

(Aus dem Physiologischen Institute der Universität in Wien.)

## Beitrag zur Resonanztheorie der Tonempfindungen.

Von

Prof. SIGM. EXNER und Privdoc. JOS. POLLAK.

E. MACH sagt in seiner Analyse der Empfindungen:<sup>1</sup> „HELMHOLTZ' Arbeit, welche bei ihrem Auftreten zunächst allgemeiner Bewunderung begegnete, erfuhr in späteren Jahren vielfache kritische Angriffe, und es scheint fast, als ob die anfängliche Überschätzung dem Gegenteile gewichen wäre.“ Während MACH selbst an der Grundlage dieser Theorie, nämlich dem Satze, daß die Tonempfindungen durch ein aus Resonatoren gebildetes Sinnesorgan vermittelt werden, festhält, haben andere die Theorie verworfen, weil sich auf Grund derselben noch nicht alle Erfahrungstatsachen unserer Tonwahrnehmungen genügend ableiten lassen. Sowie E. MACH sind auch andere Forscher, und gerade jene, die sich am eingehendsten und erfolgreichsten mit der physiologischen und physikalischen Seite der Theorie beschäftigt haben, wie L. HERMANN und V. HENSEN, der Anschauung, daß, wenn auch manche Frage noch ungeklärt ist, die Resonanztheorie nicht fallen zu lassen sei.

Bei den Meinungsverschiedenheiten über den Wert der genannten Theorie, welche nun aber bestehen, mag es gerechtfertigt erscheinen, wenn wir im folgenden einige Versuche anführen, die, in ihrem Wesen identisch, darauf ausgehen, zu prüfen ob die dem Hören eines Tones zu grunde liegenden mechanischen Vorgänge jene Charaktere enthalten, welche den physikalischen Erscheinungen des Mitschwingens eigentümlich

---

<sup>1</sup> 4. Auflage. Jena 1902. S. 209.

sind. Sie verfolgen also dasselbe Ziel, das den kürzlich von HENSEN<sup>1</sup> publizierten Versuchen anderer Art vorschwebte.

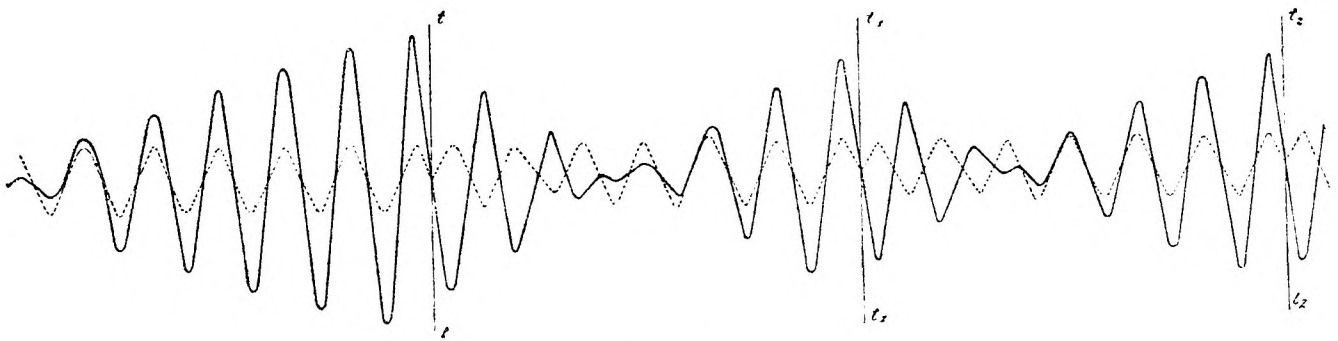


Fig. 1.

Der uns bei den Experimenten leitende Gedanke ist der folgende: Es sei in Fig. 1 die punktierte Linie ein Schallwellenzug von gegebener Tonhöhe  $n$  und gegebener Intensität im physikalischen Sinne des Wortes. Im Zeitpunkte  $t$  trete eine Verschiebung der Phase um eine halbe Wellenlänge ein, so daß auf einen Wellenberg sofort ein zweiter Wellenberg komme, unter Ausfall der Zeit, die sonst das inzwischen liegende Wellental eingenommen hätte. Solche Verschiebungen um je eine halbe Wellenlänge mögen periodisch wiederkehren ( $t_1$   $t_2$ ). Physikalisch betrachtet wirkt dann dauernd ein Schallwellenzug von der Schwingungszahl  $n$ , und würden wir etwa die gesamte Energie bestimmen wollen, welche während der Zeiteinheit in dem Schallwellenzug enthalten ist, so wäre die Energie einer Welle mit  $n$  zu multiplizieren. Wirkt aber ein solcher mit Phasenverschiebungen versehener Wellenzug auf einen für den Ton  $n$  abgestimmten Resonator, so muß er Wirkungen von periodischem Wechsel der Intensität hervorrufen. Der Resonator wird in Schwingungen geraten, welche näherungsweise durch die ausgezogene Linie der Fig. 1 wiedergegeben sind.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich, daß, falls das Hören durch Resonatoren vermittelt wird, der geschilderte Wellenzug im allgemeinen eine diskontinuierliche Empfindung des gegebenen Tones erzeugen wird, so daß wir den Eindruck von Stößen des Tones  $n$  haben werden. Es wird ferner, bei Erhaltung des Tones  $n$  aber Vermehrungen der Phasenverschiebungen in der Zeiteinheit, die Intensität des gehörten Tones abnehmen, so daß er unter Umständen schließlich ganz verschwinden kann, weil

<sup>1</sup> Das Verhalten des Resonanzapparates im menschlichen Ohre. *Sitz.-Berichte d. kgl. preuß. Akad. d. Wiss.*, Sitzung v. 24. Juli 1902.

die Elongationen der Schwingungen des Resonators unter der Schwelle bleiben, bei der sie eine merkbare Nervenerrregung hervorrufen (vergl. Fig. 2, in welcher die Wellen grösster Elon-

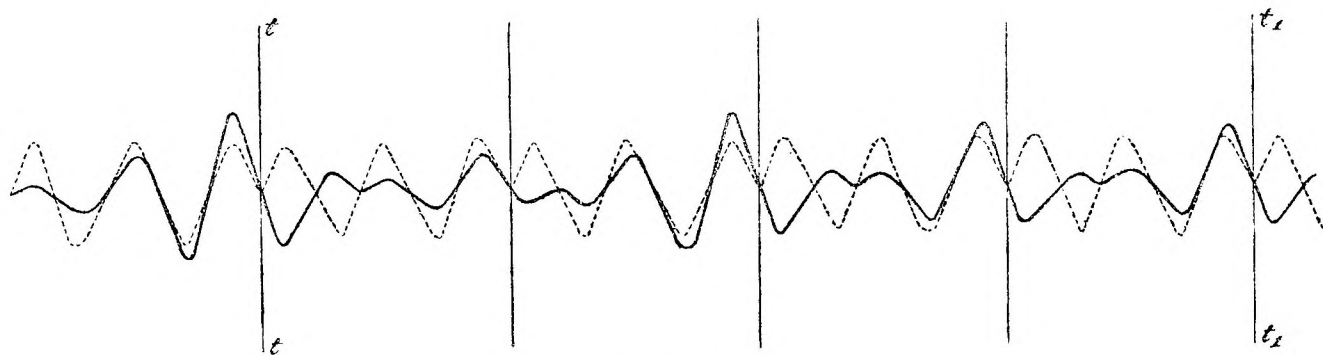


Fig. 2.

gation der ausgezogenen Linie den Schwellenwert der Nervenerrregung noch nicht erreicht haben sollen); endlich wird der gegebene Tonwellenzug wieder hörbar werden, wenn man bei gleichbleibenden Phasenverschiebungen die physikalische Intensität der einzelnen Tonwellen genügend steigert. Es werden dann die tatsächlich auftretenden Mitschwingungen Elongationen haben, welche den Schwellenwert für die Gehörsempfindung überschreiten. (S. Fig. 3, in welcher die Wellen grösster Elon-

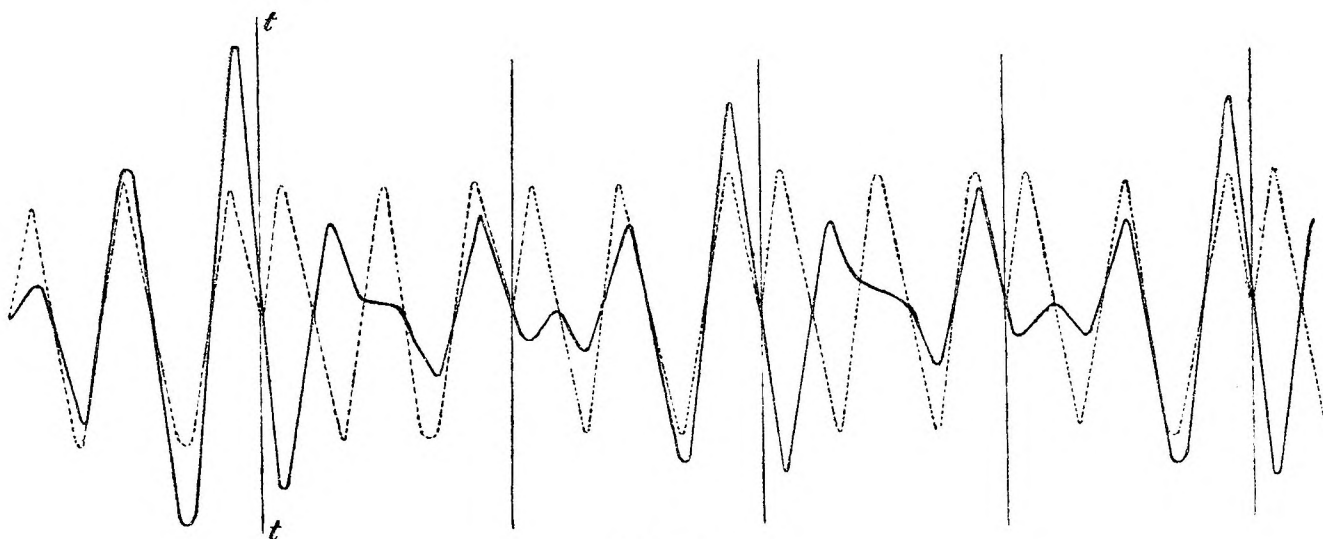


Fig. 3.

gation der ausgezogenen Linie den Schwellenwert der Nervenerrregung überschritten haben sollen.)<sup>1</sup>

Dabei ist es nicht ein Postulat des Versuches, daß das Ausfallen der halben Wellenlänge, wie in den Fig. 1—3 der Einfachheit wegen vorausgesetzt ist, in Intervallen erfolgt, welche einer ganzen Zahl halber Wellenlängen gleich sind; es handelt

<sup>1</sup> Selbstverständlich können auch Fig. 2 und 3 die Schwingungen des Resonators nur näherungsweise versinnlichen.



sich vielmehr überhaupt nur um den in regelmässigen Intervallen erfolgenden Ausfall der halben Wellenlänge; ebenso ist es nicht unbedingtes Erfordernis, daß zwischen zwei Gruppen von Schallwellen, die um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben sind, keine Zeit liegt; notwendig ist vielmehr nur, daß die Wellen der zweiten Gruppe genau in jenem Zeitmomente ihren Wellenberg haben, in welchem die Wellen der ersten Gruppe, wenn die Phasenverschiebung nicht eingetreten wäre, ihr Wellental bilden würden.

