ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 48.

1. *Ein Schallschreiber mit sehr kleiner Seifenmembran; von S. Garten.*

(Aus dem Physiologischen Institut zu Gießen.)

(Hierzu Tafel VI—VIII.)

Die Aufgabe, die Schallschwingungen einwandfrei zu verzeichnen, ist trotz aller darauf gerichteten Versuche von Physikern und Physiologen bekanntlich bisher noch nicht vollständig gelöst worden. Als theoretisch einwandfrei kann allein die Methode von Raps¹⁾ gelten, der nach dem Verfahren von Boltzmann die Strahlen einer Lichtquelle zur Hälfte durch ruhende, zur Hälfte durch schwingende Luft leitet und sie darnach zur Interferenz bringt. Die Dichtigkeitsänderung der schwingenden Luft bedingt hier den Gangunterschied der beiden Lichtstrahlen. Das dem Prinzip nach ideale Verfahren leidet nur noch unter dem Übelstand, daß die Empfindlichkeit, wie er selbst bemerkt, nicht ausreicht, so daß feinere Einzelheiten der Schallkurven damit noch nicht genügend deutlich wiedergegeben werden können.

Bei fast allen anderen Apparaten, die zur Schallregistrierung verwendet wurden, wirken die Schallschwingungen auf Membranen ein, aus deren Bewegungen, bzw. aus den Bewegungen der mit ihnen verbundenen Teile des Registrierapparates, die wirklichen Schwingungen der Luft entnommen werden sollen. Als *membranlos* wäre höchstens die Einrichtung zu bezeichnen, die Marbe²⁾ beim direkten Ansprechen der rußenden Flamme anwandte, wobei die auf der bewegten Schreibfläche entstehenden Rußringe, ebenso wie bei seiner „Flammenmethode mit Membran“, die Zahl der Schwingungen, zum Teil auch

1) Raps, Über Luftschwingungen, Ann. d. Phys. N. F. 50. p. 193. 1893.

2) K. Marbe, Über die Verwendung rußender Flammen in der Psychologie und deren Grenzgebieten. Zeitschr. f. Psychol. 49. p. 206. 1908.

der Partialschwingungen, anzeigen. Feinere Einzelheiten, wie bei einer vollständigen Schallkurve, sind bei diesem Verfahren natürlich auch nicht zu erhalten.

Die Zahl der Membranapparate ist bekanntlich beträchtlich, was gerade als Hinweis dafür dienen kann, daß die Forderung einer *getreuen* Verzeichnung der Schallschwingungen nur schwer zu verwirklichen ist. Von zwei Seiten wurde die Ursache hierfür übersichtlich dargestellt. O. Frank¹⁾, der in seiner Kritik der elastischen Manometer eine Grundlage für die Beurteilung der Leistungen der physiologischen Registrierinstrumente schuf, hatte schon damals darauf hingewiesen, daß für die Beurteilung der Leistung aller Registrierinstrumente die *Höhe der Schwingungszahl des Systems von der größten Bedeutung* ist. Doch ist damit die Eigenschaft des Systems nicht erschöpft: Dämpfung und Empfindlichkeit sind ebenfalls zu berücksichtigen. So führte O. Frank den Begriff der „Güte“ eines Registriersystems ein und verstand darunter das Produkt aus dem Quadrat der Schwingungszahl des Systems multipliziert mit der Empfindlichkeit. Als wesentlichstes Resultat der Frankschen Darlegungen, die er später²⁾ noch besonders auf die Membran als Registriersystem anwendet, sei der Satz hervorgehoben: „daß eine korrekte Analyse der Schallphänomene in physikalischer Hinsicht nur möglich ist, wenn die Schwingungszahl des registrierenden Systems die zu registrierende wesentlich übertrifft“. Dasselbe Ergebnis hatte Goldhammer³⁾ an schwingenden Platten erhalten. Auf Grund seiner theoretischen Ableitung fordert er, um beispielsweise wenigstens die Stimme eines Alts oder Tenors bis auf den 5. Partialton *unverzerrt* aufschreiben zu können, eine Schwingungszahl der Membran von 4000, für einen Sopran eine solche von 5756. Für einige zur Schallschreibung von anderen Forschern früher verwendete Membranen sucht Goldhammer die Schwingungszahl zu ermitteln und findet bei den Samojloffschen⁴⁾ Korkpulver-

1) O. Frank, Kritik der elastischen Manometer. Zeitschr. f. Biol. 44. p. 584. 1903.

2) O. Frank, Die Membran als Registriersystem. Zeitschr. f. Biol. 60. p. 358. 1913.

3) A. Goldhammer, Über die Klanganalyse mittels schwingender Platten. Ann. d. Phys. 4. Folge. 33. p. 192. 1910.

4) A. Samojloff, Zur Vokalfolge. Pflügers Arch. 78. p. 1. 1899.

Suberitplatten Schwingungszahlen von beispielsweise 768—960 bzw. 1071. Bei einer Hermannschen Glasmembran, mit direkter optischer Registrierung der Schwingungen, berechnet er aus den Dimensionen 1063 Schwingungen.

Auch Wien¹⁾ hatte bei einer, der Schallregistrierung verwandten Aufgabe, seinen Bestimmungen der Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Höhe in bezug auf die Brauchbarkeit der Telephonplatten darauf hingewiesen (p. 15), daß „die Platten nur insoweit richtige Ergebnisse für die Tonempfindlichkeit geben, als Schwingungen mit ihnen untersucht werden, die tiefer sind als ihr erster Eigenton“. Er stellte für verschiedene Platten gebräuchlicher Telephone die Eigenschwingungszahl fest und fand für sie Schwingungszahlen von 1100, 1060 und 750. Diese Schwingungszahlen waren für viele seiner quantitativen Bestimmungen zu niedrig, so daß er sich Telephone anfertigen lassen mußte, deren Membranen bis zu 20000 Eigenschwingungen hatten.

Es würde hier zu weit führen, sämtliche in älterer Zeit ausgeführten Konstruktionen der Schallschreiber zu besprechen. Bei den meisten von ihnen ist ohne weiteres zu übersehen, daß die Schwingungszahl den oben gestellten Anforderungen bei weitem nicht gerecht wird.²⁾ Eine Zusammenstellung derselben, auch der älteren Konstruktionen, findet sich bei Poirot³⁾; auch ist in meiner ersten Mitteilung über den Schallschreiber⁴⁾ eine Übersicht über die wichtigsten Arbeiten gegeben.

Was die Versuche anlangt, die Seifenlamelle zur Aufzeich-

---

1) M. Wien, Über die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Töne verschiedener Höhe. *Pflügers Arch. f. Physiol.* **97**. p. 13. 1903.

2) So macht beispielsweise Hensen (*Zeitschr. f. Biol.* **23**. p. 299. 1887) über seinen Schallschreiber die Angabe: „die Abstimmung der Membran ergab sich unter diesen Verhältnissen zu 650“.

3) Poirot, *Phonetik in Tigerstedts Handb. der physiolog. Methodik.* **3**. 2. H. p. 83. 1912.

4) S. Garten, Über die Verwendung der Seifenmembran zur Schallregistrierung. *Zeitschr. f. Biol.* **56**. p. 41. 1911. In dem dortigen Literaturverzeichnis wäre noch zu ergänzen: Struycken, Optische Beobachtung und photographische Aufnahmen von akustischen Schwingungen. I. Intern. Laryngologenkongreß, Wien 1909. Mit zwei sehr leichten Membranen, die bei ihrer Schwingung die Drehung eines sehr kleinen, zwischen ihnen sinnreich angebrachten Spiegels bewirken, konnte er sogar Schwingungen

nung der Schallschwingungen zu benutzen, so ging man wohl von der Vorstellung aus, daß die äußerst geringe Masse und große Dehnbarkeit der Seifenlamelle eine besonders große Empfindlichkeit gewährleisten würde.

In weiteren Kreisen bekannt geworden ist namentlich der Apparat von Weiss¹⁾. Dieser Forscher verzeichnete die Schwingungen der Seifenmembran dadurch, daß er ein winziges winklig gebogenes Glashebelchen in der Mitte der Membran anlegte (10 μ dicken Glasfaden) und die Bewegung des Hebelarmes durch das Mikroskop photographisch registrierte. gelang es auch damit, sehr rasche Schwingungen aufzuzeichnen, so war doch die Schwingungszahl des Systems, worauf O. Frank²⁾ hingewiesen hat, viel zu niedrig, um eine einigermaßen korrekte Wiedergabe der bei der Sprache vorkommenden Schallschwingungen zu gewährleisten. O. Weiss³⁾ selbst hat später nach einem von mir zuerst angewandten Verfahren (vgl. unten, p. 284) die Eigenschwingungen des Schallsehreibers bestimmt und gefunden, daß sie 125 bei einer Membran von 1 cm Durchmesser betragen. Außerdem sind noch von May und Lindemann⁴⁾ und von

---

der Galtonpfeife von 20000—30000 Perioden registrieren. Eine kritische Prüfung des Apparates im Sinne O. Franks ist meines Wissens bisher noch nicht veröffentlicht worden.

1) O. Weiss, Zur Demonstration einer Vorrichtung für Schallanalysen. Schrift. d. physik.-ökon. Ges. z. Königsberg. 48. Jahrg. p. 246. 25. April 1907. — Ders., Mediz.-naturwiss. Arch. 1. p. 437. — Ders., Registrierung der menschlichen Herztöne durch Seifenhäutchen. Arch. f. d. ges. Physiol. 9. p. 463. 1907. — Ders., Das Phonoskop. Zeitschr. f. Biolog. Methodik 1. 1908. — Weiss-Joachim, Registrierung und Reproduktion menschlicher Herztöne und Geräusche. Pflügers Arch. 123. 1908. — O. Weiss, Die photographische Registrierung der geflüsterten Vokale und der Konsonanten S und Sch. Physiol. Zentralbl. 21. p. 619. 1907. — Ders., Über einige Einwände gegen die Verwendung von Flüssigkeitslamellen zur Schallregistrierung. Pflügers Arch. 127. H. 1—3. p. 74. 1909. — Ders., Phonokardiogramme. Fischer, Jena 1909.

2) O. Frank, Der Hebel des O. Weiss'schen Phonoskopes, Zeitschr. f. Biol. 55. 1911.

3) O. Weiss, Die Kurve der geflüsterten und leise gesungenen Vokale. Pflügers Arch. 142. p. 520. 1911.

4) May u. Lindemann, Graphische Darstellung des Perkussionschalles. Münch. med. Wochenschr. 1906. Nr. 17. — Dies., Graphische Studien über den tympanitischen und den nicht tympanitischen Perkussionsschall. Deutsch. Arch. f. Klin. Med. 98. 1908.

