringen,

streicht man die Stimmgabel mit dem Fiedelbogen weiter unten in der Nähe des Punktes *i*. — Da es aber interessant zu sein schien die Platten auch an ihrem Rande zu erregen, so änderte ich die Versuchsanordnung auch so, wie es die **Fig. 55** versinnlicht. Jetzt wurden die Glas- oder Metallplatten mit ihrem Rande an den Punkt *e* der Stimmgabel angelegt und mässig angedrückt.

(Auch Membranen konnten auf diese Art sehr gut erregt werden.)

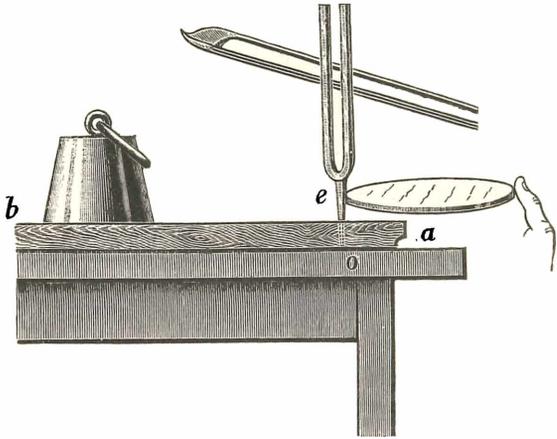


Fig. 55.

Der Buchstabe *d* deutet bei allen nachfolgenden Klangfiguren immer den Angriffspunkt der Platten an.

In der **Fig. 56** sehen wir 4 sehr scharfe, konzentrische Knotenkreisstücke, die bei etwa 20 Versuchen so sehr in ihren Dimensionen übereinstimmten, dass die Wellenlängen kaum innerhalb der Grenzen eines Millimeters variierten. Die 2 mm. dicke Sulin-Glasplatte hatte einen Durchmesser von 362 mm., und die Sandkreise hatten folgende Dimensionen: die halbe Wellenlänge des ersten Teiles *ab* betrug 41.5 mm., die des zweiten *bc* 41.5 mm., des dritten *ce* 41.5 mm. und endlich die des vierten *eo* 38.0 mm. (Die Dimensionen dieser Klangfigur wurden

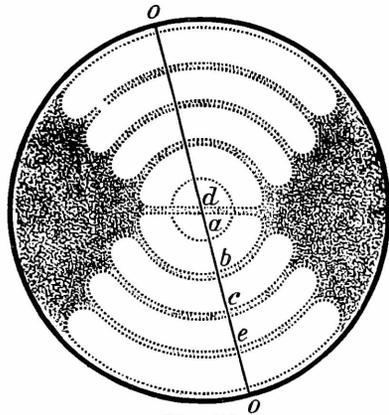


Fig. 56.

von dem Zeichner nicht ganz genau berücksichtigt.) Der Teil *ad* entwickelte sich nicht immer ganz rein und wurde deshalb vernachlässigt. Die Figur brachte ich mittels eines sehr hohen Obertones der Stimmgabel *a'* hervor. Der Ton konnte nicht näher bestimmt werden. Die ganze Wellenlänge betrug also bei dieser Klangfigur 83 mm., wogegen die demselben Tone entsprechende Wellenlänge auf einer Glanzpapier-Membran nur 28·5 mm. gefunden wurde. Auch zeigte es sich, dass die Wellenlängen auf verschiedenen Gläsern c. p. um 4–10 mm variierten. Dass die dem äussersten Knotenkreise entsprechende, halbe Wellenlänge nur 38·0 und nicht 41·5 mm. betrug, muss der Akkommodation der Randschwingung der Platte zugeschrieben

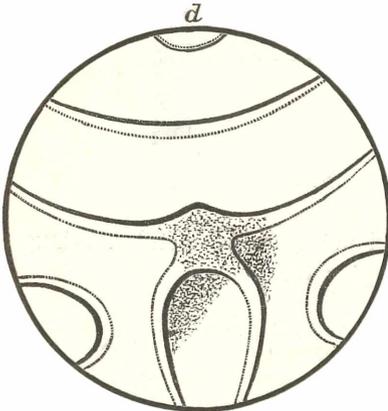


Fig. 57.