Es mußte fraglich erscheinen, ob der angedeutete Weg, die Resonanztheorie des Ohres zu prüfen, auch gangbar sei, denn J. STEFAN<sup>1</sup> hat schon vor vielen Jahren bei seinen physikalischen Studien über die Töne, welche rotierende und zugleich schwingende Platten geben, einen Lehrsatz gefunden, der den Erfolg zweifelhaft gestaltete. Wenn man nämlich sein Ohr nahe über einen Quadranten einer in vier Abteilungen schwingenden Platte hält, und setzt diese um eine in ihrem Mittelpunkt senkrecht errichtete Achse in Rotation, so hört man den Ton bei einer Umdrehung viermal anschwellen und abschwellen; steigert man aber die Umdrehungsgeschwindigkeit über ein gewisses Maß, so tritt folgende Erscheinung ein: „Der Ton, den die Platte ursprünglich gab, verschwindet, und an seine Stelle treten zwei, von denen einer höher, der andere tiefer ist, als der primäre Ton.“ Ist die Schwingungszahl des Tones der ruhenden Platte  $n$ , die Anzahl der Schwebungen, welche durch die Rotation entstehen  $n'$  so sind die Schwingungszahlen der beiden wahrgenommenen Töne  $n + n'$  und  $n - n'$ .

STEFAN hat diesen Versuch in verschiedener Weise variiert, und die folgende mathematische Erläuterung zu demselben gegeben. Ein Ton von konstanter Intensität erzeugt in einem anderen Körper eine Bewegung die durch die bekannte Formel ausgedrückt wird

$$a \sin 2 \pi n (t + \vartheta),$$

worin  $n$  die Schwingungszahl des Tones,  $t$  eine beliebige,  $\vartheta$  eine konstante Zeitdauer, und  $a$  die Amplitude der Tonwellen bedeutet.

---

<sup>1</sup> *Sitzungsber. d. Wiener Akad. Wiss.* 1866, 53, Abt. 2.



Wenn  $a$  aber selbst mit der Zeit  $t$  periodisch variiert, so kann dies ausgedrückt werden durch

$$a = \alpha \sin 2\pi n' (t + \vartheta'),$$

worin  $n'$  die Anzahl der in die Zeiteinheit fallenden Schwebungen bedeutet. Setzt man diesen Ausdruck von  $a$  in die erste Gleichung ein und transformiert das Produkt der beiden Sinus, so erhält man

$$\frac{\alpha}{2} \cos 2\pi (n - n') (t - \vartheta_1) - \frac{\alpha}{2} \cos 2\pi (n + n') (t + \vartheta_2).$$

Diese beiden Ausdrücke bedeuten aber selbst wieder zwei pendelartige Bewegungen, also zwei Töne, deren erster die Schwingungszahl  $n - n'$  deren zweiter die Schwingungszahl  $n + n'$  besitzt. Dafs man diese tatsächlich hört, hat STEFAN nachgewiesen.

Trotzdem haben wir die Versuche ausgeführt, von der Idee geleitet, dafs man die Frequenz der Intervalle vielleicht nicht bis zum Verschwinden des Tones  $n$  steigern müsse, da die STEFANSche Spaltung des Tones erst bei einer ansehnlichen Gröfse der Zahl  $n'$  bemerkbar werden kann, und dafs vielleicht vorher das von uns erwartete Phänomen auftrete. Es liegt nämlich auf der Hand, dafs die Frequenz, bei welcher es wahrnehmbar wird, mit von dem Dämpfungsgrad der resonierenden Gebilde im Ohre abhängig ist; über denselben haben wir aber vorläufig nur Schätzungen.<sup>1</sup>

Die Mittel, die wir anwendeten, die geforderte Phasenverschiebung eines Tonwellenzuges zu erreichen, sind dreierlei.

Bei der ersten Versuchsanordnung wurde eine elektromagnetische Stimmgabel um ihre Achse gedreht. Es ist bekannt, dafs bei der tönenden Stimmgabel in der Zeit, in welcher von den Außenseiten ihrer Zinken Verdichtungswellen ausgehen, von dem Spatium zwischen den Zinken Verdünnungswellen ihren Ursprung nehmen. Die beiden, somit um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschobenen, Wellenzüge schreiten in ihrem intensivsten Anteile senkrecht aufeinander und auf die Achse der Stimmgabel fort, so dafs eine solche, vor das Ohr gehalten und gedreht, wie die erwähnten schwingenden Platten STEFANS,

<sup>1</sup> Vgl. HELMHOLTZ: Tonempfindungen. Braunschweig 1877. S. 234.

während einer Umdrehung viermal laut gehört wird, durch vier Wellenzüge, von denen jeder gegen den vorhergehenden um eine halbe Wellenlänge verschoben ist.

Bei der zweiten Versuchsanordnung benutzten wir ein Telephon, das mittelst eines entfernten Aufnahmetelephons und einer entsprechenden Schallquelle einen Ton hören liefs. Zwischen beiden Telephonen war ein Kommutator eingeschaltet, der in gleichmäßige Rotation versetzt, die Stromesrichtung periodisch umkehrte. Bei der dritten Versuchsanordnung leiteten wir zwei um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschobene Tonwellenzüge dem Ohre durch Schläuche zu, in deren Verlauf ein rotierender Hahn so eingeschaltet war, dafs die Wellenzüge abwechselnd das Ohr trafen.

Die oben genannten Versuche HENSENS benützen auch die Phasenverschiebung des einwirkenden Schallwellenzuges, doch sind hier allmählich eintretende Verschiebungen durch kontinuierliche Änderung der Tonhöhe des Schalles benützt.

Nach dieser allgemeinen Orientierung gehen wir nunmehr zur Schilderung unserer Versuche, und ihrer Ergebnisse sowie zur Besprechung der einschlägigen Literatur über.

### Stimmgabelversuche.

Zunächst sei hervorgehoben, dafs der von uns angestellte Versuch mit der gedrehten Stimmgabel, wie wir uns nachträglich überzeugten, nicht weniger als 78 Jahre alt ist.

Die Brüder WEBER<sup>1</sup> sagen in ihrer Wellenlehre (1825) S. 110: „Wenn man eine Stimmgabel so in eine Drechselbank einspannt, dafs die Stimmgabel um die Längachse ihres Stiels gedreht werden kann, so bemerkt man, dafs die tönende Stimmgabel aufhört zu tönen, wenn ihre Umdrehungen eine gewisse Geschwindigkeit erreicht haben, aber der Ton wieder wahrnehmbar wird, wenn man das Rad der Drechselbank plötzlich anhält. Es ist dieses nicht so zu erklären, dafs das Geräusch der Drechselbank die Stimmgabel übertäube, denn auch dann, wenn man die Öffnung einer cylinderförmigen Röhre in die Nähe der Zinken hält, und an die andere Öffnung der Röhre das Rohr bringt,

---

<sup>1</sup> Wellenlehre etc., angezeigt mit einigen Bemerkungen von E. F. J. CHLADNI. *Arch. f. d. ges. Naturlehre*, herausgeg. von Dr. K. W. KASTNER, 7. Nürnberg 1826.

überzeugt man sich davon, daß die Umdrehung zwar nicht die Schwingung der Gabel aufhebt, aber die Mitteilung derselben an die Luft hindert. Wir können von dieser merkwürdigen Erscheinung noch keine Erklärung geben.“

CHLADNI<sup>1</sup> bemerkt in seiner Besprechung der Wellenlehre der Brüder WEBER zu diesem Punkte folgendes:

„Es scheint mir, daß die Luftwellen hierbei mehr einen kreisförmigen Gang nehmen und einen Wirbel bilden, als nach außen verbreitet werden.

Schon früher hatte W. BEETZ<sup>2</sup> den Versuch WEBERS wiederholt, war aber zu einer ganz anderen Wahrnehmung gelangt, worüber er der physikalischen Gesellschaft zu Berlin Bericht erstattete.

Er hörte nämlich niemals, daß der Ton der Stimmgabel verschwand, sondern nur, daß er geschwächt wurde, und daneben hörte er deutlich einen höheren Ton und eine Reihe von Stößen, deren Zahl mit der Anzahl der halben Umdrehungen der Stimmgabel zusammenfiel.

Eine genügende Erklärung dieser Erscheinung zu geben, gelang auch ihm nicht.

Angeregt durch gewisse Versuche R. KÖNIGS nahm BEETZ später die Experimente wieder auf. Er benutzte eine  $c_1$ -Stimmgabel (512 Schwingungen) und eine  $c_2$ -Gabel (1024 Schwingungen), erstere mit 155 mm, letztere mit 100 mm langen Zinken.

Wurden diese Gabeln, in der Drehbank befestigt, zum Tönen gebracht, und dann um ihre Achse mit der Geschwindigkeit von etwa 12 Umdrehungen in der Sekunde gedreht, so erhöhte sich der Ton  $c_1$  um etwa  $\frac{3}{4}$  und  $c_2$  um etwas über  $\frac{1}{2}$  Ton; daneben wurden die früher erwähnten Schwebungen, zwei bei jeder Umdrehung gehört. — Da man aber sowohl die Tonerhöhung als die Schwebungen ebenso gut, ja besser hört, wenn man den Kopf mit verstopften Ohren an die Drehbank anstemmt, so meinte BEETZ, daß diese Erscheinung mit der Mitteilung des Schalles an die Luft, und mit der Fortpflanzung desselben durch die Luft gar nichts zu schaffen habe.