Gerhartz¹⁾ Versuche gemacht worden, die Schwingungen der Seifenlamelle direkt zu registrieren. Erstere benutzten die Spiegelung der Fläche einer Seifenlamelle; letzterer brachte einen leichten, durch einen Faden gehaltenen Spiegel auf die Membran, der bei Schwingung der Lamelle Richtungsänderung des von ihm reflektierten Lichtstrahles gab.

Beschreibung des Apparates.

Bei der Konstruktion meines Schallschreibers²⁾ ging ich von der Idee aus, die Bewegungen der Seifenlamelle selbst, und zwar die Bewegung eines zentral gelegenen Punktes derselben, direkt optisch zu verzeichnen. Da ein beliebiges, undurchsichtiges Staubteilchen, auf die Blasenmitte gebracht, durch Strömungsvorgänge u. dgl. seine Lage fast augenblicklich ändert, also nicht als optische Marke dienen kann, versuchte ich, ein feinstes Eisenstäubchen auf die Blasenmitte fallen zu lassen und dort durch die Pole eines Hufeisenmagneten, der unterhalb der Blasenmitte aufgestellt ist, festzuhalten. Es bleibt dann das Teilchen, solange die Seifenmembran in Ruhe ist, unverrückt in der Mitte liegen, und bei Schwingung der Membran wird es, da hier Kohäsionskräfte, also Kräfte ganz anderer Ordnung, in Betracht kommen, zwangsmäßig mitgeführt. Nach diesem Prinzip hatte ich, wie oben erwähnt, bereits 1911 einen Schallschreiber konstruiert, der seitdem noch wesentliche Verbesserungen erfahren hat, so daß er jetzt vielleicht auch dem Physiker, wenigstens für manche Aufgaben der Schallregistrierung, von Nutzen sein kann.

Früher verwendete ich zur Registrierung eine kleine, runde, ebene Seifenmembran von 2,5 mm Durchmesser, in deren Mitte das Eisenstäubchen, wie beschrieben, magnetisch festgehalten war. Das Diaphragma, das die Membran trug, lag an Stelle des Objektisches mit seinem Zentrum in der optischen Achse eines horizontal gelegten Mikroskopes. Um die Schwingung des Teilchens mit dem Mikroskop erfolgreich beobachten

---

1) H. Gerhartz, Registrierung von Bewegungsvorgängen mit feuchter Membran. *Pflügers Arch.* 124. 1908. — Ders., Die Aufzeichnung von Schallerscheinungen, insbesondere die des Herzschalles. *Zeitschr. f. experim. Pathol. u. Ther.* 5. 1908/09. (Hier Beschreibung des Apparates mit Glimmermembran und Spiegelübertragung.)

2) Ein Teil der folgenden Darlegungen ist bereits in meiner ersten Mitteilung. *Zeitschr. f. Biol.* 56. p. 41. 1911 enthalten.

zu können, war aber die Membranebene nicht senkrecht zur optischen Achse gestellt, sondern bildete mit dieser, bzw. auch mit der Ebene des Objektisches, einen Winkel von 45° . Bei Schwingungen der Membran führte demnach das Teilchen Bewegungen in einer Ebene aus, die nicht wie die eines mikroskopischen Präparates senkrecht zur optischen Achse stand, sondern ebenfalls einen Winkel von 45° mit ihr bildete. Trotz dieser Bewegungsrichtung konnte, da es sich um relativ kleine Exkursionen handelte, die Verschiebung des Teilchens mit dem Mikroskop gut erkannt und seine Bahn bei etwa 200facher Vergrößerung auch deutlich in Kurvenform abgebildet werden.

Fig. 1.

Wie die schematische Fig. 1 zeigt, befindet sich hinter der Membran *M* ein sehr kleiner Hohlraum, der auf der Rückseite durch eine Glasplatte *G* abgeschlossen ist, durch welche hindurch die Membran intensiv beleuchtet werden konnte. In der Kammer sieht man die in Spitzen auslaufenden Polschuhe eines Elektromagneten, die sorgfältig zur richtigen Fixierung des Teilchens in der Membranzmitte eingestellt sein müssen. Der Hohlraum ist, was auf der Figur hier nicht eingezeichnet wurde, durch eine sehr enge Öffnung, deren Weite den Grad der Dämpfung der Membran bedingt, mit einem kurzen weiten Schlauch und einem kleinen Glastrichter verbunden, von dem aus der Schall der Kammer zugeleitet wird.

Die Durchmesser der Membran konnten bei dieser ersten Konstruktion bis auf 2,0 mm herabgesetzt werden, und es ergab sich für eine solche eine Schwingungszahl von 1141 (nach Resonanz bestimmt). Diese Membran war aber bereits so wenig empfindlich, daß meist eine etwas größere, von 2,5 mm Durchmesser, Verwendung fand. Ihre Schwingungszahl betrug etwa 860, und es gelang mit ihr, wie die damals reproduzierten Photographien zeigen, einfache physikalische Klänge sowie die Vokale etwa in derselben Weise zu reproduzieren, wie es Hermann¹⁾ mit seiner direkten Methode und mit seiner indirekten Methode (Reproduktion der auf dem Phonographen erzeugten Eindrücke mittels Lichthebels) erreicht hatte. Auch noch Töne höherer Schwingungszahl, wie die einer Galtonpfeife mit 5162 Schwingungen, konnten, wenn auch mit kleiner Amplitude, verzeichnet werden.

War auch bei meiner früheren Konstruktion im äußersten Falle der Eigenton der kleinen runden Membran ziemlich hoch (bei 2 mm Durchmesser bei 1141), so lag er doch gegenüber den Perioden vieler Sprachlaute noch viel zu tief, um die Amplituden der höheren Töne auch nur einigermaßen quantitativ richtig wiederzugeben. Es geht das aus den Auseinandersetzungen von Frank und den anschaulichen Darstellungen, die Brömser²⁾ von den Veränderungen der Schwingungen bei Übertragung auf ein langsam schwingendes System gegeben hat, ohne weiteres hervor. Auch war die Empfindlichkeit meiner kleinsten runden Membran sehr gering.

Wollte man sich nicht nach einem neuerlichen Vorschlag von Hermann³⁾ darauf beschränken, die Registrierung mit einer Membran von tiefem Eigenton vorzunehmen, um dann

---

1) L. Hermann, Phonophograph. Untersuchungen I. Pflügers Arch. 45. 1889; II. Pflügers Arch. 47. p. 44. 1890; III. Pflügers Arch. 47. p. 349. 1890 u. 58. p. 1. 1893. — L. Hermann u. Matthias, Phonophograph. Mitteilungen; V. Die Kurven der Konsonanten, VI. Nachtrag zu den Vokalkurven. Pflügers Arch. 58. p. 255. 1894. — L. Hermann, Fortgesetzte Untersuchungen über die Konsonanten. Pflügers Arch. 83. p. 1. 1901. — Ders., Über die Zerlegung von Kurven in harmonische Partialschwingungen. Pflügers Arch. 83. p. 83. 1901.

2) Ph. Brömser, Theorie der registrierenden Apparate, Zeitschr. f. Biol. 56. p. 398. 1911.

3) L. Hermann, Die theoretischen Grundlagen für die Registrierung akustischer Schwingungen. Pflügers Arch. 150. p. 92. 1913.

eine entsprechende Korrektur auszuführen, so war es nötig, *ohne die Empfindlichkeit zu sehr zu beeinträchtigen, mit dem Eigenton noch weiter heraufzugehen*. Ist es mir auch bisher noch nicht gelungen, mit dem Eigenton der Membran die von Hermann für die Analyse der Vokalaufnahmen geforderte obere Grenze, d. h. das Ende der fünfgestrichenen Oktave zu erreichen, so bin ich doch wenigstens nahezu bis zum Anfang der viergestrichenen Oktave gekommen, ohne die Empfindlichkeit zu stark herabzusetzen.

Bei der Konstruktion der neuen Membran ging ich von der auf den Schallschreiber allerdings nicht streng übertragbaren Vorstellung Ficks¹⁾ über den Mechanismus des Trommelfells aus, das ja für eine große Tonreihe nahezu gleich gut anzusprechen scheint. Wie dieser Forscher ausführt, ist jene Erscheinung am Trommelfell dadurch zu erklären, daß zu dem eingewebten starren Radius, dem Hammerstiel, Streifen von sehr verschiedener Länge ziehen, denen je nach Länge und Spannung sehr verschiedene Eigentöne zukommen würden.

Da bei der Seifenmembran das Eisenteilchen ohne Verschiebung senkrecht zur Membranebene schwingen muß, habe ich mir eine bilateral symmetrische Membran von einer ganz bestimmten Form hergestellt, so daß sie sehr verschieden lange Sehnen besitzt. Infolge ihrer Symmetrie wird ein in ihrer Mitte magnetisch fixiertes Eisenteilchen auch bei stärkeren Exkursionen der Membran in der Mitte derselben verbleiben müssen. Wie die beistehende Fig. 2 des Diaphragmas bei zehnfacher Vergrößerung zeigt, betragen die beiden längeren Durchmesser 2,5 bzw.

Fig. 2.

3 mm, die aller kürzesten schrägen Durchmesser aber nur 1 mm. Außerdem wurde für besondere Zwecke, z. B. Registrierung sehr schwacher und tiefer Töne, der Herzgeräusche usw., noch ein Diaphragma von doppelter Länge aller Durchmesser, d. h. also 6 mm, 5 mm und 2 mm hergestellt.

Die Fig. 3 und 4 stellen die Kammer, welche das beschriebene Diaphragma trägt, bei 1,23facher bzw. 1,16facher Vergrößerung dar. In Fig. 3 ist auf der Vorderfläche die den Aus-

1) A. Fick, Gesammelte Abhandl. 3. p. 5.

schnitt tragende Platte aufgeschraubt, unter der sich ein ganz kleiner Hohlraum¹⁾ befindet, in dem die genau eingestellten

Fig. 3.

Fig. 4.

1) Der Hohlraum, dessen Kleinheit die gute Dämpfung bedingt, hat in der Richtung der optischen Achse, d. h. Deckgläschen-Diaphragma, eine Tiefe von 2,9 mm, eine Breite von 1,7 mm und eine Höhe von 3,2 mm. Nur direkt unter dem Diaphragma befindet sich ein etwas größerer Luftzylinder von 3,5 mm Durchmesser und 1 mm Höhe. Die Dimensionen des letzteren sind bei den obigen Angaben über die Kammertiefe mitberücksichtigt worden.