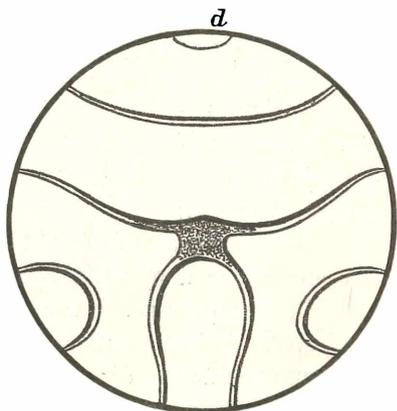


Fig. 58.

werden. Diese Erscheinung kommt bei allen Platten, ja auch bei den Membranen vor. (Die Messung der Klangfigur 56 geschah in der Richtung *oo*, weil in dieser die Knotenlinien am schärfsten entwickelt waren.)

Berühren wir den Rand der Glasscheiben an irgend einer passenden Stelle, so zeigen sich auch Speichenspuren; wird aber der Angriffspunkt auf der Oberfläche derselben etwas verrückt, so bilden sich wellenförmig gezielte elliptische Knotenlinien.

Die **Fig. 57** brachte ich mittels der Stimmgabel Nr. 3 (Tab. pg. 101) hervor. Hier sehen wir die Klangfigur in ihrer anfänglichen Entstehung; in **Fig. 58** in ihrer weiteren Ent-

wickelung und endlich in **Fig. 59** in ihrer Vollendung. Die aus gewöhnlichem Fensterglase geschnittene, 1 mm. dicke Scheibe, welche einen Durchmesser von 432 mm. hatte, wurde mittels

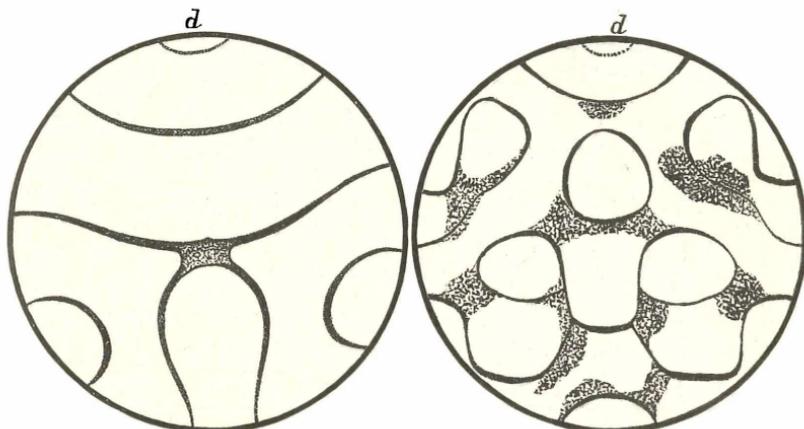


Fig. 59.

Fig. 60.

Siegellackes in ihrem Mittelpunkte befestigt und bei *d* mit der Stimmgabel in Berührung gebracht. Die Stimmgabel wurde leise mit dem Fiedelbogen gestrichen. — Die **Fig. 60** zeigt uns eine andere Gestalt, welche, auf derselben Platte mit der

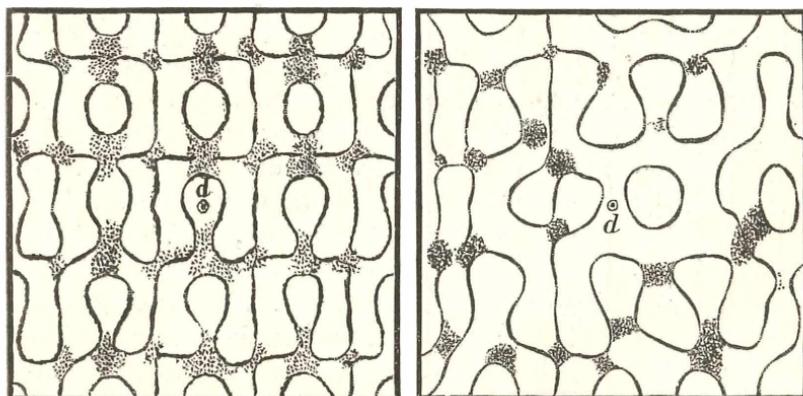


Fig. 61.

Fig. 62.

Stimmgabel Nr. 9 (Tab. pg. 101) hervorgebracht wurde.