Im weiteren Verlaufe seiner Untersuchungen beobachtete er, daß man auch tiefere Töne deutlich höre.

<sup>1</sup> Über die Töne rotierender Stimmgabeln. *Poggendorfs Annalen* 8, S. 498. 1866.

<sup>2</sup> *Fortschritte der Physik* 8 u. 9. 1850—1851.



Da er diese Beobachtung durch nichts anderes, als durch eine Tonveränderung bei der Fortpflanzung der Welle durch die Luft zu erklären wufste, wurde es ihm unwahrscheinlich, daß zwei verschiedene Gründe für die Veränderung des Gabeltones gleichzeitig vorhanden sein sollten, und er wiederholte deshalb alle seine früheren Versuche. Um die vielen Töne, welche gleichzeitig von einer rotierenden Stimmgabel ausgehen, unterscheiden zu können, mußte er für jede Gabel eine große Reihe von Resonatoren verwenden, deren Grundtöne um kleine Intervalle verschieden waren. Er modifizierte später diese Versuche, dachte zu ihrer Erklärung an das DOPPLERSche Prinzip, und schloß sich, da er auch von dieser Deutung nicht befriedigt war, schließlic<sup>1</sup> den unterdessen veröffentlichten Anschauungen von RADAU und STEFAN an. RADAU<sup>2</sup> hatte, ohne selbst solche Experimente gemacht zu haben, berechnet, daß der Ton einer rotierenden Klangplatte unter gewissen Bedingungen sich in einen höheren und einen tieferen spalten müsse, während STEFAN, ohne damals die Arbeiten von WEBER, BEETZ und RADAU zu kennen, die oben erwähnten Versuche mit rotierenden Klangplatten angestellt hatte, und zu dem von RADAU berechneten Resultate gekommen ist. Er beobachtete auch, daß eine gedrehte Stimmgabel wesentlich dieselben Erscheinungen bietet, wie die gedrehte Platte.

In einem „Nachtrag“ zu dem Aufsatz: Über einen akustischen Versuch<sup>3</sup> anerkennt STEFAN die Priorität der Versuche WEBERS und BEETZS, sowie der Berechnungen RADAUS und teilt weitere Versuche mit, die seine früher gemachten Angaben bekräftigen. Er benutzte bei diesen Experimenten zwei Stimmgabeln mit 256, zwei mit 430, und eine mit 860 Schwingungen in der Sekunde. Der Fall, daß eine rotierende Stimmgabel keinen Ton vernehmen ließ, ist STEFAN auch vorgekommen. Es war eine große Stimmgabel von KÖNIG mit 64 v. d. Es war jedoch nach STEFAN der Ton der ruhenden Stimmgabel schon so schwach, daß, wie er meinte, dadurch das Erlöschen erklärbar wurde. —

---

<sup>1</sup> Über den Einfluß der Bewegung der Tonquelle auf die Tonhöhe *Poggendorfs Ann.* 130, S. 587.

<sup>2</sup> *Moniteur scientifique* 1865, S. 136.

<sup>3</sup> *Sitzungsber. der Wiener Akad. d. Wiss.* 54, II. 1866.

Die eigenen ersten Versuche, die einer von uns (P.) mit rotierenden Stimmgabeln anstellte, und bei denen er sich von anderen, als den hier vorgeführten Gesichtspunkten leiten liefs, wurden in derselben Anordnung angestellt, wie sie WEBER, BEETZ und STEFAN getroffen hatten, ohne dafs er von den Arbeiten dieser Forscher Kenntnis hatte. Die Stimmgabeln (eine  $b^2$ -Gabel von KÖNIG, und eine Reihe EDELMANNscher Stimmgabeln von  $c$  bis  $c^2$ ) wurden in der Drechselbank wohl centriert eingespannt, zum Tönen gebracht und rotiert. Bei einigen Stimmgabeln der tieferen Lage gewannen verschiedene Personen wohl den Eindruck, dafs bei einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit der Ton ausgelöscht würde, doch wurde es bald klar, dafs diese Versuchsanordnung den vorliegenden Zwecken nicht genüge, einerseits weil, wie BEETZ schon richtig bemerkte, es bei einem derart angestellten Versuche nicht zu vermeiden ist, dafs die Drechselbank in Mitschwingungen gerät, andererseits, weil das verhältnismäfsig rasche Abschwngen der durch Anschlagen oder Streichen zum Tönen gebrachten Stimmgabel eine genaue Bestimmung der Bedingungen, unter denen der Stimmgabelton aufhört, vom Ohre perzipiert zu werden, nahezu unmöglich macht. —

Der Versuch, die in geeigneter Weise zwischen straffgespannten Kautschukschläuchen befestigte Stimmgabel gleichzeitig zum Schwingen und Rotieren um ihre Achse zu bringen, mißglückte, da bei dieser Anordnung ein genügend rasches Rotieren der Stimmgabel nicht möglich war. Wir konstruierten somit eine elektrisch getriebene Stimmgabel, die mit variierbarer Geschwindigkeit um ihre Längsachse gedreht werden konnte.

### Beschreibung der rotierenden Stimmgabel.

In einem Spitzenlager  $ZZ$  der Fig. 4, das selbst an einem in der Zeichnung weggelassenen Eisenrahmen befestigt ist, wurde die mit der Achse ( $aa$ ) fix verbundene Stimmgabel angebracht. Die Zinken derselben sind 17 cm lang, 14 mm breit und 8 mm dick. Der innere Abstand der Zinken beträgt 27 mm.

Die Achse hat eine Dicke von 12 mm, so dafs die Stimmgabel schwingen kann, ohne dieselbe auch bei ihrer grössten Amplitude zu berühren.

Der Ton der Stimmgabel ist  $h (si^2) = 240$  v. d.

Durch verschieden schwere Klemmen kann der Ton auf  $g (sol_2) = 192$  v. d. und  $e (mi_2) = 160$  v. d. vertieft werden. Um die

Stimmgabel elektrisch zu erregen und während der Rotation in gleichmäßiger Schwingung zu erhalten, sind zu beiden Seiten der Zinken zwei Elektromagnete ( $EE$ ) mit Hilfe eines Ringes (in der Zeichnung weggelassen) an der Achse befestigt. Das eine Ende der Achse trägt die Schnurscheibe ( $G$ ) und, isoliert, den Schleifring  $H$ , auf dem die im Eisenrahmen ebenfalls isoliert befestigte Bürste  $J$  gleitet. — An dem andern Ende der Achse ist isoliert der Ring  $F$  montiert.

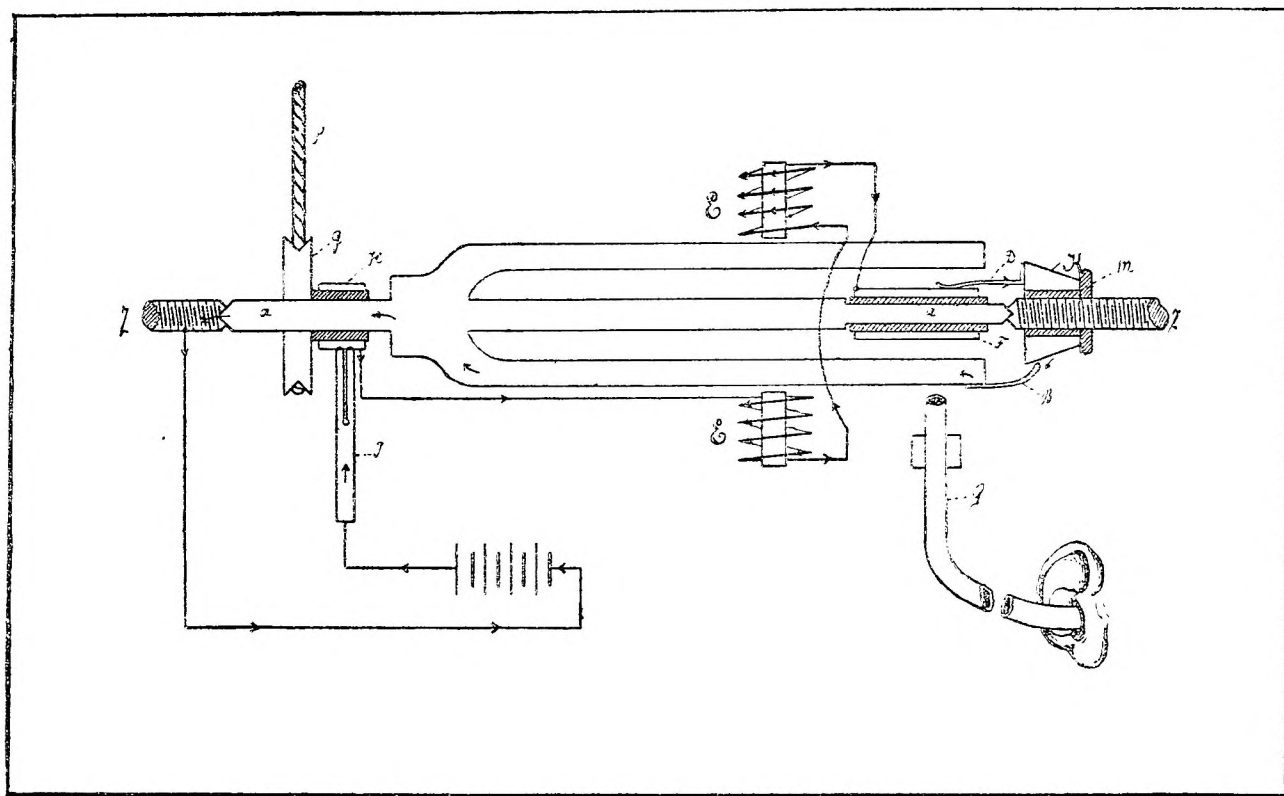


Fig. 4.