Polschuhe endigen. Diese treten namentlich in Fig. 4 als kleine Spitzen deutlich hervor. In dieser Figur ist die Platte mit dem Ausschnitt für die Membran abgeschraubt und oberhalb der Kammer für sich abgebildet. Mittels zweier Schrauben kann die Platte auf der Kammer befestigt werden. Dabei sind die entsprechenden Schraubenlöcher in der den Ausschnitt tragenden Platte etwas weiter als die Schrauben. Es ist dadurch ermöglicht, im Notfall noch eine geringe Korrektur in der Lage des Diaphragmas zu den Polschuhen vorzunehmen, um das Eisenteilchen genau in das Zentrum der Membran zu bringen. Nach unten öffnet sich die Kammer durch das hier nicht sichtbare Diaphragma in einen weiten Rohransatz zur Verbindung mit dem schallzuleitenden Gummischlauch. Durch Einsetzen verschieden großer Diaphragmen in den Kammerboden — ich verwende eine Öffnung von ca. 0,2 mm Durchmesser — kann die Dämpfung entsprechend verändert werden. An die für das einfallende Licht bestimmte Öffnung der Rückseite der Kammer wird nach Bestreichen der Hinterfläche der Kammerwand mit Vaseline ein Deckgläschen angelegt und dadurch ein luftdichter Abschluß erreicht. Es ist ratsam, das Deckgläschen nicht fest aufzukitten, da die Kammer häufig von Resten der Seifenlösung und von Eisenstäubchen gereinigt werden muß, was sich bei einem festen Abschluß durch Deckglas schwerer durchführen ließe.

Seitlich der Kammer gehen die Polschuhe in zwei kräftige, im Querschnitt rechteckige Eisenstäbe über, die auf dem verschiebbaren Objektisch mittels Federn festgeklemt werden. Dabei wird zugleich ihr Kontakt mit den Polen eines Elektromagneten hergestellt, der an den beiden Seitenteilen des Objektisches, wie namentlich die untenstehende Fig. 5 zeigt, endet.

Die beiden Pole des Elektromagneten werden (vgl. oben Fig. 1) so geschaltet, daß man mittels eines Schieberrheostaten nach Belieben die Stromintensität auf der einen Seite schwächen, auf der anderen Seite gleichzeitig verstärken kann. Dadurch wird das Eisenteilchen nach links oder rechts verschoben und kann durch diesen Kunstgriff leicht so gestellt werden, daß es genau vertikale Schwingungen ausführt. Der ganze Apparat mit dem Elektromagneten und einem durch Schraubentrieb verschiebbaren Objektisch läßt sich, so wie es Fig. 5 zeigt,

an jedem größeren Mikroskop anbringen. Zur Projektion der Bewegungen des Eisenteilchens diente mir meist das Objektiv Zeiss C, das nach Abfeilen eines kleinen Stückes der Messingfassung gerade noch genügend der Membran angenähert werden kann. Die benutzte Vergrößerung, Zeiss C kombiniert mit Projektionsokular 2, war in der Regel eine 140fache, wobei bereits die Reduktion der Vergrößerung durch die Projektion der um 45° gegen den Objektisch geneigten Ebene auf die Vertikalebene berücksichtigt wurde.

Fig. 5.

Da, wie oben erwähnt, die Schwingungsebene der Membran mit der Bildebene einen Winkel von 45° bildet, so war von vornherein zu befürchten, daß bei größeren Exkursionen der Rand der Eisenteilchen zu unscharf werden mußte. Wie die unten mitgeteilten Kurvenbeispiele zeigen, ist die Unschärfe jedenfalls ganz geringfügig, insoweit nicht extrem große Ausschläge erzeugt wurden. Andererseits war zu erwarten, daß bei Schwingungen des Eisenteilchens schräg nach oben, wo es sich dem optischen Systeme nähert, eine jede Wegstrecke, die das Teilchen zurücklegt, im Bilde größer wiedergegeben

wird, als im Falle des Abwärtsschwingens. Wie ich mich durch eine Messung überzeugen konnte, ist dieser Unterschied bei der benutzten Vergrößerung jedenfalls so unbedeutend, daß er ohne besondere Maßnahmen nicht bemerkt werden kann. (Betreffs dieser Messung vgl. Zeitschr. f. Biol. 56. p. 50. 1911.)

Bestimmung der Zahl der Eigenschwingungen und Dämpfung.

Wie ich schon früher beschrieb, lassen sich die Eigenschwingungen einer Seifenmembran einwandfrei dadurch hervorrufen, daß man dicht vor ihr, d. h. zwischen Objektiv und Membran einen elektrisch geladenen Konduktor anbringt. Bei meinen Versuchen stand er mit dem einen Pol einer Influenzmaschine in Verbindung. Wurden dann die beiden Pole der Influenzmaschine kurzgeschlossen, so schwingt die gespannte Membran in ihre Gleichgewichtslage zurück¹⁾, wobei im allgemeinen eine Reihe von Oszillationen auftreten. Später hat Weiss für die Eichung seines Phonoskops sich meiner Methode bedient, die ihn zu ganz anderen Resultaten führte als seine früheren Bestimmungen, bei denen er durch eine Telephonmembran versucht hatte, die Seifenmembran in Schwingungen zu versetzen.

Bei der Eichung der jetzt von mir verwendeten außerordentlich kleinen Membran war die photographische Registrierung²⁾ der Schwingungen erschwert, da bei nicht ganz genau

---

1) Wie ich schon früher hervorhob, haben Cremer und Matthes (Verh. d. Congr. f. Inn. Med. 1910) die Erscheinung der Vorwölbung einer Seifenmembran durch elektrische Ladung beschrieben, ohne aber das Phänomen zur Bestimmung der Eigenschwingungen, was ihnen gänzlich fern lag, zu verwenden.

2) Für die photographische Aufzeichnung der Kurven wurde das Bild des Eisenteilchens auf dem vertikalen Spalt meines Photokymographions entworfen. Hinter Spalt und Zylinderlinse dieses Apparates kann die einen Zylindermantel bildende lichtempfindliche Schicht um eine vertikale Achse je nach Einstellung mit verschiedener, aber fast ganz konstanter Geschwindigkeit (von etwa 1 mm bis zu 4 m) vorbeibewegt werden. Für Aufnahmen mit raschem Gang finden die Planfilme von Schleussner, für Aufnahmen bei langsamem Gang Bromsilberpapiere Verwendung. Die bei diesem Kymographion gebrauchten Kassetten können rasch und bequem im Tageslicht eingesetzt werden. Zur Zeitmarkierung wird auf der Kurve der Schatten des Hebels mit einer Zungenpfeife von 148 bzw. 145 Schwingungen und zuweilen der

zentrischer Einstellung des Eisenteilchens leicht ein Abrutschen desselben von der stark vorgewölbten Mitte und dann am Schluß der Eichung ein geringes Hin- und Herpendeln eintreten konnte. Immerhin ließ sich nach der geschilderten Methode, wenn auch das Teilchen auf der Höhe der Ablenkung selbst eine ziemlich unscharfe Abbildung lieferte, auch jetzt noch die Schwingungszahl ermitteln. Insbesondere wurde durch nochmalige Aufnahme einer Eichungskurve nach Abschluß der Kammer durch das auf der Rückseite angelegte Deckgläschen der Nachweis geführt, daß dann die Eigenschwingungen völlig verschwunden waren, die Dämpfung also eine vollkommene war. Unter diesen Umständen kommunizierte die Kammer mit der Außenluft nur durch die kleine, am Schlauchansatz befindliche Öffnung. Der große Unterschied im Verhalten der Membran bei offener und geschlossener Kammer tritt sehr deutlich an den beiden Eichungskurven Figg. 6 und 7, Taf. VI, zutage. In Fig. 6 ist die Eichung bei offener Kammer vorgenommen worden. Am Fuße der Figur sind zur Zeitmessung die Schwingungen einer Zungenpfeife von 148¹⁾ pro Sekunde zur Zeitbestimmung registriert worden. Die Geschwindigkeit der Schreibfläche betrug demnach fast 3 m. Die dunkle Linie darüber entspricht dem Eisenteilchen. Bei *a* ist der Kondensator entladen worden, und man sieht, wie steil die Membran nach der alten Gleichgewichtslage zurückkehrt und erst nach einer ganzen Reihe von Eigenschwingungen zur Ruhe kommt.

Trotz der unregelmäßigen Form der Membran ergibt sich, wie zu erwarten, ein mittlerer Eigenton, dessen Schwingungszahl etwa 2000 beträgt. Bei verschiedenen derartigen Versuchen erhielt ich folgende, im einzelnen voneinander etwas abweichende Werte:

I. Versuch: 2272 Schwingungen pro Sek. (Durschn. aus 4 Schwingungen)						
II. Versuch: 1975	„	„	„	(	6	)
III. Versuch: 1963	„	„	„	(	8	)
IV. Versuch: 1963	„	„	„	(	9	)
Im Mittel: 2043 Schwingungen.						

Schatten des Hebels eines Fünftelsekunden schreibenden Jacquetschen Chronographen mit registriert (vgl. S. Garten, Photograph. Registrierung, Tigerstedts Handb. d. Physiol. Meth. 1. 1911).

1) Die Schwingungszahl der Zungenpfeife betrug bei früheren Versuchen 148, bei allen neueren 145.

Der II. Versuch ist in Fig. 6 wiedergegeben. Die kleinen Abweichungen sind wohl dadurch bedingt, daß offenbar Flüssigkeitsansammlungen am Rande des Ausschnittes die freischwingenden Sehnen der Membran verkürzen, also die Schwingungszahl erhöhen. Umgekehrt wird eine Vergrößerung des die Membran belastenden Eisenteilchens die Schwingungszahl herabsetzen müssen.

In Fig. 7 ist eine Eichungskurve nach Abschluß der Kammer wiedergegeben. Man sieht, daß, abgesehen von kleinsten Zäckchen im absteigenden Teil, deren Schwingungszahl etwa 6098 betragen würde, das Eisenteilchen glatt in die Ruhelage zurückkehrt. Die nachträglich erfolgenden langsamen Schwingungen sind offenbar durch ein Hin- und Herpendeln des Eisenteilchens in der Membranebene bedingt und haben nichts mit den für die Eichung wichtigen Eigenschwingungen der Membran selbst zu tun.

Für Nachuntersucher sei bezüglich der Eichung bemerkt, daß mir als Konduktor ein etwa 0,4 mm dicker Kupferdraht diente, an dessen Ende ein Tröpfchen Lötzinn hing, das zu einer Scheibe von etwa 1,5 mm Durchmesser ausgeschlagen war. Das Scheibchen war möglichst genau senkrecht über der optischen Achse in sehr kleinem Abstand von der Frontlinse des Objectives angebracht. Es wurde meist so weit gesenkt, daß sein Schatten in dem mikroskopischen Bild bereits sichtbar wurde.

Bestimmung der Belastung der Membran.