Die **Fig. 61** und **Fig. 62** wurden mit den höchsten Tönen, der Stimmgabel Nr. 19 (Tab. pg. 102) auf zwei quadratischen

Platten von gleicher Grösse (375 mm. Seitenlänge), aber verschiedener Glassorten hervorgebracht. Zum Erzeugen der **Fig. 61** diente eine 2 mm. dicke, feine Sulingglasplatte, wogegen zu

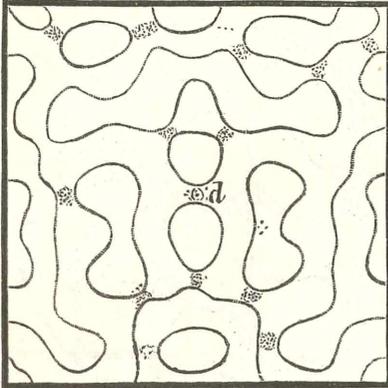


Fig. 63.

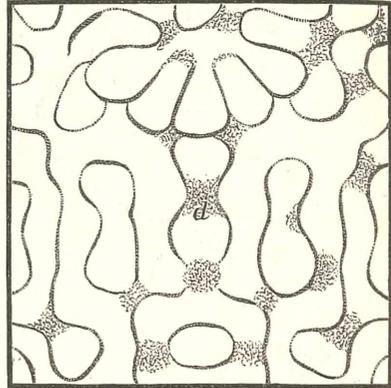


Fig. 64.

Fig. 62 eine ganz gewöhnliche und nur 1 mm. dicke Glas-scheibe genommen wurde. Übrigens scheint bei **Fig. 61** auch der Ton höher gewesen zu sein, als bei der **Fig. 62**. — Auch

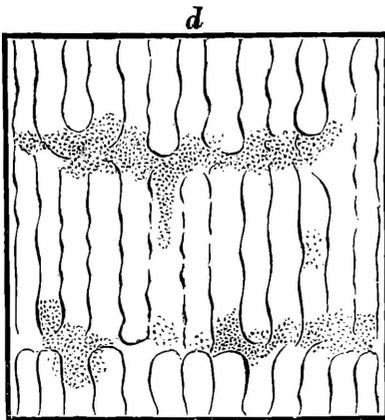


Fig. 65.

Fig. 63 und **Fig. 64** wurden durch dieselbe Stimmgabel auf einer und derselben Sulingglasplatte von 1.75 mm. Dicke und 460 mm. Seitenlänge hervorgerufen; nur wurde bei **Fig. 64** der Angriffspunkt d um etwa 4 mm verschoben. Die **Fig. 65**, welche mittels des höchsten Tones der Stimmgabel Nr. 25 (Tab. pg. 102) erzeugt wurde, muss als eine reine, den Longitudinalschwingungen entsprechende Typusfigur

auf Glasscheiben angesehen werden. — Beispiels- halber möchte ich hier noch die **Fig. 66** und **Fig. 67** beifügen, welche auf länglichen Glasstreifen von gleicher Qualität, aber

verschiedener Dimensionen, mittels der Stimmgabel Nr. 19. (Tab. pg. 102) erzeugt wurden. Auf dickeren Glasplatten entstehen oft nur gerade und miteinander parallel laufende Linien, die Kreisbögenteile zu sein scheinen, wie wir sie bei der **Fig. 56** sahen. Derartige Klangfiguren gelingen auch auf Glasstreifen von 8—900 mm. Länge und 1—10 mm. Dicke, wobei dickere Gläser oft leichter zu erregen waren als dünnere. —

Aus allen vorliegenden Versuchen ergibt sich, dass die Klangfiguren starrer Platten und Kartons nichts anderes sind, als unvollkommene Membranfiguren. Betrachten wir dem entsprechend die uns bekannten Chladnischen Klangfiguren¹⁾ (ungefähr 200) eingehender, so finden wir, dass es nicht schwer ist dieselben in folgende Teilungsklassen einzureihen: z. B. Fig. 100 = (6. 1.); 101. a. = (8. 1.); 102. a. = (10. 1.); 104. = (0. 2.); 105. = (2. 2.); 106. = (4. 2.); 107. = (6. 2.); 108. = (8. 2.); 109. a. = (0. 3.); 111. a. (4. 3.); 115. = (8. 4.); 120. = (22. 5.); 121. a. = (24. 5.) u. s. w., u. s. w.