Die Achsenschraube  $Z$  trägt die Mutter  $M$ , auf der durch Hartgummi isoliert ein Metallkonus  $K$  befestigt ist. Mit letzterem ist eine federnde Bürste ( $D$ ) verbunden, welche auf dem Ringe  $F$  bei der Rotation kontinuierlich gleitet. An einer Zinke ist eine Feder  $B$  angeschraubt, die beim Schwingen nach innen mit dem ruhig stehenden Konus ( $K$ ) in Berührung kommt. Da die Zinken während der Rotation infolge der Centrifugalkraft auseinander weichen und eine andere Nulllage einnehmen, ist es nötig, während die Stimmgabel sich dreht, durch Schrauben den Konus zu verstellen, damit der periodische Kontakt der Feder  $B$  mit dem Konus erhalten bleibe. Der Antrieb seitens eines Elektromotors erfolgt durch eine Kegelvorrichtung (Fig. 5  $K$ ) auf die Schnurscheibe  $G$ , und zwar kann durch die genannte Vorrichtung die Tourenzahl der Stimmgabel innerhalb weiter Grenzen variiert werden.



Der Stromverlauf ist folgender: Bei der Schleifbürste  $J$  tritt der Strom ein, gelangt in den Ring  $H$ , von da zu den Elektromagneten, welche letztere so gewickelt sind, daß jeweilig der eine einen Nord- der andere einen Südpol der Gabel zuwendet, aus diesen in den Schleifring  $F$ , durch die Feder  $D$  zum Konus  $K$ , und bei jedesmaliger Berührung desselben mit der Feder  $B$  durch die Zinke und die Achse zur Stromquelle zurück.

Dieser Apparat wurde mittels am Rahmen angebrachter Schnüre zwischen den Pfosten einer Türe befestigt, und dadurch das Mittönen fester Körper auf ein Minimum reduziert. — Um den Ton der gedrehten schwingenden Stimmgabel frei von Nebengeräuschen zu beobachten, wurde das Ende eines 12 m langen Gummischlauches ( $G$ ), dessen innere lichte Weite 5 mm betrug, an einem Stativ befestigt, und in einer Entfernung von einigen Centimetern (in der Regel betrug die Entfernung desselben von der Zinke, wenn diese bei ihrer Rotation das Maximum der Annäherung erreicht hatte, 3 cm) senkrecht auf die Längsachse der Stimmgabel aufgestellt. In das andere Ende des Schlauches wurde ein gabelförmig geteiltes Hörrohr eingefügt, welches binaurales Beobachten ermöglicht. Der Beobachter war in einem anderen Zimmer, in dem das Tönen der Stimmgabel mit unbewaffneten Ohren nicht gehört werden konnte. Bei einem Teile der Versuche wurde auch ein Gasrohr, das in ein anderes Stockwerk führte, zur Leitung des Tones eingeschaltet.

### Versuchsreihe I.

Die Herren, welche so freundlich waren, die Versuche mit uns zu machen und unsere Beobachtungen zu kontrollieren, waren durchaus normalhörend, einige mit absolutem Tongehör (Prof. T., Musiker S., Kapellmeister R., Dr. E. Sp.), die meisten ausgezeichnet musikalisch. Wir verfahren so, daß zunächst eine Weile der Ton der Stimmgabel ohne Drehung derselben beobachtet wurde, dann setzten wir den Motor in Bewegung, und steigerten die Geschwindigkeit durch Verschieben der Kegelvorrichtung allmählich und langsam.

Dabei beobachtet die Versuchsperson erst langsam aufeinanderfolgende Unterbrechungen des Tones, deren Frequenz allmählich steigt, so daß der Eindruck von Schwebungen entsteht, die anfangs noch den Charakter des Tones erkennen lassen, später aber diesen verlieren und zu einem schwirrenden Geräusch

werden. Die Person hat die Aufgabe, im Momente, wo der Toncharakter schwindet, ein Signal zu geben, infolgedessen der betreffende Assistent die Steigerung der Tourenzahl einstellt, so daß hierauf die Zählung derselben vorgenommen werden kann.

Bei Verwendung der tiefer gestimmten Stimmgabel machte sich störend bemerkbar, daß der Ton der Stimmgabel nie vollkommen verschwand. Es rührt dies augenscheinlich daher, daß durch die Schnüre, mittels welcher der Rahmen der Stimmgabel an den Türpfosten befestigt ist, diese Holzmassen in Mitschwingungen versetzt werden, so, daß auch diese kontinuierlichen Tonwellen in den Schlauch eindringen. Immerhin ist es auch da möglich, ziemlich gut stimmende Resultate zu erhalten, wenn man seine Aufmerksamkeit nur den Stößen zuwendet, und darauf achtet, ob diese den Toncharakter noch haben.

Die Beobachter mit feinem musikalischem Gehör bemerkten eine Erhöhung des Stimmgabeltones bei Steigerung der Umdrehungen, und das Auftreten eines tiefen Geräusches (Kapellmeister R., Dr. B., Dr. H.). Wir heben diese Tatsache hervor, die mit den Angaben von BEETZ und STEFAN übereinstimmt, bemerken aber zugleich, daß wir die genaue Bestimmung der Tonhöhe des hinzutretenden akustischen Eindruckes nicht vorgenommen haben, da die Kontrolle jener Beobachtungen nicht im Plane unserer Untersuchungen lag.

Man konnte daran denken, daß das schwirrende Geräusch, welches bei rascher Rotation der Stimmgabel übrig bleibt, nachdem der Toncharakter der Schwebungen verloren gegangen ist, von dem Vorbeistreichen der Zinken am Schlauche herrührt. Dies ist aber nicht so, denn es verschwindet, wenn man durch Unterbrechung des Stromes die Schwingungen sistiert, die Rotation der Stimmgabel aber fortsetzt, und taucht wieder auf, sobald man den Stromkreis wieder schließt.<sup>1</sup> Es ist also ein Geräusch, das zwar durch die Schwingungen der Stimmgabel bedingt ist; diese Schwingungen regen aber den akustischen Apparat des Ohres nicht zur eigentlichen Tonempfindung an.

Wird die Rotation der sich so schnell drehenden Gabel nun wieder allmählich verringert, dann taucht in dem Geräusche

---

<sup>1</sup> Die rotierende Stimmgabel beginnt nämlich beim Stromschluß zu schwingen, ohne besonders angeschlagen zu werden.

vorerst wieder ein Ton auf, und man kann nun in umgekehrter Reihenfolge dieselben Erscheinungen beobachten, wie vorher.

Wir halten es für überflüssig, die Protokolle über die einzelnen Versuche mitzuteilen, beschränken uns vielmehr auf die kurze Beschreibung der Resultate.

Die Zahl der Umdrehungen, bei welchen der Ton  $h = 240$  v. d. verschwand, wenn das Schlauchende sich in einer Entfernung von 3 cm von der Stimmgabel und der Beobachter an einem bestimmten Orte eines anderen Stockwerkes befand, betrug bei den Beobachtern E. u. K. durchschnittlich 6 pro Sekunde. Sowohl die Einzelversuche desselben Individuums, wie auch die Versuche verschiedener Individuen, wenn sie sich einmal für die Beobachtungen eingeübt hatten, zeigten Abweichungen von nur wenigen Prozenten.

Wurde dann durch Anbringen von Klemmen der Ton der Stimmgabel auf  $g = 192$  Schwingungen pro Sekunde vertieft, so war für E. die Grenze schon bei 4 Umdrehungen, für K. bei 4,5 Umdrehungen erreicht, und nach Herabstimmung der Gabel auf  $e = 160$  v. d., für E. bei 3,3, für K. bei 3,5 Umdrehungen pro Sekunde.

Trotz der hier vorgeführten mit den Erfahrungen anderer Autoren stimmenden Resultate hat uns diese Versuchsanordnung nicht befriedigt. Man empfindet stets eine gewisse Unsicherheit darüber, ob der Toncharakter der wahrgenommenen einzelnen Stöße schon verschwunden ist, oder nicht. Der Grund davon liegt, wie schon erwähnt, darin, daß der Ton erstens, wenn auch nur wenig und allmählich, ansteigt, zweitens aber, daß er doch kaum gänzlich verschwindet, wegen des Mittönens der gesamten Aufhängevorrichtung der Stimmgabel. Dies wird augenscheinlich teilweise durch die Schnüre vermittelt, welche die hölzerne Türstockverkleidung in Vibration versetzten, den Saiten vergleichbar, die den Resonanzboden eines Instrumentes beeinflussen, teilweise aber auch durch direkte Luftübertragung. Letzteres schlossen wir aus dem Umstande, daß man, das Ohr an die Türverkleidung legend, auch die Schwebungen hört, und zwar in einer Frequenz, welche der Rotationsgeschwindigkeit der Stimmgabel entspricht.

Unsere Bedenken waren so groß, daß wir diese Versuche nicht publiziert hätten, wenn ihre Resultate nicht ihre Bestätigung durch die weiteren Versuchsreihen, bei welchen jener Mangel nicht vorhanden ist, erhalten hätten, und wenn nicht für die



Prüfung der Resonanztheorie, die auch an der Stimmgabel mit voller Sicherheit festzustellende außerordentliche Abschwächung der Tonstärke während der Rotation von demselben Gewichte wäre, wie das gänzliche Unmerklichwerden des Tones. Freilich müßte wegen der in den Diagonalen der Zinken ausgehenden Interferenzstrecken bei der Rotation eine Schwächung des Tones auch dann eintreten, wenn die Phasenverschiebung keinen Einfluß hätte, aber sie könnte kaum so bedeutend sein.

### Telephonversuch.

Das SIEMENSSche Telephon enthält bekanntermaßen einen kräftigen Hufeisenmagneten, dessen Pole Drahtwickelungen tragen, und der durch die Sprache in Vibration gesetzten Eisenplatte gegenüberstehen. Nähert sich diese letztere infolge der Einwirkung einer Schallwelle den Polen, so entsteht in dieser Wickelung ein Strom von der Richtung  $a$ , entfernt sie sich, so entsteht ein entgegengesetzter Strom von der Richtung  $-a$ . Diese Ströme zu dem zweiten Telephon geleitet, bewirken dort durch Veränderung des Magnetismus der Pole eine vermehrte oder verminderte Anziehung der Eisenplatte, durch welche diese in entsprechende Bewegung gesetzt wird. Nehmen wir an, die Schaltung sei eine solche, daß der im Aufnahmetelephon erzeugte Strom von der Richtung  $a$  im Abgabetelephon eine Plattenbewegung nach innen, der Strom von der Richtung  $-a$  eine solche nach außen hervorruft. Wird nun ein Kommutator zwischen den Telephonen angebracht und mittels desselben eine Umschaltung vorgenommen, so wird der Strom von der Richtung  $a$  im Aufnahmetelephon nunmehr im Abgabetelephon nicht mehr eine Bewegung nach innen, sondern eine solche nach außen bewirken. In Bezug auf den Schall kommt dieses nun, wenn wir es mit Wellen zu tun haben, die den Sinusschwingungen nahestehen, der Verschiebung der Phase um eine halbe Wellenlänge gleich.