Bereits früher hatte ich die Belastung der Membran, wie sie durch das Eisenteilchen bedingt ist, festzustellen versucht, indem ich aus dem mikroskopischen Bild, unter der Annahme, daß es sich um einen zylinderförmigen Körper handelte, den Inhalt und, durch Multiplikation mit 7,8, dem spezifischen Gewicht des Eisens, das Gewicht berechnete. Ich hatte damals geschrieben: „so hatte z. B. ein *verhältnismäßig* schon *großes* ¹⁾ Eisenteilchen, bei etwa 100facher Vergrößerung gemessen, folgende Dimensionen usw.“, und war zu einem Gewicht von etwa $\frac{1}{1000}$ mg gelangt. Nun betont Frank ²⁾ mit Recht, daß die Güte der mit Eisenfeilspänchen belasteten Membran stets geringer als die der freien Membran ist, „und sie erhält bei der Verkleinerung der Kapsel zum Schluß den

1) Früher nicht Kursiv!

2) O. Frank, Die Membran als Registriersystem. Zeitschr. f. Biol. 60. p. 363. 1913.

Wert 1,07 V, wenn man die Gartenschen Daten für die Maße der Eisenfeilspänchen einbezieht“. Damals hatte ich aber von einem „*verhältnismäßig schon großen*“ Eisenteilchen gesprochen, und es läßt sich tatsächlich zeigen, daß man mit viel kleineren Eisenteilchen einen genügend deutlichen Registrierpunkt oder besser eine Registrierlinie erhält.

Zur Erzeugung so feiner Partikelchen empfiehlt es sich nach meinen Erfahrungen, eine sehr feine *unmagnetische* Plattfeile und ein ebenfalls unmagnetisches Stück weichen Eisens zu verwenden, da sonst die feinsten Teilchen leicht am Eisen oder der Feile hängen bleiben und nicht auf die Membran herabfallen. Feilt man sehr zart und stößt man dann leicht mit der Feile gegen den Eisenstab, so fallen dann in der Regel genügend kleine Eisenteilchen auf die Membran herab.

Um festzustellen, mit wie leichten Teilen man noch arbeiten kann, habe ich, durch die Franksche Überlegung veranlaßt, nacheinander acht verschiedene Eisenteilchen auf der Membran eingestellt, die sich zur Registrierung eigneten, und durch Nachzeichnen ihrer Kontur bei bestimmter Vergrößerung (200- bzw. 141fach) ihre Dimensionen ermittelt. Es wurde dabei angenommen, daß es sich um zylindrische Teilchen handelte. Für ihre Gewichte ergaben sich folgende Werte:

Eisenteilchen Nr. 1	wog	0,000079	mg
„ 2	„	0,000021	„
„ 3	„	0,000305	„
„ 4	„	0,000010	„
„ 5	„	0,000095	„
„ 6	„	0,000555	„
„ 7	„	0,000102	„
„ 8	„	0,000062	„

Also im Mittel: 0,000154 mg.

Es wogen also die angeführten Eisenstäubchen im Durchschnitt 7mal weniger als das verhältnismäßig schon große Eisenteilchen, dessen Gewicht nach meinen früheren Angaben den Berechnungen Franks zugrunde lag. Ja es konnte nach obiger Tabelle sogar noch ein Eisenteilchen von etwa $\frac{2}{100\,000}$ mg, das also *50mal so leicht war* als das früher angenommene, zur Registrierung verwendet werden. Ich möchte noch bemerken, daß es nicht immer *sofort* gelingt, kleinste Teilchen wie die beschriebenen zu erhalten.

Fällt ein gröberes Teilchen auf die Membran, so kann man meist, ohne die Membran zu zerstören, dasselbe durch eine magnetische Nadel entfernen und ein neues Stäubchen auffallen lassen. Vielfach bleibt dann

eine einmal hergestellte Membran mit feinsten Teilchen auch während mehrerer Versuche bestehen. (Benutzung von nicht zu alter Plateauscher Seifenlösung.) Der sehr nahe liegende Gedanke, die Seifenmembran durch eine entsprechende dauerhafte Membran zu ersetzen¹⁾, kann nur dann durchgeführt werden, wenn nach Ausweis der Eichungskurven dieselben günstigen physikalischen Eigenschaften wie bei der Seifenmembran vorhanden sind.

Bestimmung der Empfindlichkeit der Membran.

Veranlaßt durch die Franksche Bemerkung, „eine genaue Beurteilung der mit ihr erreichten Wirkung ist erst möglich, wenn die Empfindlichkeit der Membran angegeben wird“, habe ich versucht, den Druck festzustellen, der im Innern des Dämpfungsraumes erzeugt werden muß, um durch Vorbuchtung der Membran eine Verschiebung des Eisenteilchens um 1 mm im mikroskopischen Bilde herbeizuführen.

Die Bestimmung wurde in der Weise ausgeführt, daß ein geneigt liegendes, doppelschenkliges Petroleummanometer mit einer größeren leeren Flasche kommunizierte, die ihrerseits wieder durch einen Glashahn mit dem Kapselhohlraum in Verbindung gesetzt werden konnte. Wurde die Hand der Flasche genähert, so trat, entsprechend der durch die Erwärmung in der Flasche erzeugten Drucksteigerung eine Verschiebung des Petroleummeniskus und ein Ausschlag des Eisenteilchens auf. Die Ausschläge des Petroleummanometers wurden dann in bekannter Weise mit denen eines vertikalstehenden Wassermanometers verglichen und auf dieses reduziert. Bei der Kleinheit der Ausschläge des Petroleummanometers sind die erhaltenen Werte nur als ungefähre Schätzungen aufzufassen. Es ergab sich, daß 1 mm Membranverschiebung, gemessen bei der 141fachen Vergrößerung, bei einer Drucksteigerung von 0,12 mm Wasser eintrat.²⁾

Da eine Verschiebung des einzelnen Teilchens um $\frac{1}{10}$ mm bei der Vergrößerung noch eben erkennbar sein dürfte, so würde das Druckminimum, das bei konstanter Einwirkung einen eben merklichen Ausschlag erzeugen könnte, also etwa 0,012 mm Wasser betragen. Selbstverständlich³⁾ müssen bei sehr raschen periodischen Druckänderungen die Schwellenwerte noch etwas

1) Herr Dr. phil. Steinhausen, der ja mit meinem Schallschreiber gearbeitet hat (Zur Kenntnis der Luftschwingungen in Flöten, Diss. Gießen 1914), hat mir brieflich diesen Gedanken geäußert.

2) Eine Reihe Kontrollversuche, die ich ca. 2 Jahre nach jenen Bestimmungen anstellte, ergaben mir als Mittelwert 0,11 mm Wasser.

3) Es geht das z. B. auch aus der Darstellung von Wien, (Messung der Tonstärke, Wied. Ann. **36**. p. 839. 1889) hervor.

höher liegen. Der gefundene Druck ist ein außerordentlich hoher, wenn man ihn mit den Druckwerten vergleicht, wie sie im Minimum zur Auslösung einer Gehörsempfindung erforderlich sind.¹⁾ Immerhin reicht die Empfindlichkeit der Membran für viele Aufgaben der Sprachregistrierung vollkommen aus.

Beispiele einiger registrierter Schallkurven.

Um von den Leistungen des Schallschreibers einen Begriff zu geben, sollen im folgenden einige charakteristische Schallkurven, die zum Teil auch für den Physiker von Interesse sein dürften, an der Hand der auf Taf. VI—VIII wiedergegebenen Abbildungen beschrieben werden. Rein technisch zeigen die Kurven, daß es tatsächlich, trotz der Schwingungen des Eisenteilechens in einer Bahn, die mit dem Objektisch einen Winkel von 45° bildet, möglich ist, ausreichend scharfe Grenzlinien zu erhalten. Bei der von mir benutzten Anordnung reicht auch, wie die abgebildeten Kurven zeigen, die Lichtstärke der Bogenlampe trotz engen Kymographionspaltes aus, um die Registrierung bei 2—3 m Geschwindigkeit, wie sie für die spätere Analyse der meisten Kurven notwendig ist, vorzunehmen.

1. Klangkurven von Stimmgabeln.

Da der Schallschreiber zur Untersuchung der menschlichen Stimme, insbesondere der tieferen Töne, die unterhalb der Schwingungszahl der Membran (2000) liegen, Verwendung finden soll, so war zunächst praktisch zu prüfen, ob ein physikalisch genau bekannter Klang, der sich aus zwei oder mehreren zueinander harmonischen Sinusschwingungen zusammensetzt, einigermaßen richtig wiedergegeben wird. Die Erzeugung eines geeigneten Klanges wäre schwierig, wenn man die Forde-

---

1) Nach M. Wien, Messung der Tonstärke (l. c. p. 849) lag die Reizschwelle für die Wahrnehmung von a' bei einem Druck von $0,59 \mu\mu$ Quecksilber. Es würde demnach der Druck, der zu einer eben merklichen Exkursion der Seifenmembran erforderlich ist, rund 1500mal so groß sein, wie der Schwellenwert für die Gehörswahrnehmung. Demnach ließen sich noch Töne sehr verschieden großer Intensität registrieren, wenn man mit Wien (p. 847) den Reizumfang auf 625000 Millionen für das menschliche Ohr annimmt.

rung stellte, daß die ihn zusammensetzenden Schwingungen ein bekanntes Amplitudenverhältnis besitzen müßten. Verzichtet man aber darauf und begnügt sich, festzustellen, daß nach Ausweis der Analyse in der registrierten Kurve in der Hauptsache die wesentlichen, den Klang liefernden Schwingungen auftreten, so ist die Herstellung eines geeigneten Klanges leicht zu erzielen. Für den vorliegenden Zweck erhält man beispielsweise mit genügender Genauigkeit durch Anschlagen zweier Stimmgabeln einen Klang, in dem die höheren Obertöne der Stimmgabeln namentlich während des Abklingens gegenüber den entsprechenden Grundtönen ganz zurücktreten.¹⁾

Ein derartiger Versuch ist in Fig. 8, Taf. VI, wiedergegeben. Es wurden zwei Stimmgabeln von 128 und 3×128 Schwingungen benutzt, deren Resonatoren sich gegen den Trichter des Schallschreibers hin öffneten. Kurz vor der Registrierung waren die Gabeln angeschlagen worden, und die Ausschläge der Seifenmembran wurden während ihres Abklingens registriert. Unterhalb der Schwingungskurve des Eisenteilchens ist die Kurve der Schwingungen einer Zungenpfeife von 145 Schwingungen, wie in allen folgenden Kurven, zwecks Zeitmessung mitregistriert worden, und zwar wurde, um Platz zu sparen, hier nur die obere Hälfte dieser Kurven mitabgebildet. Zum Vergleich ist unterhalb von Fig. 8 noch die Schwingungskurve der tieferen Gabel, wie sie vom Eisenteilchen wiedergegeben wird, in Fig. 9 allein verzeichnet. Die obere, kombinierte Kurve wurde zwecks Analyse in fast 8facher Vergrößerung mittels des Projektionsapparates nachgezeichnet und an ihr wurden mit dem harmonischen Analysator von Mader²⁾ die ersten neun Partialtöne in bezug auf ihre Amplitudengröße bestimmt. In beistehender Tabelle sind die resultierenden Amplituden der neun ersten Teiltöne in der Weise verzeichnet, daß die Summe aller neun gleich 100 gesetzt wurde.