Und nun können wir die Resultate im Foldenden übersichtlich zusammenfassen:

1. Die Chladni'schen Klangfiguren sind nichts anderes, als unvollkommene Membran-Figuren.
2. Membranen vibrieren bei Transversalschwingungen in geschlossenen Kreisflächen.
3. Jede vibrierende Membran muss so angesehen werden, als wenn sie aus lauter Kreisflächen zusammengesetzt wäre, wobei die benachbarten Teile immer in entgegengesetzten Phasen schwingen.
4. Jede Knotenlinie will sich zu einem ganzen Knotenkreise gestalten. Ist ihr das möglich, so bildet sich in Wirklichkeit ein Kreis; ist das aber nicht möglich, so deformiert

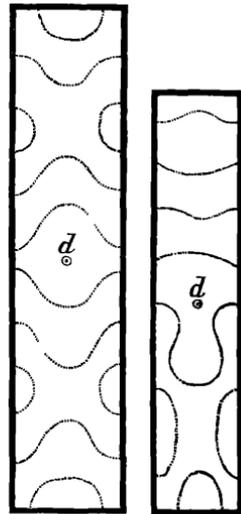


Fig. 66. Fig. 67.

¹⁾ Cladni's Akustik 1830. pg. 92 und Tab. IV—VI.

sich der Kreis zu anderen krummlinieigen, aber immer geschlossenen Knotenlinien.

5. Einander schneidende Knotenlinien können sich unmöglich bilden; sehen wir jedoch eine derartige Erscheinung, so ist diese nur scheinbar. Wir verwechseln in diesem Falle entweder eine Interferenzlinie mit einer Schwingungsmittellinie, oder aber haben wir es mit einem Liniensprünge zu thun, welcher einem Partialtone entspricht und also eine Beimischung fremder Knotenlinien bedeutet.

6. Es gibt Fälle, wobei zwei oder auch mehrere Schwingungsarten (verschiedener Töne) sich gleichzeitig geltend machen und das Beisammensein mehrerer Klangfiguren ermöglichen. In solchen Fällen ist die Auffindung der Teilungsklasse oft sehr erschwert.

7. Linienschwund und Liniensprünge verwirren oft die Erscheinungen so sehr, dass wir überhaupt keine Regelmässigkeit oder Symetrie herausfinden können.

8. Die Annahme Poisson's,¹⁾ »dass man bei kreisförmigen Membranen als Figur der Knotenlinien nur konzentrische Kreise erwarten kann«, muss fallen gelassen werden, denn die Experimente beweisen das Gegenteil.

9. Auf runden Membranen lagern sich die Interferenzlinien teils in konzentrischen Kreisen, teils in der Richtung der Radien speichenförmig. Kurz: in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen — ohne sich zu schneiden.

10. Auf quadratischen Membranen laufen die Interferenzlinien auch in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen und meistens parallel mit den Rändern derselben.

11. Die Knotenlinien bilden sich nicht immer gleichzeitig in den zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen, sondern es kommen häufig Fälle vor, in welchen die eine Richtung mehr hervortritt, als die andere; ja es können sogar die Knotenlinien in der einen Richtung ganz ausbleiben.

12. Da die senkrecht gegen einander laufenden Wellen nicht immer von gleicher Intensität sind, so entstehen auf den in irgend einer Richtung gut ausgebildeten Interferenzlinien

¹⁾ Melde Akustik 1883. pg. 127.

ebensoviele Einschnitte (Biegungen), als Interferenzlinien in der anderen Richtung hätten entstehen sollen. Aus obiger Ursache reissen die Knotenlinien an einzelnen Stellen oft auch durch und schrumpfen die einzelnen Partien derselben zu kleinen Knotenkreisen, oder auch zu Knotenpunkten zusammen. Letztere Erscheinung kann man am besten an den, den Longitudinalschwingungen entsprechenden Interferenzlinien beobachten.

13. Auch die unregelmässige Reflexion der Wellen bewirkt oft eine Modifikation der zwei senkrechten Richtungen, und wir bemerken auf Membranen manchmal 2, 3 oder auch mehrere Ausgangspunkte.

14. Sowohl auf Membranen, als auch auf harten Platten können gleichzeitig Transversal- und Longitudinalschwingungen und die den beiden entsprechenden Knotenlinien entstehen.

15. Bei höheren Tönen treten die Transversalschwingungen immer mehr und mehr in den Hintergrund und die Longitudinalschwingungen gewinnen die Oberhand. Es scheint, dass bei den höchsten Tönen die Transversalschwingungen ganz verschwinden.

16. Wenn irgend eine Membran Transversalschwingungen vollführt, so springt der Sand auf dieser vertikal auf und ab; wogegen bei Longitudinalschwingungen der Sand in horizontaler Richtung sanft weiter gleitet.

17. Bei Transversalschwingungen bilden sich immer Schwingungsmittelpunkte und Schwingungsmittellinien, welche bei reinen Longitudinalschwingungen absolut fehlen.