### Versuchsreihe II.

Die von uns verwendete Versuchsanordnung ist schematisch in Fig. 5 wiedergegeben. Als Tonquelle diente eine elektrische Stimmgabel, die auch mit einem Resonator versehen werden kann. Jener ( $S$ ) wurde ein SIEMENSSches Telephon ( $T_1$ ) genähert. Stimmgabel und Telephon waren fix aufgestellt. In einem Teile

der Versuche verwendeten wir statt der Stimmgabel Orgelpfeifen von KÖNIG, die durch einen APPUNschen Blasetisch zum Tönen gebracht wurden. Das Telephon war dann der Lippenöffnung gegenübergestellt. Die Telephonleitung führte zunächst zu einem rotierenden Kommutator, nach Art der an den STÖHRERSchen Maschinen angebrachten ( $C$ ) und von diesem durch die Schleifgabeln ( $B$ ) zum Abgabetelephon ( $T_2$ ). Der Kommutator war (wie bei dem ersten Versuche die Stimmgabel) durch einen

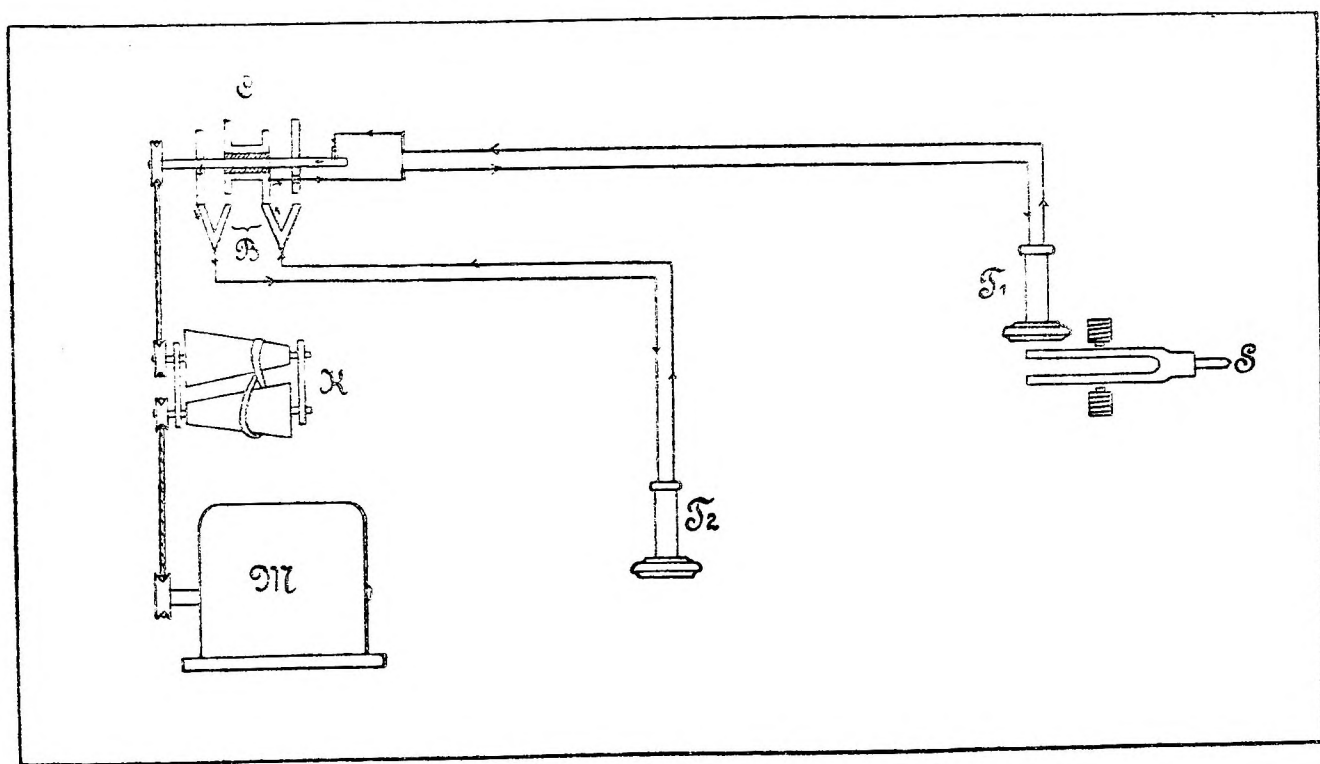


Fig. 5.

Elektromotor ( $M$ ) in Rotation gesetzt, welche Rotation mittels zweier Kegeln ( $K$ ), zwischen denen ein verschiebbarer Transmissionsriemen angebracht war, während des Versuches schneller oder langsamer gemacht werden konnte. Das Abgabetelephon ( $T_2$ ) befand sich in einem entfernten Zimmer, in welchem man vom Tone der Stimmgabel oder der Orgelpfeife nichts vernahm, außer wenn man das Telephon an das Ohr brachte.

Diese Versuchsreihen mit dem Telephon haben vor den Versuchen mit der rotierenden Stimmgabel den großen Vorzug, daß man durch Rotation des Kommutators die Tonempfindung wirklich gänzlich zum Verschwinden bringen kann, so daß ein trockenes, gänzlich tonleeres Geräusch übrig bleibt. Weiter gereicht ihnen zum Vorteile, daß man jede kontinuierlich wirkende Tonquelle zum Versuche benützen kann.

Das Resultat dieser Versuchsreihe war dem bei der Rotation der Stimmgabel gefundenen ähnlich. Auch bei dieser Versuchs-

anordnung hörte man, solange die Rotation des Kommutators langsam erfolgte, die Unterbrechungen des Tones, aber bei Steigerung der Umdrehungen in der Zeiteinheit, im Gegensatze zum Stimmgabelversuche, keine Steigerung der Tonhöhe. Hier löschte der Ton bei einer gewissen Umdrehungsgeschwindigkeit gänzlich aus und machte einem knarrenden oder kratzenden Geräusche Platz.

Die Zahl der Umdrehungen, bei welcher der Ton nicht mehr perzipiert wurde, betrug für die Stimmgabel  $h = 240$  v. d., bei P. 560, bei Prof. K. 585, bei Hr. C. 564 in der Minute; resp. 9,3, 9,7, 9,4 in der Sekunde; für die Orgelpfeife  $ut_3 (c') = 256$  v. d. fanden wir bei 4 Beobachtern folgende Werte: 10,0, 10,5, 10,3, 10,3, durchschnittlich 10,37; für die Orgelpfeife  $fa_3 (f') = 341\frac{1}{2}$  v. d. 13,4, 13,6, 13,7, 13,5, durchschnittlich 13,55; für die Orgelpfeife  $sol_3 (g') = 384$  v. d. 14,9, 15,3, 14,7, 15,1, durchschnittlich 15.

Es ergibt sich somit auch bei dieser Versuchsanordnung, übereinstimmend mit den Ergebnissen der Versuche an der gedrehten Stimmgabel, daß zum Auslöschen höherer Töne eine gröfsere Umdrehungsgeschwindigkeit erfordert wird, als für tiefe

Auch diese Versuche befriedigten uns nicht. Denn die mit steigender Rotationsgeschwindigkeit des Kommutators wachsenden Geräusche gaben eine peinliche Unsicherheit über das Verschwinden des Tones. Es kommt dazu, daß sowohl die Schallwellen, die von der rotierenden Stimmgabel ausgehen, als auch die vom Telephon ausgehenden, vorausgesetzt, daß der Kommutator etwa durch Schleuderung der Schleifbürsten nicht vollkommen korrekt fungiert, immer noch eine gewisse Ähnlichkeit mit den Schallwellen von Schwebungen haben konnten. Schwebungen aber sind durch Superposition zweier Töne verschiedener Höhe zusammensetzbar. Es wäre also immer noch denkbar, daß der ursprüngliche Ton verschwunden ist, und zweien für uns unerkennbaren Tönen Platz gemacht hat. Wir mußten also bestrebt sein, Tonwellen dem Ohre zuzuführen, deren Form in noch höherem Grade mit den punktierten Kurven der Fig. 1—3 übereinstimmt, welche Kurven nicht durch Superposition zweier Sinuskurven, wie sie für uns in Betracht kämen, entstanden gedacht werden können.

Wir konstruierten deshalb einen anderen Kommutator, der weniger Nebengeräusche lieferte, und verzichteten von nun ab



darauf, das Verschwinden des ursprünglichen Tones zu erzielen, sagten uns vielmehr, daß eine sicher wahrnehmbare Schwächung des Tones infolge von Phasenverschiebung bei sonst gleichartigen Umständen dieselbe Bedeutung für die Frage der Mitschwingungstheorie hat, wie das gänzliche Verlöschen.

Nun war uns eine Abschwächung des Tones in allen vorgenannten Versuchen zu einer bekannten Erscheinung geworden: Der bei ruhender Stimmgabel oder bei ruhendem Kommutator voll erklingende Ton nahm unter den oben beschriebenen Stößen an Intensität stets mehr und mehr ab, wenn jene in steigende Rotation versetzt wurden.

Dies konnte bei der Stimmgabel natürlich daher rühren, daß gleichsam ein Ausgleich zwischen den wirksamen und den unwirksamen Stellungen der Stimmgabelzinken zu dem Aufnahmeschlauch eintrat. Beim Kommutator, wenigstens wenn er technisch tadellos ausgeführt war, konnte das nicht mehr die Ursache der Abnahme der Tonintensität beim Anlaufen sein. Da wir aber nicht sicher waren, ob nicht doch die Konstruktion bei der raschen Rotation ein rhythmisches Unterbrechen des Kontaktes durch Wegschleuderung bedingt, konstruierten wir den anderen Kommutator, der nicht so schnell gedreht zu werden brauchte, wodurch diese Gefahr beseitigt war, und der überdies bequem zu zwei Modifikationen des Versuches umgestaltet werden konnte.