---

1) Vgl. H. v. Helmholtz, *Lehre von den Tonempfindungen*. 6. Aufl. 1913. p. 121: „Die hohen Töne verklingen gewöhnlich schnell, während der Grundton lange stehen bleibt“.

2) O. Mader, *Ein einfacher harmonischer Analysator mit beliebiger Basis*. *Elektrotechn. Zeitschr.* H. 36. 1909.

Tonhöhe	Amplitude
1 · 128	38,9% (Grundton von Stimmgabel I)
2 · 128	1,6
3 · 128	49,2 (Grundton von Stimmgabel II)
4 · 128	3,3
5 · 128	1,6
6 · 128	0,8
7 · 128	1,6
8 · 128	1,2
9 · 128	1,6

Es wird also hier durch die Analyse, wie zu erwarten war, sehr deutlich das Überwiegen der beiden Grundtonschwingungen der Stimmgabeln gegenüber den Obertönen bestätigt. Letztere sind zum Teil hier in so geringer Stärke vorhanden, daß die Werte bereits in das Gebiet der Messungsfehler fallen.

2. Klang der verschieden stark angeblasenen offenen Orgelpfeife.

Der Klang der offenen Orgelpfeife ist physikalisch ebenfalls gut bekannt und daher zur Prüfung der Schallschreibung besonders geeignet. Im Klange der offenen Orgelpfeife können je nach Stärke des Anblasens neben dem Grundton die geradzahligen und ungeradzahligen Obertöne in verschiedener Stärke auftreten. Und zwar tritt mit der Stärke des Anblasens der Grundton immer mehr zurück. Von Raps¹⁾ wurde in ähnlicher Weise an der gedeckten Orgelpfeife, bei der ja die ungeradzahligen Obertöne allein vorhanden sind, die Zunahme des dritten Obertones bei Drucksteigerung gegenüber dem Grundton mit seiner Interferenzmethode nachgewiesen.

In Fig. 10, Taf. VI ist nun die Schwingungskurve bei ziemlich schwachem Anblasen einer Orgelpfeife von 120 Schwingungen wiedergegeben. In Fig. 11, Taf. VI ist der Luftstrom verstärkt worden, und in Fig. 12, Taf. VI endlich wurde sehr kräftig geblasen. Man sieht auf den Kurven, daß die Grundtonschwingung mit der Verstärkung des Luftstromes mehr und mehr zurücktritt und fürs Auge sichtbar, der dritte Teilton die Oberhand gewinnt; doch ist auch, wie zu erwarten, der zweite Teilton in

1) Raps, Über Luftschwingungen, Ann. d. Phys. N. F. 50. p. 193. 1893.

beträchtlicher Stärke vorhanden. Es geht das aus den Analysen hervor, die von den Kurven 10 und 11 ebenfalls mit dem harmonischen Analysator von Mader in der oben beschriebenen Weise gemacht wurden. Nur habe ich mich hier auf die Bestimmung der ersten fünf Teiltöne beschränkt, und es wurde die Summe der resultierenden Amplituden derselben ebenfalls gleich 100 gesetzt.

Fig. 10.	Teilton	Amplitude
	1	37
	2	22
	3	37
	4	2
	5	2

Fig. 11.	Teilton	Amplitude
	1	6
	2	25
	3	65
	4	1
	5	3

Man ersieht aus der Analyse, daß in Kurve 11 der dritte Teilton auf Kosten des Grundtones gegenüber Kurve 10 verstärkt ist. In Fig. 12 sind, wie schon der Augenschein lehrt, die ersten beiden Teiltöne fast vollständig verschwunden, und die Pfeife gab, was mit dem Ohr deutlich wahrzunehmen war, jetzt den dritten Teilton an. Von einer Analyse dieser Kurven wurde abgesehen.

● 3. Beispiele periodischer Intensitätsänderungen (Schwebungskurve und Konsonant *P*).

Daß mittels der Seifenmembran sich auch noch Schwebungen zweier relativ hoher Töne, auch wenn die Schwingungszahl dieser Töne höher liegt als der Eigenton der Membran, anschaulich wiedergeben lassen, wird durch Fig. 13 gezeigt. Es waren hier vor dem Trichter des Schallschreibers zwei kurze offene Glaspfeifen gleichzeitig angeblasen worden. Die Schwingungszahl der höheren betrug, wie die Ausmessung der Kurve ergab, 2694. Man sieht sehr deutlich, wie periodisch die Amplituden größer und kleiner werden, und zwar betrug die Zahl der Schwebungen 39 in einer Sekunde.

Ebenso wie die allmählichen Intensitätsänderungen bei den Schwebungen werden auch die periodischen *plötzlichen* Intensitätssteigerungen, wie sie beispielsweise den Klang des

Konsonanten „r“ charakterisieren, von der Membran gut wiedergegeben. In Fig. 14, Taf. VII ist bei langsamerem Gang der Schreibfläche eine Kurve des Konsonanten „r“ (Gaumen-„r“) wiedergegeben. Entsprechend seinem Vokalcharakter liefert der Laut „r“ einen ausgesprochenen Grundton, dessen Schwingungszahl im vorliegenden Fall 135 beträgt. Innerhalb jeder Grundtonperiode findet man, worauf hier nicht näher eingegangen werden kann, eine Reihe kleinerer, regelmäßig wiederkehrender Schwingungen. Die Amplituden dieser Schwingungen nehmen, wie die Kurve deutlich zeigt, periodisch an Größe ab, um *plötzlich* wieder ihren maximalen Wert zu bekommen. Im vorliegenden Fall konnten 13,5 solche Schläge pro Sekunde gemessen werden.

4. Klangkurve eines höheren Tones (Galtonpfeife von 8555 Schwingungen).

Da der Eigenton der Seifenmembran bei etwa 2000 liegt, so ist es, wie oben angeführt wurde, unmöglich, bei höheren Klängen die Amplitudenverhältnisse einigermaßen richtig wiederzugeben. Immerhin lassen sich mit dem Apparat, wie auch schon in meiner ersten Mitteilung gezeigt wurde, sehr viel höhere Schwingungen, unter Verzicht auf quantitativ richtige Wiedergabe, *noch genügend deutlich* verzeichnen. In Fig. 15, Taf. VII sind die Schwingungen der Membran beim Anblasen mit der verhältnismäßig tief gestimmten Galtonpfeife wiedergegeben. Um die sehr kleinen Schwingungen genügend deutlich sichtbar zu machen, wurde die Kurve, wie die im Original in 1 mm Entfernung verzeichneten Abszissenlinien erkennen lassen, auf das 5,3fache vergrößert. Der Raumersparnis halber wurde außerdem ein Teil der zugehörigen Schwingungskurve der Zungenpfeife von 145 Schwingungen, nach Einzeichnung zweier Ordinaten in der Abbildung, dicht an die obere Kurve herangerückt. Wie die Auszählung ergibt, zeigten die registrierten Schwingungen eine Frequenz von 8555. Man kann auch bei noch höheren Tönen der Galtonpfeife Membranschwingungen erhalten; doch werden sie zunehmend kleiner — schon in Fig. 15 beträgt die Ordinatenhöhe nur noch 0,26 mm, — so daß eine deutliche Registrierung bei der benutzten Anordnung schwierig werden würde.

5. Die durch einen Knall hervorgerufenen Schwingungen der Membran.

Zur Ergänzung der oben beschriebenen Prüfung der Membran auf ihre Eigenschwingung und ihre Dämpfung habe ich auch die äußerst rasche und kurzdauernde Luftbewegung benutzt, deren Wirkung auf das Gehörorgan uns die Empfindung des „Knalles“ verschafft. Durch Versuche an seiner Schlitzsirene hat Hensen¹⁾ gezeigt, daß als physikalische Ursache für die Knallempfindung in der Hauptsache²⁾ ein einzelner Luftstoß genügt; dabei ist es nach seinen Versuchen nicht erforderlich, daß in der Nähe der Schallquelle die Luft raschere Bewegungen ausführe, als der Fortpflanzung des Schalles entspricht. Daß solche Luftbewegungen vielfach an der Knallquelle auftreten können, war durch Lummer³⁾ erwiesen worden. Zur Entscheidung der Frage, ob beim Knall sich eine größere Zahl von Luftschwingungen zeigen, sind in älterer Zeit, wie Auerbach⁴⁾ (p. 276) ausführt, mehrfach graphische Registrierungen mit verschiedenem Erfolge ausgeführt worden. Leider hat Raps mit seiner Interferenzmethode keinen diesbezüglichen Versuch ausgeführt; denn bei der dem Knall zugrunde liegenden, äußerst heftigen Luftbewegung wäre es sicher möglich, mit dieser Methode alle Resonanz bedingenden Hohlräume zur Schallzuleitung zu vermeiden.

Bei meinen Knallregistrierungen, die mehr gelegentlich zur Prüfung der Leistung der Membran unternommen wurden,

1) H. Hensen, Über Anfangs- und Endknall bei Tönen. VI. Intern. Physiologenkongr. Centralbl. f. Physiol. 1907 und Pflügers Arch. 119. p. 254. 1907.

2) Daß sich an einem solchen Luftstoß stets Nachschwingungen anschließen müssen, braucht hier wohl nicht erst betont zu werden.

3) O. Lummer, Über die Theorie des Knalles. 83. Jahresber. d. Schles. Ges. naturwiss. Sektion, p. 2. Breslau 1906.

4) F. Auerbach, Akustik (Winkelmanns Handb. d. Phys. p. 276. 1909): „Bei kurzen Knallgeräuschen hat man z. B. mit Hilfe der Schlierenmethode oder der manometrischen Flammen u. a. die Frage — jedoch ohne einheitlichen Erfolg — zu entscheiden versucht, ob solche Knalle nur eine einzige, vielleicht gar nur eine halbe Welle oder aber doch mehrere solche Wellen repräsentieren. Beim Funken fanden Toepler nur eine, neuere Autoren mehrere Wellen; Hensen erhielt beim Knallen eine ganze Anzahl, Brücke dagegen beim Händeklatschen sowie beim Explodieren von Seifenblasen nur eine einzige Flammenzacke, was vielleicht an dem verschiedenen Material der Membran (Kautschuk bzw. Glimmer) liegt“.

und bei denen deshalb auch die Literatur nicht eingehend berücksichtigt worden ist, diente als Schallquelle der zwischen zwei Metallkugeln überschlagende Funken einer Influenzmaschine bzw. eines Induktoriums. Der Schall wurde in den meisten Versuchen, um fehlerhafte Wiedergabe durch Resonanz auszu-schalten, der Membran direkt durch die freie Luft zugeführt.