18. Wenn eine runde Membran ihren tiefsten Eigenton (Grundton) entsprechend im Ganzen schwingt, so sieht man auf ihr nur transversale Bewegung; der Schwingungsmittelpunkt fällt in diesem Falle mit dem geometrischen Mittelpunkte zusammen — und es entsteht nur ein einziger Knotenkreis am Rande derselben. Ähnliches geschieht auch auf quadratischen Membranen. (Nach Chladin kann dieser Fall auf vibrierenden, starren Platten nicht vorkommen; was auch ganz natürlich ist.)

19. Bei Klangfiguren, die durch Longitudinalschwingungen gebildet werden, bleiben, wenn die Tonquelle unveränderlich ist, — auf Membranen von gleichem Material — die Dimensionen der Wellenlängen stets dieselben, wenn auch die Span-

nung, die Belastung, die Grösse und die Form der Membran beliebig geändert wird; wogegen bei Transversalschwingungen die Spannung, die Belastung und die Form der Membran die grösste Rolle spielt.

20. Die durch die Transversalschwingungen gebildeten Klangfiguren eignen sich zu Messungen nicht gut, weil auf verschiedenen Teilen der schwingenden Fläche, — entsprechend den Amplituden verschiedener Höhe, — sowohl die Spannung der Membran, als auch der Widerstand des Luftdruckes ein verschiedener ist.

21. Die Membranen, obgleich sie sich für alle Töne und Transversalschwingungen mehr oder weniger eignen, können doch nicht mittels aller, namentlich aber tieferer Töne in genügend regelmässige Vibration versetzt werden und Klangfiguren zeigen. Dagegen kann jede Membran durch alle möglichen Töne in ganz regelmässige Longitudinalschwingungen versetzt werden und immer reine Knotenlinien zeigen, welche zwar verschiedenartig gekrümmt sein können, aber im Ganzen stets mit einander parallel laufen. — Dasselbe gilt auch für steife Platten.

22. Membranen können auch mittels Membranen, ohne dass sie einander berühren, angeregt und in regelmässige Transversalschwingungen gebracht werden, namentlich aber, wenn sie gleichtönig sind. (Luftfiguren.) Longitudinalschwingungen können auf diese Art auf Membranen nicht übertragen werden.

23. Wenn irgend eine Membran nicht in entsprechend gleiche Wellendimensionen sich teilen kann, aber für die Bildung der Knotenlinien dennoch geeignet ist, so bemerken wir an ihren Rändern Wellenunterschiede von 0·1—0·9 Wellenlängen. (Akkommodation.)

24. Die Klangfiguren der Membranen unterscheiden sich wesentlich von denjenigen, die auf festen Platten hervorgebracht werden, insbesondere dadurch, dass die letzteren sich nicht ganz ausbilden können. So z. B. ist unsere Membranfigur **Fig. 18** nichts anderes, als die einfache Chladnische Klangfigur, die ein + Zeichen nachahmt und die sich auf der steifen Platte nur bis zu dem Schwingungsmittelpunkte —

tnich aber weiter entwickeln kann. Während wir also bei den Membranen es meistens mit halben Wellenlängen zu thun haben, finden wir bei starren Platten nur Viertelwellenlängen, die noch durch die Akkommodation der Randschwingung leiden und sich deshalb zu Messungen nicht eignen.

25. Was die Bewegungsarten der Longitudinalwellen anbelangt, so zeigen die Versuche, dass diese, der Membranfläche parallel, in senkrechten Richtungen auf die Interferenzlinien stattfinden und ebenso wie die Transversalschwingungen stehende Wellen bilden.¹⁾

26. Die Schalleitungsgeschwindigkeit ändert sich bei Longitudinalschwingungen mit der Dicke des Materials und mit der Höhe des Tones, und wird umso kleiner je dünner das Material und je höher der Ton ist.

27. Longitudinalwellen bilden eigentlich keine Klangfiguren, sondern nur parallel laufende Interferenzliniensysteme.

28. Sowohl die Klangfiguren der Membranen, als auch die der starren Platten lassen sich in ganz bestimmte Teilungsklassen einreihen. Unpaarige Teilungen und Unregelmässigkeiten sind nur scheinbare Erscheinungen.

Pozsony (in Ungarn), Jänner 1904.

¹⁾ Kundt. Pogg. Ann. Bd. 126.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen des Vereine für Naturkunde zu Presburg](#)

Jahr/Year: 1904

Band/Volume: [NF_15](#)

Autor(en)/Author(s): Antolik Karl

Artikel/Article: [Über Klangfiguren gespannter Membranen und Glasplatten 71-139](#)