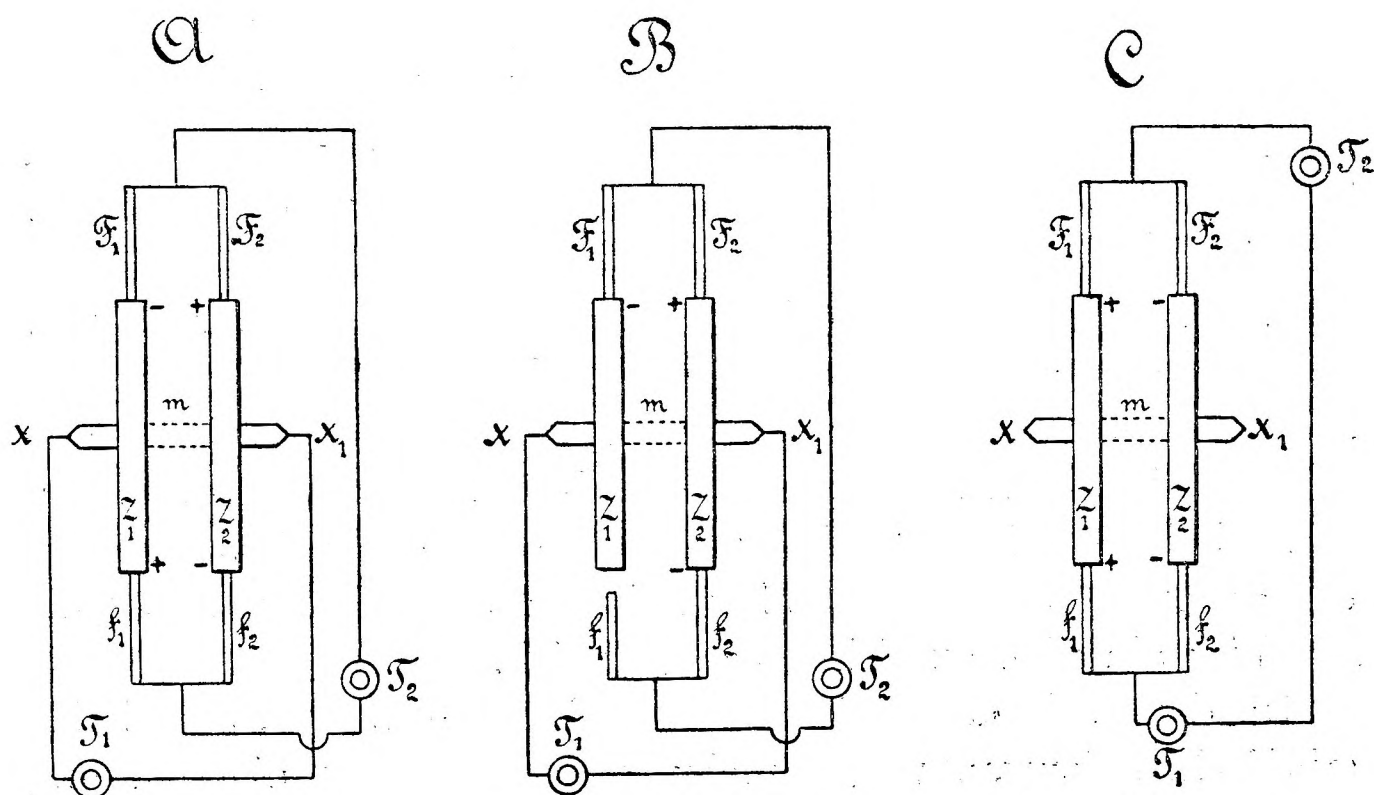


Fig. 6.

Dieser Kommutator, Fig. 6 A, besteht im wesentlichen aus zwei an einer gemeinschaftlichen, aber in ihrer Länge (bei  $m$ ) durch Isolation unterbrochenen, Achse ( $x\ x_1$ ) angebrachten Blitzrädern ( $z_1\ z_2$ ) jener Art, welche als Zahnräder hergestellt, und deren Zahnücken mit isolierender Masse erfüllt sind. An der Peripherie jedes Rades schleifen zwei Federn ( $F_1, f_1, F_2, f_2$ ). Diese sind so gestellt, daß  $F_1$  nur dann metallischen Kontakt hat, wenn  $f_1$  und  $F_2$  keinen hat; ebenso  $F_2$  nur dann, wenn  $f_2$  und  $F_1$  keinen hat. In der Zeichnung ist Kontakt und Isolierung durch  $+$  und  $-$  angedeutet. Aus der unmittelbar ersichtlichen Verbindung mit dem Aufnahmetelephon ( $T_1$ ) und dem Abgabetelephon ( $T_2$ ) erkennt man, daß bei der Verschiebung des Blitzrades um je eine Zahnbreite die Richtung eines von  $T_1$  ausgehenden Stromes in  $T_2$  wechseln müßte. Es findet also auch hier bei Rotation des Kommutators eine periodische Umschaltung, somit bei Einwirkung eines Tones eine periodische Phasenverschiebung statt.

Damit man den so gewonnenen Gehörseindruck sofort vergleichen kann mit dem, der zu stande kommt, wenn jede zweite Tonwellengruppe ausfällt, also nur Wellengruppen von gewisser Dauer von Pausen gleicher Dauer unterbrochen und ohne Phasenverschiebung auf das Ohr wirken, ist ein Exzenter so angebracht, daß durch eine Handdrehung die Feder  $f_1$  dauernd vom Rade abgehoben wird. Es ist dann die in Fig. 6 B versinnlichte Verbindung der beiden Telephone hergestellt.

Endlich kann durch eine andere Schaltung und Verstellung zweier Kontaktfedern, die mit Einstellschrauben versehen sind, dem Apparate die Verbindung von Fig. 6 C gegeben werden. Sie bezweckt bei Erhaltung aller durch die Kontaktwechsel von A bedingten Nebengeräusche, also bei gleicher Anzahl und Frequenz der Umschaltungen die Wellengruppen ohne Intervall und ohne Phasenverschiebung auf das Ohr wirken zu lassen, also den Wellenzug nur abwechselnd durch das eine und das andere Blitzrad zu leiten. Auch die periodische Intensitätsschwankung, welche bei der Stimmgabel durch die Drehung gegeben war, bei dem ersten Kommutator wahrscheinlich ausgeschlossen wurde, fehlt hier aller Voraussicht nach gänzlich.

Da demnach das  $a$  der STEFANSchen Formel (S. 308) keine periodischen Schwankungen mehr erleidet, entfällt die Spaltung und damit das Verschwinden des ursprünglichen Tones.

Die Resultate, die wir nunmehr mit dem neuen Umschalter erhielten, waren folgende.

### Versuchsreihe III.

Liefs man ihn in der Stellung *A* anlaufen und behorchte  $T_2$  in einem fernen Zimmer, so gewährte man wieder die unzweifelhafte Abnahme der Tonstärke. Bei steigender Tourenzahl beschleunigten sich die Stöße und nahmen an Intensität ab, so daß ein rauher Klang resultierte, in dem der ursprüngliche Ton noch mehr oder weniger deutlich zu erkennen war.

### Versuchsreihe IV.

Wenn man jetzt abwechselnd die Schaltung *B* an Stelle der Schaltung *A* treten liefs, so wurden die einzelnen Stöße bei *B* wie zu erwarten war viel deutlicher vernommen. Die Frage aber, ob der Grundton in den groben Stößen bei *B* lauter erklingt als während der feineren Stöße bei *A*, wurde von unseren verschiedenen Beobachtern nicht gleichartig beantwortet. Die Mitschwingungstheorie hätte erwarten lassen, daß die um eine halbe Wellenlänge verschobenen Wellengruppen hemmend auf die nachfolgenden Gruppen einwirken. Dies konnte aber mit Sicherheit nicht festgestellt werden, da zwar bei gewissen Frequenzen einige Beobachter angaben, den Grundton lauter bei *B* zu hören als bei *A*, andere aber dies nicht bestätigen konnten. Allerdings ist uns keine Angabe vorgekommen, nach welcher der Grundton bei *A* lauter zu hören ist als bei *B*. Die Unsicherheit des Urteils hängt wohl mit der großen Verschiedenheit der beiden Gesamteindrücke zusammen.

### Versuchsreihe V.

Ferner haben wir verglichen die Tonstärke bei der Schaltung *C* mit der bei der Schaltung *A*. Und zwar sind wir hier so verfahren, daß wir bei gegebener Rotationsgeschwindigkeit des Kommutators und gegebener Schallquelle sowie Stellung des Aufnahmetelephons ( $T_1$ ) am Abgabetelephon ( $T_2$ ) horchten und beobachteten, in welche Entfernung von demselben wir unser Ohr bringen müssen, um den Ton eben noch zu vernehmen. Selbstverständlich war der Beobachter in einem fernen Zimmer und verständigte sich durch Glockensignale mit dem an den Apparaten hantierenden Assistenten. Als Tonquelle dienten



KÖNIGSche Orgelpfeifen von den im folgenden angegebenen Tonhöhen.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in der beistehenden Tabelle zusammengestellt; die Entfernungen sind in Centimetern angegeben.

Tonhöhe $n =$	Entfernung des Abgabetelephons bei Umschaltung					
	ohne Phasenverschiebung			mit Phasenverschiebung		
	128	256	384	128	256	384
Entfernungen des Abgabetelephons in cm						
Beobachter C.	7	35	90	1	21	40
„ E.	6,5	28	120	1,7	19	80
„ H.	5,5	40	220	3	13	56
„ P.	6,5	30	100	3	12	36

Man sieht, daß überall die Phasenverschiebung die Intensität herabsetzt, und zwar sehr bedeutend.

Versuchsreihe VI.