Der verhältnismäßig schwache Knall beim Überspringen des Funkens an der Influenzmaschine bei einer Funkenstrecke von etwa 1 cm ist in Fig. 16, Taf. VI registriert. Die Schwingungen der Membran sind ziemlich klein, obwohl der Funken nur 7,5 cm von ihr entfernt übersprang. Wie die Figur deutlich zeigt, ist die Schwingung so stark gedämpft, daß die zweite Ganzschwingung nur eben noch zu erkennen ist. Nach dem Abstand von Wellental 1 zu Wellental 2 gerechnet, würde die Schwingungszahl 109 betragen.

Um einen schärferen Knall zu erzielen, wurde in weiteren Versuchen ein großes Induktorium verwendet, dessen sekundäre Pole mit den Innenbelegen zweier Leydener Flaschen verbunden waren, deren Außenbelege miteinander kommunizierten. Um dabei noch weitere Verschiedenheiten im Knall zu erhalten, wurden, im folgenden als Anordnung *a* bezeichnet, zwei *ganz kleine* Leydener Flaschen von je 60 qcm Fläche des äußeren Belages und, als Anordnung *b*, zwei *große* Leydener Flaschen von etwa¹⁾ 1815 qcm des äußeren Belages verwendet. Die Funkenstrecke betrug durchschnittlich 1 cm.

Fig. 17, Taf. VI zeigt eine mit der Anordnung *a* erhaltene Knallkurve. Auch hier kommt der Knall in einer Schwingung mit außerordentlich starkem Dekrement zum Ausdruck. Trotz der anfänglich größeren Amplitude ist die dritte Schwingung nur eben noch wahrnehmbar. Die Schwingungszahl würde betragen: nach der ersten Schwingung, gerechnet von Wellental zu Wellental, 159, nach der zweiten Schwingung 171. Es scheint also die in Fig. 16 registrierte, durch den Knall des Funkens der Influenzmaschine hervorgerufene Schwingung der Membran unter den gegebenen Bedingungen eine langsamere zu sein als die in Fig. 7, Taf. VI vom Induktorium erhaltene. Unter Benutzung der Anordnung *b* wurde der Knall der Funken mächtiger, so daß die Entfernung Funke—Membran

---

1) Die beiden Leydener Flaschen, die mir zur Verfügung standen, waren verschieden groß.

wesentlich vergrößert werden mußte. Fig. 18, Taf. VI zeigt eine solche Aufnahme des Knalles bei großer Funkendistanz. Man sieht hier fast nur eine einzige Halbschwingung, die verhältnismäßig rasch verläuft; jedenfalls rascher als bei der eben beschriebenen Anordnung. Die weiße vertikale Linie vor Beginn der Kurvensenkung ist durch die Lichtwirkung des Funkens hervorgerufen und gibt annähernd — auf genaue Einstellung des Funkens in der Medianebene der Anordnung war nicht besonders geachtet worden — den Moment des Überspringens des Funkens wieder. Nebenbei sei bemerkt, daß die periodischen Oszillationen in der Entladung, nach der Lichtlinie zu urteilen, sich bei der gewählten Anordnung so rasch folgten, daß sie auch unter dem Mikroskop nicht zu erkennen sind. Dagegen erkennt man in der Membranschwingung unter dem Mikroskop am Anfang der Exkursion außerordentlich rasche Luftschwingungen, deren Schwingungszahl schätzungsweise 13920 betrug. Im weiteren Verlauf — in der Fig. 18 am Wellental sichtbar — treten dann langsamere Schwingungen von 4176 auf, die etwa dem ersten Oberton der Membran, die ja rund 2000 Schwingungen hatte, entsprechen können. Die am Anfang der Exkursion sichtbaren, sehr raschen Schwingungen waren angedeutet auch an vielen anderen Knallkurven zu beobachten. Sie treten am absteigenden Ast der Knallkurve nach meinen bisherigen Erfahrungen besonders dann deutlich hervor, wenn der einen heftigen Knall gebende Funke fast bis zu der Grenze der Membran genähert wird, bei der eine Sprengung derselben erfolgt. In Fig. 19, Taf. VI ist bei 3facher Vergrößerung der Originalaufnahme eine derartige Knallkurve wiedergegeben. Um auf die in der Originalfigur immerhin schwer erkennbaren raschen Schwingungen hinzuweisen, wurden am Rande der Figur je 10 den Schwingungen entsprechende feine Linien eingetragen. Bei dem Versuch folgten sich zufällig, wohl durch eine Kontaktstörung am Quecksilberunterbrecher bedingt, wie die beiden weißen Linien zeigen, zwei Funken in kurzem Intervall, was für die Erkennung der Teilschwingungen hier von besonderem Vorteil war, da diese gerade nach dem zweiten Knall besonders klar hervortraten. Beim ersten Knall ist wahrscheinlich infolge einer geringen seitlichen Verschiebung des Eisenteilchens der absteigende Kurvenast zu hell geworden.

Trotz der kurzen Entfernung Funke—Membran von 0,48 m kann man versuchen, aus dem zeitlichen Abstand der Lichtlinie von dem Beginn der Schwingungen die Geschwindigkeit der Fortleitung des Knalles

Fig. 19.

zu berechnen. Es fand sich als Leitungszeit 1,46 σ . Legt man die Schallgeschwindigkeit von 340 m zugrunde, so erhält man 1,41 σ . In einem anderen Versuch, wo die Entfernung nur 45,5 cm betrug, fand sich 1,42 σ als Leitungszeit, während, nach der Schallgeschwindigkeit berechnet, 1,34 σ erforderlich waren. Selbstverständlich können diese beiden Versuche keinen sicheren Wert der Leitungsgeschwindigkeit des Knalles

ergeben, da bei einer exakten Bestimmung der Leitungsgeschwindigkeit Registrierungen von zwei verschieden entfernten Knallquellen vorgenommen werden müßten, um etwaige Verzögerungen zwischen Funke und Knallentstehung bzw. Verzögerung im Beginn der Membranschwingungen auszuschalten.

In Fig. 19, Taf. VI sieht man, daß im Knallbeginn das Eisenstückchen, entsprechend den großen Amplituden, außerordentlich geschwind hin und her geworfen wird, was verständlich erscheint, wenn man mit Lummer¹⁾ annimmt, daß beim Knall die Luft sehr rasch von der Knallquelle fortgeschleudert oder nach ihr hin bewegt wird. Für den durch den Funken der Leydener Flasche erzeugten Knall nimmt Lummer eine Verdünnungswelle an: „Wie dem aber auch sei,“ schreibt Lummer p. 11, „bei allen Knallvorgängen der Natur läßt sich stets nachweisen, daß entweder eine abnorme Verdichtungswelle durch die Bewegung kompakter Massen (Geschoß, Peitsche, Meteor und Explosion) oder eine abnorme Verdünnungswelle durch Erzeugung oder Öffnung eines Vakuums entsteht (Blitz, Leydener Flasche, Glühlampe)“. Dem gegenüber finde ich auch bei den stärksten Vergrößerungen der Kurven (vgl. Fig. 19) im Knallanfang ein steiles Herabgehen des Teilchens, was bei der direkten Schallzuleitung von vorn einer *Drucksteigerung* entspricht. Und ebenso ergibt die Zuleitung des Knalles von der Kammerhöhlung aus (vgl. die Resonatorversuche, p. 300) zu Anfang der Knallkurve einen steilen Anstieg, der wiederum mit einer primären Drucksteigerung übereinstimmen würde. Es ist also jedenfalls bei der in meinen Versuchen gewählten Entfernung der Knallquelle immer im Knallbeginn von der Membran eine Verdichtungswelle registriert worden.

Ob der von der Knallquelle ausgehende Luftstoß die in Fig. 19 abgebildeten raschen Schwingungen dadurch hervorrief, daß er so hohe Teilschwingungen der Membran hervorbrachte, oder dadurch, daß er die Luft in dem kleinen Kapselhohlraum, ähnlich, wie es unten für Resonatoren beschrieben wird, in Schwingungen versetzte, ist zunächst schwer zu entscheiden. Es betragen die Schwingungszahlen jener raschen Schwingungen in obiger Figur nach dem ersten Knall *schätzungsweise* 17066, nach dem zweiten Knall 15067. Es würde also

1) O. Lummer, Über die Theorie des Knalles. Schles. Gesellschaft f. vaterl. Kultur, Abt. II. p. 2. 1905.

der Eigenton, insoweit er durch die Seifenmembran nicht wesentlich geändert wird¹⁾, nahe an der oberen Hörgrenze liegen. Bei Anblasen der hinten durch ein Deckglas verschlossenen Kammer des Schallschreibers durch ein gegen das Diaphragma gerichtetes Glasrohr nimmt man nun in der Tat neben dem Blaseräusch einen sehr hohen Ton wahr, und zwar nur so lange, als das hintere Kammerfenster geschlossen war. Dieses spricht also für die letztere Annahme, daß der Knall die Luft im Kapselhohlraum in Eigenschwingungen versetzt hatte.

Die während des Krieges jetzt häufig auftretenden scharf umschriebenen Trommelfellrupturen nach starken Knalleinwirkungen sind vielleicht durch ähnliche abnorm starke Schwingungen des Trommelfelles veranlaßt, die schließlich sogar zur Zerreißung der am stärksten schwingenden Teile führen. Bemerkenswerter Weise findet man, daß die Risse im Trommelfell häufig an der gleichen Stelle auftreten²⁾, und man könnte sich denken, daß der Knall die Luft des äußeren Gehörganges in ähnlicher Weise, wie es im folgenden für die Resonatoren gezeigt werden kann, in Eigenschwingungen versetzt. Da nun die Fasern des Trommelfelles nach Fick³⁾, entsprechend ihrer verschiedenen Länge und Spannung, auf verschiedenen hohe Töne abgestimmt sind, kann man vermuten, daß diejenigen Fasern, deren Schwingungsperiode mit dem Eigenton des äußeren Gehörganges, der zwischen $c\ 4$ und $a\ 4$ liegt, in so starke Oszillationen geraten, daß gerade hier eine lokale Zerreißung erfolgt. Da aber die Dimension des äußeren Gehörganges, des Trommelfelles und der Paukenhöhle individuell nicht allzu verschieden sind, so wäre die Zerreißung an der gleichen Stelle nach Obigem gut zu verstehen. Daß die Resonanz so gewaltige Wirkungen hervorzubringen vermag, ist bekannt.

1) Bei den gebräuchlichen Metallresonatoren wurde nach der Funkenmethode (vgl. unten) der Eigenton bestimmt, einmal nach Überziehen der Schallöffnung mit einer Seifenmembran, einmal nach Zerstörung derselben. Es ergab sich, daß durch Überziehen der Schallöffnung mit der Seifenmembran der Eigenton bei den größeren Resonatoren um etwa einen halben, bei den kleineren um etwa einen ganzen Ton vertieft wurde.

2) Herr Prof. O. Wagener, Greifswald, machte mich im Kriegslazarett Douai gelegentlich auf diese Erscheinung aufmerksam, die durch obige Betrachtung eine Erklärung finden könnte.

Zusatz nach Korrektur: Nach einer soeben erhaltenen brieflichen Mitteilung von Hrn. Prof. Wagener sind Rupturen des Trommelfelles an gleichen Stellen sowohl bei derselben Person als auch bei verschiedenen Personen aber nach demselben Knall gesehen worden. Dagegen finde ich in der Mitteilung keine Bestätigung für meine obige nach Erinnerung gemachte Angabe, daß nach verschiedenen Knallen die gleichen Stellen des Trommelfelles betroffen würden.

3) A. Fick, Gesammelte Abhandl. 3. p. 505.

So schreibt Auerbach¹⁾: „Immerhin kann die Amplitude des resonierenden Systems größer werden als es das verträgt, und es kommt alsdann zu einer Katastrophe (Zerspringen von Gläsern, Platzen des Trommelfelles usw.)“.

Für gewisse Sprachversuche erschien es wichtig, festzustellen, ob beliebige Resonatoren, vor deren Öffnung eine solche kurzdauernde Knallschwingung erzeugt wird, ihre Eigenschwingungen geben. Zu diesem Zweck wurde der Kapselraum des Schallschreibers durch einen 7 cm langen Schlauch von 5 mm lichter Weite mit verschiedenen Resonatoren verbunden und vor denselben eine Entladung des Induktoriums herbeigeführt. Es ergab sich, daß alle von mir benutzten zylindrischen und kugelförmigen Metallresonatoren bei jedem Knall des Funkens ihren Eigenton lieferten, wovon man sich durch direktes Hören an den Resonatoren überzeugen konnte. Die wahrgenommenen kurzdauernden Töne entsprachen nun, wie die graphische Registrierung ergab, einer Reihe von Schwingungen, deren Amplituden vom Beginn an ziemlich rasch abnahmen. Es verhielt sich die Luft in den Resonatoren also ähnlich wie irgendeine elastisch gedämpfte Feder, die durch einen einzigen Stoß eine ähnliche Kurve geliefert hätte.

Von zwei beliebig herausgegriffenen Resonatoren, deren Schwingungszahlen, nach dem Gehör geschätzt, etwa bei 449 und 1096 lagen, sind die Kurven 20 u. 21, Taf. VII erhalten worden. In Fig. 20, dem Versuch mit dem größeren Resonator, wurde nach einer sehr steilen Anfangsschwingung — mit der Lupe erkennt man auf dem Original, daß das Eisenteilchen bis zum oberen Rand der Figur emporgeschleudert wurde — eine größere Zahl Eigenschwingungen des Resonators, deren Amplituden schnell abnahmen, erhalten. An der ersten Schwingung sind noch mit der Lupe am Original erkennbar, feinste Schwingungen vorhanden, wie sie in Fig. 19 dargestellt wurden. Die Schwingungszahl ergab nach der graphischen Registrierung 432 Schwingungen, während, wie erwähnt, nach dem Gehör der Eigenton zu 449 angenommen worden war.

Unter sonst gleichen Bedingungen sind in Fig. 21 die Schwingungen eines viel kleineren Resonators, der durch den Knall eines Funkens erregt wurde, registriert worden, und man sieht dementsprechend nach einer ebenfalls unregelmäßigen Anfangsschwingung eine Reihe sich rasch folgender Eigenschwingungen des Resonators, deren Schwingungszahl viel

1) F. Auerbach, Akustik. Winkelmanns Handb. d. Phys. 2. p. 124. 1909.

höher (bei 1124) liegt. Mit dem Gehör war, wie erwähnt, die Schwingungszahl 1096 angenommen worden.

Läßt man mehrere Resonatoren durch ein und denselben Funken gleichzeitig erklingen, so kann man am Schallschreiber Kurven erhalten, die Kombinationen der Schwingungen der beliebig gewählten, zueinander harmonischen oder unharmonischen Eigentöne der betreffenden Resonatoren darstellen. Eine solche Kombination ist in Fig. 22, Taf. VII wiedergegeben. Ein Resonator *a* von der Schwingungszahl 945 und der in Fig. 21 bereits verwendete Resonator *b* von der Schwingungszahl 1096 (1124), waren gleichzeitig durch Gummischlauch mit dem Schallschreiber verbunden. Am Anfangsteil der Kurve sieht man sehr deutlich auf die langsameren Schwingungen von *a*, die rascheren von *b* aufgesetzt. Da die Amplituden der Schwingungen des höheren Resonators *b* schneller abnehmen als die von *a*, so treten die Schwingungen von *a* in den späteren Perioden fast rein hervor. Durch den Versuch wurde gezeigt, daß es auf diese Weise möglich ist, die verschiedensten zusammengesetzten Schwingungen zu erhalten. Auch wird sich durch Veränderung in den Längen der beiden zuleitenden Schläuche bei harmonischen Schwingungen das Phasenverhältnis derselben abändern lassen.

Die oben beschriebenen Knallkurven stimmen also mit den Angaben jener Autoren überein, die den Knall als eine äußerst kurzdauernde Luftbewegung auffassen, die in der Hauptsache nur aus einer einzigen Schwingung besteht. Genauer würde man auf Grund der oben abgebildeten Kurven für die von mir benutzten Knalle sagen müssen, sie liefern Schwingungen mit so starkem Dekrement, daß bei geringer Intensität des Knalles und geringer Empfindlichkeit des Schallschreibers nur die erste bzw. die ersten zwei bis drei Schwingungen auf der Kurve sichtbar sind. Daß diese kurzen steilen Luftbewegungen jeden beliebigen Resonator erregen können, scheint bisher, wenn es auch mechanisch leicht verständlich ist (Schlag auf ein elastisches System), wenig beachtet worden zu sein. Nur bei Auerbach¹⁾ fand sich (p. 277) die Angabe: „Das Geräusch explodierender Knallgasblasen bringt z. B. immer eine ganze Serie von Saiten zum Mitschwingen, und

---

1) F. Auerbach, Akustik. Winkelmanns Handb. d. Phys. 2. p. 277. 1909.

zwar desto höhere, je kleiner die Blase war“. Streng genommen handelt es sich bei der von mir beschriebenen Erscheinung um ein kurzes Erklängen jedes beliebigen Resonators, nicht um eigentliche „Resonanz“, bei der die Schwingungen des Resonators zunächst anwachsen, sondern es nehmen, wie die Figg. 20 und 22 deutlich zeigen, die Amplituden der Resonatorschwingungen von *vornherein* ab. Die scheinbar zu starke Verkleinerung der Amplitude der zweiten und dritten Schwingung in Fig. 21 ist wohl nur darauf zu beziehen, daß sie mit der Knallschwingung interferiert.

Da die Luft in allen verwendeten Hohlräumen durch den Knall in Schwingung versetzt wurde, war zu erwarten, daß auch bei Annäherung des Ohres die Luft im äußeren Gehörgang ihren Eigenton, der bei c_4 — a_4 liegt, geben würde. In der Tat hört man (ich habe es an zwei musikalischen Personen nachgeprüft), wenn der Knall nahe dem Ohr erzeugt wird, einen hohen Ton, den beide auf nahezu d schätzten; doch waren sie nicht imstande, was ja mit am schwierigsten ist, die Oktave genauer anzugeben.

6. Die mit der Membran registrierten Vokalkurven.

Entsprechend der Schwingungszahl der Membran, die ja etwa bei 2000 liegt, ist zu erwarten, daß sie die Vokale a , o , u bei tiefer Stimmlage mit all ihren Einzelheiten wiederzugeben vermag; liegen doch, soweit bekannt ist, die bei jenen Lauten auftretenden Schwingungen weit unter jenem Wert. In Fig. 23, Taf. VIII ist ein sehr tief gesungenes „ a “ einer männlichen Stimme wiedergegeben. Bei so tiefen Tönen (die Schwingungszahl beträgt 95) sieht man oft, worauf schon Hermann hinwies (vgl. auch seine Kurvenbeispiele), sehr deutlich, daß zunächst bei Beginn jeder Stimmbandperiode raschere Schwingungen mit großer Amplitude einsetzen, daß dieselben aber mit starkem Dekrement behaftet sind und, noch ehe die neue Hauptperiode beginnt, völlig erlöschen. Solche Kurven sind, wie schon Hermann betont hat, ein guter Beweis dafür, daß die charakteristischen raschen Schwingungen (wir wollen sie der Kürze halber mit ihm als *Formantschwingungen* bezeichnen) keine höheren Teiltöne der von den Stimmbändern direkt erzeugten Grundschwingungen zu sein brauchen. Aus Gründen, deren Erörterung hier zu weit führen würde, lege ich bei der

Bestimmung der Schwingungsdauer der Formantschwingung der *a*-Kurve die erste große Schwingung *allein* zugrunde. Ihre Schwingungszahl beträgt in dem angeführten Beispiel 670, was mit der Formantlage für *a* nach Hermann (652—821) übereinstimmt.

Bei einem auf einem höheren Grundton gesungenen *a* ändert sich das Bild wesentlich, und es ist dann die ganze Stimmpériode von den besprochenen Formantschwingungen erfüllt. Ändert man die Tonhöhe, so bleibt, worauf ebenfalls schon Hermann hingewiesen hat, die Höhe der charakteristischen Schwingungen nahezu dieselbe. Es läßt sich dies an den Figg. 24, 25 u. 26, Taf. VIII sehr gut erkennen. Ein und dieselbe Altstimme hatte hier *a* auf einen Ton von 218, 268 und 372 Schwingungen gesungen. Während bei dem tiefsten Ton drei verschiedene Schwingungen und eine abortive Schwingung in jeder Stimmpériode sichtbar sind, treten bei dem mittleren Ton in jeder Stimmpériode drei und bei dem höchsten schließlich nur noch zwei *deutliche* Schwingungen auf. Mißt man hier wieder die erste Schwingung in der oben angegebenen Weise, so finden sich als Schwingungszahlen für die Formanten die Werte 913, 883 und 967. Der letzte Wert weist darauf hin, was auch nach meinen Erfahrungen im allgemeinen der Fall zu sein scheint, daß bei einem auf sehr hohem Ton gesungenen *a* die Formantschwingungen sich etwas erhöhen, wie es auch von anderen Autoren bemerkt wurde.