Endlich haben wir Versuche nach dem folgenden Schema ausgeführt:  $S_1, S_2$  (Fig. 7) seien die Querschnitte der beiden

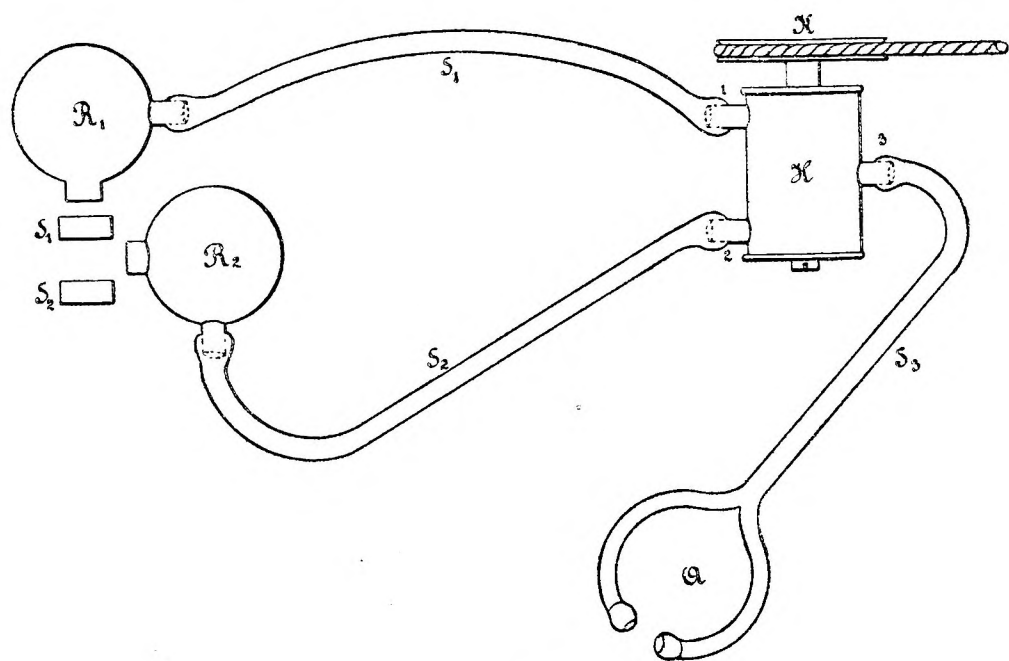


Fig. 7.

Zinken einer elektromagnetisch getriebenen Stimmgabel,  $R_1, R_2$  Resonatoren, welche auf den Ton der Stimmgabel abgestimmt waren. Aus ihnen heraus führten zwei gleich lange Schläuche

( $S_1$   $S_2$ ) zu einem Hahn ( $H$ ), der durch die Rolle  $K$  in Rotation versetzt werden konnte, und eine derartige Bohrung enthielt, daß aus der Öffnung 3 desselben immer nur der Schallwellenzug austreten konnte, der durch einen der beiden Schläuche dem Hahn zugeleitet wurde. Bei Drehung des Hahnes wechselten also die beiden Wellenzüge ab. Sie gelangen in einen dritten Schlauch ( $S_3$ ), durch diesen eventuell unter Einschaltung einer Gasrohrleitung in ein entferntes Zimmer, und daselbst durch ein binaurales Hörrohr ( $A$ ) in die Ohren des Beobachters.

Die in den Resonatoren entstehenden Wellenzüge haben, wie aus der Stellung der Gabel (s. die Zeichnung) hervorgeht, natürlich einen Phasenunterschied von einer halben Wellenlänge. Wenn man die beiden Schläuche  $S_1$  und  $S_2$  durch ein T-Rohr direkt mit dem Schlauche  $S_3$  verbindet, und so die Tonwellenzüge den Ohren zuführt, so erhält man den Effekt der Interferenz. Die Vorrichtung führt nicht zum vollen Verlöschen des Tones, da offenbar durch die festen Teile (Kautschuk u. dgl.) auch Schallwellen geleitet werden, daß aber eine Interferenzwirkung vorhanden ist, erkennt man durch das bedeutende Anschwellen des Tones, das eintritt, sowie man einen der beiden Schläuche  $S_1$  oder  $S_2$  zuklemmt. Die gegenseitige Abschwächung war bedeutender als wir erwartet hatten, so daß wir hoffen durften, die gestellte Frage hier auf einem recht einfachen Weg der Beantwortung zuzuführen.

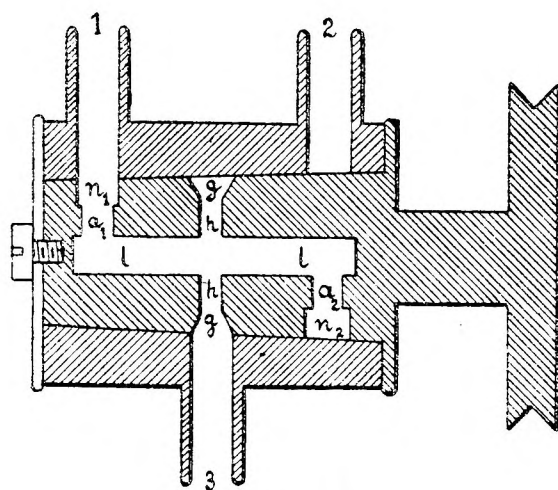


Fig. 8.

Der verwendete Hahn (Fig. 8) enthält eine mittlere Längsbohrung ( $l$   $l$ ). Der drehbare konische Anteil trägt an seiner Mantelfläche drei eingedrehte Nuten, oder Rinnen, die auf der Zeichnung im Querschnitt erscheinen. Die mittlere Nut geht rings um die Peripherie des Konus, erscheint also auf dem

Durchschnitt zweimal getroffen ( $g g$ ), die zwei anderen ( $n_1 n_2$ ) umfassen etwas weniger als die halbe Peripherie, und liegen so, daß, wenn die Mitte der einen Nute ( $n_1$ ) oben ist, die Mitte der anderen Nute ( $n_2$ ) den tiefsten Stand einnimmt. Die mittlere Nute ( $g g$ ) ist durch mehrere Bohrungen ( $h h$ ) mit der mittleren Längsbohrung ( $ll$ ) in Verbindung gesetzt, die seitlichen Nuten nur durch je eine ( $a_1 a_2$ ). An der Hülse des Hahnes finden sich drei Schlauchansätze, deren Bohrung bis an den Konus reicht. Zwei derselben (1 und 2) haben dieselbe Richtung, der dritte (3) die entgegengesetzte.

Man sieht, daß bei Rotation des Hahnes abwechselnd 1 und 2 mit 3 verbunden sind. Die Nuten  $n_1$  und  $n_2$  sind um soviel kürzer als der halbe Umfang des Konus, daß in keinem Momente der Drehung die beiden Schlauchansätze 1 und 2 gleichzeitig mit  $ll$  kommunizieren.

Wenn man mit dieser Versuchsanordnung in einem fernen Zimmer binaural und bei ruhendem Hahn den Ton belauscht, so hört man ihn, d. i. den Ton eines der beiden Resonatoren in recht bedeutender Intensität. Gibt man nun das Zeichen, auf welches hin der Assistent den Hahn mit wachsender Geschwindigkeit rotieren läßt, so nimmt die Intensität ab. Diese Abnahme ist vollkommen deutlich und leicht festzustellen. Wir bestimmten dann die Umschaltungen und fanden, daß sie 9—10 in der Sekunde waren. Doch ist natürlich das Phänomen der Abnahme an diese Zahl nicht gebunden.

Wenn dasselbe, wie wir annehmen zu müssen glauben, auf dem Mechanismus des Mitschwingens gewisser Teile im Ohre beruht, so ist zu erwarten, daß es auch an einem Resonator auftritt. Wir brachten also einen dritten Resonator, der auf den Stimmgabelton abgestimmt war, an die Stelle des binauralen Hörschlauches (*A* Fig. 7), indem wir den Schlauch  $S_3$  mit dem trichterförmigen Ende des Resonators verbanden und in seine gegenüberliegende Öffnung den Hörschlauch einführten.

Bei ruhendem Hahn gewährte man dann sehr gut den Ton. Beim Anlaufen desselben schwächte sich der Ton ab, soweit, daß man ihn schließlich überhaupt nicht mehr sicher vernahm. Dabei ist kein anderer, höherer oder tieferer Ton wahrnehmbar, zum Beweis, daß hier das STEFANSche Phänomen nicht auftritt.

Aus diesem Versuche ersieht man die Analogie zwischen



den mechanischen Vorgängen im Resonator, und den Vorgängen, welche unserer Wahrnehmung der Töne zu Grunde liegen; es sind wesentlich die Erscheinungen, welche in der Einleitung als nach dem Mechanismus des Mitschwingens zu gewärtigende besprochen worden. Ja die Tatsache allein, daß die in Anwendung gebrachte Phasenverschiebung der Schallwellen zu Empfindungen führt, die den Stößen, Schwebungen oder Rauigkeiten gleichen, spricht laut in diesem Sinne.

Will man aus den Versuchsreihen I und II berechnen, wieviele Schallwellen in regelrechter Folge auf das Ohr wirken müssen, um den Ton eben erkennen zu lassen, so ergibt sich folgendes: Bei der rotierenden Stimmgabel ist diese Anzahl gegeben durch den Grenzwert der Umdrehungsgeschwindigkeit, bei welchem man den Ton eben noch oder eben nicht mehr hört. Dieser Grenzwert ist für die unbelastete Stimmgabel, die 240 Schwingungen p. s. macht, wie oben gesagt, bei 6 Umdrehungen p. s. erreicht. Die unbedeutende Steigerung der Tonhöhe infolge der Rotation kann hier wohl vernachlässigt werden.

Da bei einer Umdrehung der Stimmgabel die Phase viermal geändert wird, so liegen näherungsweise 10 Tonwellen zwischen zwei Phasenverschiebungen. Diese reichen demnach aus, die Tonhöhe erkennen zu lassen. Die auf 192 Schwingungen herabgestimmte Gabel ließ den Ton nicht mehr vernehmen bei 4—5 Umdrehungen p. s., was 10,8 Tonwellen zwischen zwei Phasenverschiebungen entspricht, die auf 160 Schwingungen herabgestimmte Gabel bei 3,4 Umdrehungen entsprechend 11,8 Schwingungen zwischen den Phasenverschiebungen.