Ganz andere Kurvenformen geben die Vokale *o* und *u*, die in Figg. 27 u. 28, Taf. VIII von einer Männerstimme auf nahezu den gleichen Grundton 235 bzw. 239 gesungen wurden. Die Bilder stimmen ziemlich gut mit denen Hermanns¹⁾ überein, die er für dieselben, fast auf die gleiche Tonhöhe gesungenen Vokale (*c*₁ = 256 Schwingungen) abbildet. Bekanntlich sind *o* und *u* durch sehr tiefe Formanten bzw. durch Verstärkungsgebiete von Tönen niedriger Schwingungszahl ausgezeichnet. *o* würde nach Hermann²⁾ einen Formant von 576—640, *u* einen solchen von 512—576 Schwingungen besitzen. Pipping findet sogar für *o* ein Verstärkungsgebiet bei 384, für

---

1) L. Hermann, Pflügers Arch. f. Physiol. 47. Taf. X. Blatt 3 u. 5. 1890.

2) Die Werte sind der Tabelle aus Nagels Handb. d. Physiol. 4. p. 782. 1909 entnommen, wo sich die Resultate der verschiedenen Forscher zusammengestellt finden.

u bei 288—341 Schwingungen. Eine einfache Ausmessung der Länge der größeren (mit Tusche markierten) Teilschwingungen in Fig. 27 und 28 ergab ähnliche Werte, nämlich 406 bzw. 352 Schwingungen.

Während der Schallschreiber die bisher angeführten Vokale infolge seines hohen Eigentones genügend treu wiedergibt, ist von vornherein zu erwarten, daß er die Amplituden der Formanten des *e* und *i* nicht mehr in ihren richtigen Größenverhältnissen darstellt. Hat doch der Formant des *e* nach Hermann eine Schwingungszahl von 1953—2069, und der des *i* von 2323—3100.

In Fig. 29, Taf. VIII ist das auf den Grundton von 203 Schwingungen gesungene *e* einer Männerstimme wiedergegeben. Man sieht deutlich, daß während der *ganzen* Periode des Grundtones feine Zäckchen auftreten, und zwar fallen auf eine Periode des Grundtones 10, so daß ihre Schwingungszahl 2080 betragen würde. Da diese Formantschwingung im Gebiet des Grundtones der Membran liegt, so ist zu vermuten, daß die auffallende Größe der Formantschwingungen durch Resonanzwirkung mitbedingt ist. Außer den raschen Formantschwingungen ist, wie sehr häufig beim *e*, auch noch eine tiefere Schwingung im Klang mitenthalten, wie aus der Doppelgipflichkeit der Kurve hervorgeht. Sie ist auch bereits von Hermann bemerkt worden.

Ein von derselben Männerstimme auf den Grundton 185 gesungenes *i* ist in Fig. 30, Taf. VIII wiedergegeben. Auf den ersten Blick erscheint die Kurve hinsichtlich der Doppelgipflichkeit und dem Besatz mit feinen Zacken der Kurve des *e* sehr ähnlich. Bei genauerer Betrachtung erkennt man aber, daß die Zäckchen wesentlich näher beieinander liegen. Nach Auszählung kommen auf eine Grundtonperiode 14 Zacken, und das entspricht einer Schwingungszahl von 2590. Bei anderen Stimmen kann der *i*-Formant aber, soweit man sich hier auf die Membranregistrierung verlassen darf, noch wesentlich höher liegen. So zeigt Fig. 31 die Kurve eines *i*, das von einer anderen Männerstimme auf einen Ton von 242 Schwingungen gesungen, schätzungsweise ¹⁾ 16 Zacken auf eine Grundtonschwingung enthält. Die Schwingungszahl wäre demnach auf 3872 zu veranschlagen. Es ist das übrigens die einzige

1) Die Zacken folgen sich hier ziemlich unregelmäßig, so daß man an Interferenzen mehrerer Schwingungen denken muß.

Versuchsperson, in deren Stimmkurve sich beim *i* eine so hohe, 3000 wesentlich überschreitende Schwingungszahl für den Formanten ergab.

Zusammenfassung.

Bei dem von mir beschriebenen Schallschreiber werden die Luftschwingungen einer sehr kleinen, besonders geformten Seifenmembran zugeleitet, in deren Zentrum ein äußerst leichtes, magnetisch festgehaltenes Eisenstäubchen liegt. Die Membran führt ihre Schwingungen unter dem Objektiv eines Mikroskopes aus, wobei die Schwingungsebene des Eisenteilchens einen Winkel von 45° mit der Ebene des Objektisches bildet. Trotzdem wird, wie die beigegebenen Kurven zeigen, das Eisenteilchen auch bei ziemlich großen Exkursionen noch genügend scharf abgebildet. Nach den von O. Frank entwickelten Grundsätzen wurde versucht, die Konstanten der Membran zu bestimmen. Die Schwingungszahl derselben lag höher als bei den meisten anderen Schallschreibern: bei etwa 2000. Die Dämpfung der Membran war durch Anbringung einer sehr kleinen Luftkammer hinter derselben, wie eine Eichungskurve zeigte, bis zur Aperiodizität geführt worden. Auch die Empfindlichkeit wurde gemessen: um einen Millimeter Ausschlag bei 140facher Vergrößerung zu erzielen, war ein Wasserdruck von ca. 0,11 mm erforderlich. Die Empfindlichkeit war also, was bei der Kleinheit der Membran kaum zu vermeiden ist, ziemlich gering. Die Brauchbarkeit der Methode wurde durch eine Reihe Kurvenaufnahmen von Schallschwingungen erwiesen, die sich auf bekanntere physikalische und physiologische Vorgänge bezogen.¹⁾

Erklärung der Abbildungen auf Tafel VI—VIII.

Die Figuren sind sämtlich von rechts nach links zu lesen, mit Ausnahme von Fig. 14. Am Fuße der Figuren ist die Schwingung einer Zungenpfeife von 145 pro Sekunde mitverzeichnet. Bei mehreren Kurven gleicher Geschwindigkeit (Figg. 24 und 26) wurde die Zungenpfeifenschwingung nur an der unteren Kurve wiedergegeben.

Fig. 6. Eichung der Membran des Schallschreibers bei offener Kammer. Schwingungszahl 1975.

Fig. 7. Desgleichen nach Abschluß der Kammer. Die Membran zeigt beim Übergang in die Gleichgewichtslage nur feinste Zäckchen, deren Schwingungszahl etwa 6098 betragen würde.

1) Der beschriebene Schallschreiber wird von der mechanischen Werkstätte Schmittgall, Gießen, Neuenweg geliefert.

Fig. 8. Registrierung des Klanges zweier Stimmgabeln von 128 und 384 Schwingungen.

Fig. 9. Schwingung der tieferen Gabel allein registriert.

Fig. 10—12. Registrierung des Klanges einer offenen Orgelpfeife von 120 Schwingungen bei schwachem, mittelstarkem und starkem Anblasen.

Fig. 13. Schwebungen zweier Glaspfeifen. Die Schwingungszahl der höheren betrug 2694.

Fig. 14. Kurve des Konsonanten *r*. Grundton 135. Es folgen sich 13,5. plötzliche Intensitätssteigerungen pro Sek. (von links nach rechts zu lesen).

Fig. 15. Klang einer Galtonpfeife von 8555 Schwingungen. Die Originalkurve ist hier 5,3fach vergrößert.

Fig. 16. Knall beim Überspringen des Funkens einer kleinen Influenzmaschine. Funkenstrecke 1 cm. Der Funke war 7,5 cm von der Membran entfernt.

Fig. 17. Knall beim Überspringen des Funkens eines großen Induktoriums. Die Pole der sekundären Spirale sind mit zwei ganz kleinen Leydener Flaschen verbunden.

Fig. 18. Desgl.; aber bei Verbindung der Pole der sekundären Spirale mit zwei großen Leydener Flaschen. Größere Funkendistanz von 35 cm.

Fig. 19. Im Text p. 297. Heftiger Knall beim Überspringen des Funkens am Induktorium in 0,48 m Entfernung. Originalkurve, auf ca. das Dreifache vergrößert, läßt andeutungsweise sehr frequente Schwingungen von etwa 16000 erkennen. Da sich in kurzem Intervall zwei Funken folgten, sieht man zwei Reihen derartiger Schwingungen auftreten. Der Abstand der Schwingungen ist zur besseren Verdeutlichung am oberen Rand durch Tusche markiert.

Fig. 20. Schwingungen eines Resonators durch Knall eines Induktionsfunkens vor der Öffnung hervorgerufen. Schwingungszahl 432.

Fig. 21. Desgleichen bei kleinerem Resonator. Schwingungszahl 1124.

Fig. 22. Schwingungen zweier Resonatoren von 345 und 1124 Schwingungen gleichzeitig durch Funkenknall hervorgerufen. Man sieht, wie die Schwingungen des kleinen Resonators rascher gedämpft werden.

Fig. 23. *A* einer Männerstimme auf den Ton 95 gesungen. Die rasch gedämpfte „Teilschwingung“ hat die Schwingungszahl 670.

Fig. 24—26. Vokal *a* ein und derselben Altstimme auf den Grundton 218, 268 und 372 Schwingungen gesungen. Mit der Erhöhung des Grundtones nimmt die Zahl der Teilschwingungen jeder Periode ab. Ihre Länge bleibt, nach der ersten Schwingung gemessen, nahezu die gleiche.

Fig. 27. Vokal *o* von einer Männerstimme auf den Grundton 235 gesungen.

Fig. 28. Desgleichen Vokal *u* auf den Grundton 239 gesungen.

Fig. 29. Desgleichen Vokal *e* auf den Grundton 203 gesungen. Formant gleich 2030.

Fig. 30. Desgleichen Vokal *i* auf den Grundton 185 gesungen. Formant 2590. (Die Doppelgipfligkeit ist beim *i* durchaus nicht die Regel.)

Fig. 31. Vokal *i* von einer anderen Männerstimme auf den Grundton 242 gesungen. Schwingungszahl des Formanten ist auf 3872 zu veranschlagen.

(Eingegangen 23. Juli 1915.)

Fig. 6   a

Fig. 7   a

Fig. 18

Fig. 8

Fig. 16

Fig. 9

Fig. 17

Fig. 10

Fig. 11

Fig. 12

Fig. 19

Fig. 13

Fig. 14

Fig. 15

Fig. 20

Fig. 21

Fig. 22

Fig. 27

Fig. 28

Fig. 29

Fig. 30

Fig. 23

Fig. 24

Fig. 25

Fig. 26

Fig. 31