Bei den Telephonversuchen wird die Phase bei jeder Umdrehung des Kommutators zweimal geändert. Es ergibt sich demnach aus den oben angeführten Daten, daß der Ton verschwindet

für die Stimmgabel von 240	v. d. bei 9,46 Umdrehg. u. 13,2 regelm. Wellen
„ „ Orgelpfeife „ 256	„ 10,37 „ „ 12,3 „ „
„ „ „ „ 341,3	„ 13,55 „ „ 12,6 „ „
„ „ „ „ 384	„ 15,00 „ „ 12,7 „ „

Bei der ersten Versuchsreihe genügen also zur Wahrnehmung des Tones näherungsweise 10—12 Schwingungen, ob derselbe eine Höhe von 240 oder nur von 160 Schwingungen hat. Bei der zweiten Versuchsreihe, welche Töne von 240 bis 384 Schwin-

gungen umfaßt, sind zur Erkennung derselben näherungsweise 13 Schwingungen erforderlich.

Diese Differenz hat nichts Wunderbares. Es ist ja selbstverständlich, daß, wenn das Erkennen des Tones auf Mitschwingen beruht, starke Töne viel früher, d. h. nach einer kleineren Zahl von Schwingungen die Schwelle überschritten haben werden, als schwache Töne, ja es fordert diese Theorie, daß auch viel weniger Wellen, daß eine Welle, oder selbst der Bruchteil einer solchen eine Tonempfindung hervorzurufen vermag. Es kommen hierzu noch die mannigfaltigen äußeren Umstände, die bei verschiedener Versuchsanordnung variieren, und allerlei Nebengeräusche verursachen, die in einem Falle mehr, im anderen weniger den zu hörenden Ton verdecken können. Es kann aus dieser und anderen Ursachen die Frage nach der Anzahl von Tonwellen, welche genügen, eine wohlcharakterisierte Tonempfindung zu erzeugen, unseres Erachtens immer nur für einen bestimmten Fall beantwortet werden.

So erklärt sich auch die Verschiedenheit der Resultate, die man zur Beantwortung dieser Frage in der Literatur findet.

Sie sind in einer im Jahre 1898 erschienenen Arbeit von O. ABRAHAM und J. BRÜHL<sup>1</sup> in sehr vollkommener und übersichtlicher Weise zusammengestellt. Diese beiden Forscher haben im Berliner psychologischen Institute umfassende Versuche aufgeführt, und glaubten auf Grund derselben die Frage dahin beantworten zu können, daß, ganz allgemein, 2 Schallwellen zur Wahrnehmung eines Tones genügen.

Unseres Erachtens ist aber auch durch diese sonst sehr verdienstvollen Untersuchung jene Frage nicht endgültig beantwortet, denn es wurde nur mit Sirenentönen gearbeitet, also mit Schallwellen von überaus komplizierter Gestalt, so daß niemals behauptet werden kann, daß die Resultate bei Verwendung von Sinusschwingungen dieselben gewesen wären; auch blieb die Frage offen, wie sich die Tonempfindung verhielte, wenn die Schallintensität (im physikalischen Sinne des Wortes) in höherem Maße gesteigert würde, als es hier geschehen ist, und wie sich die Ergebnisse bei gänzlich unmusikalischen Menschen gestalten.

Dies sei hier nur angeführt, um die Berechtigung unserer Zahlen, die eben nur für unsere Versuchsbedingungen Gültigkeit beanspruchen, außer Zweifel zu setzen.

<sup>1</sup> *Zeitschr. f. Psychologie u. Phys. d. Sinnesorgane* 18.

Viel wichtiger als diese unsere absoluten Zahlenangaben, ist die festgestellte Tatsache, daß hohe und tiefe Töne, bei Intensitäten von gleicher Größenordnung untersucht, annähernd durch die gleiche Anzahl von Schwingungen die Schwelle der Empfindung erreichen, wie dies auch ABRAHAM und BRÜHL auf Grund von viel angedehnten Versuchen für den größten Teil der musikalisch verwerteten Tonhöhen gefunden haben, eine Tatsache, die sehr wohl mit der Resonanztheorie, und kaum so leicht mit einer anderen Theorie der Gehörsempfindungen in Einklang zu bringen ist.

Wir haben noch das oben erwähnte Phänomen zu berühren, daß der Ton der gedrehten Stimmgabel bei Steigerung der Tourenzahl höher wird. Nach der Schätzung unserer musikalischen Berater dürfte diese Steigerung höchstens eine kleine Terz betragen.

Wenn diese Beobachtung nicht auf das STEFANSche Phänomen allein zurückzuführen ist, so rührt es in anderen Fällen offenbar von der Centrifugalkraft her, welche die Zinken auseinandertreibt, so daß sie während der Rotation um eine andere Gleichgewichtslage schwingen als in der Ruhe, und in dieser neuen Gleichgewichtslage eine innere Spannung besitzen, vergleichbar einer Saite, deren Spannung gesteigert ist. Wie oben beschrieben, verrät sich der Übergang in die neue Gleichgewichtslage beim Rotieren durch das Ausbleiben der Funken zwischen *B* und *K* der Fig. 4, so daß eine Verstellung von *K* nötig wird, soll die Gabel elektrisch in Schwingung erhalten bleiben.

Ferner müssen wir den naheliegenden Einwand erwähnen, daß sich bei diesem Stimmgabelversuche das DOPPLERSche Phänomen störend geltend mache. Es ist richtig, daß die Tonwellen, die von einer Zinke der Gabel ausgehen, die Öffnung des Schlauches (*G* der Fig. 4) in rascherer Folge während der Annäherung der Zinke an diese Öffnung treffen werden, in langsamerer Folge während der Entfernung derselben. Der Ton muß also während einer Umdrehung der Stimmgabel zweimal tiefer werden. Doch ist dieses Ansteigen und Abfallen in so geringem Maße vorhanden, daß es voraussichtlich für den Erfolg des Versuches nicht in Betracht kommt. Eine einfache Rechnung ergibt dieses. Nehmen wir den höchsten Ton, mit welchem experimentiert worden ist, er hat 240 Schwingungen; die Stimmgabel hat sich 12,1 mal um ihre Achse gedreht. Wenn die Schallgeschwindig-



keit 333 m beträgt, so ist eine Welle 1,4 m lang, und gehen von der Stimmgabel während einer Umdrehung 19,8 Wellen aus. Für unsere Frage kommt in Betracht die Annäherung einer Zinke an die Öffnung des Kautschukschlauches während eines Achtels der Umdrehung, und das Entfernen derselben während des nächsten Achtels. Diese Annäherung oder das Entfernen beträgt nach den oben angeführten Maßen der Stimmgabel und der Stellung des Schlauches fast genau 1 cm; während sich die Zinke somit um diese geringe Strecke nähert, gehen von ihr 2,48 Wellen von 1,4 m Länge aus. Dieser Tonwellenzug von 3,5 m Länge wird somit um 1 cm verkürzt. Es ist dieses weniger als 0,3 Prozent, so daß, wenn man auch die Verlängerung der Schallwellen während der Entfernung der Zinke von der Schlauchöffnung in Betracht zieht, man immer noch lange nicht auf eine Änderung des Tones kommt, der bei dem Erfolg der beschriebenen Versuche eine Rolle spielen könnte.

Oben wurde als ein Postulat der Mitschwingungstheorie die vorläufig vorausgesetzte Erscheinung bezeichnet, daß ein Wellenzug von der geschilderten Art der Phasenverschiebungen, der bei einer bestimmten Zahl dieser letzteren in der Zeiteinheit eben keine Tonempfindung mehr auslöst, dies wieder tun muß, wenn die Elongation der Wellen, d. h. die Stärke des Tones, vergrößert wird. Merkwürdigerweise bereitete uns der Nachweis dieser Erscheinung, die fast als selbstverständlich vorausgesetzt werden konnte, Schwierigkeiten. Am einfachsten schien es, die Frage durch den Telephonversuch zu beantworten, indem wir das Aufnahmetelephon in verschiedenen Entfernungen von der Schallquelle, als welche eine elektrisch getriebene Stimmgabel benutzt wurde, aufstellten, und für diese Entfernungen die Frequenz des Kommutators bestimmten, bei welcher der Ton eben unhörbar wurde.

Da zeigte sich nun für starke und schwache Töne fast dieselbe Frequenz, ja bisweilen schien sogar der schwächere Ton erst bei einer größeren Frequenz zu verschwinden. Dieses auffallende Verhalten dürfte seine Erklärung darin finden, daß bei größerer Annäherung des Telephons an die Stimmgabel sehr bedeutend stärkere Nebengeräusche auftreten, die schließlich, wenn der Ton der Stimmgabel unmerklich geworden ist, allein zurückbleiben. Sie dürften von Induktionswirkungen herrühren, die die schwingende Stimmgabel abgesehen von den tonerzeugenden

noch im Telephone hervorruft, Ströme, die dann durch den Kommutator unterbrochen werden und das rauhe klappernde Geräusch erzeugen. Dieses fällt fast gänzlich weg, wenn das Telephon mehrere Decimeter entfernt von der Stimmgabel angebracht wird. Es ist begreiflich, daß der schwache Ton ohne Nebengeräusche noch bei derselben, eventuell sogar bei größerer Frequenz der Umschaltungen gehört werden kann, als der starke, der bald von den Nebengeräuschen überdeckt wird; wieder ein Fingerzeug dafür, daß derartige Bestimmungen, wenn man es, wie gewöhnlich, nicht mit ganz reinen Tönen zu tun hat, eben nur für den betreffenden Fall und die vorliegende Versuchsanordnung Gültigkeit haben.

Wir machten nun den gleichen Versuch mit der rotierenden Stimmgabel. Da ergab sich sofort das von der Mitschwingungstheorie geforderte Resultat. Die Entfernung zwischen dem Schlauchende und der Stimmgabelzinke in der Rotationsstellung, bei welcher diese Entfernung ein Minimum ist, wurde schrittweise von 2 auf 8 cm vergrößert, und dabei von einem von uns das Verschwinden des Tones successive bei 532, 418, 325 und 180 Umdrehungen der Gabel p. M. festgestellt.

---

Man wird fragen, warum wir nicht den ergebnisreichen Versuchen von R. KÖNIG und LUDIMAR HERMANN folgend, unsere Experimente mit Sirenenscheiben angestellt haben. Was uns bestimmte,\* von denselben abzusehen, war die Befürchtung, durch die Obertöne getrübe Resultate zu erhalten. Die Lochsirenen liefern Luftwellen von außerordentlich komplizierter Gestalt, d. h. von vielen und intensiven Obertönen. Die von uns untersuchten Hemmungen der Effekte einer Tonwellengruppe durch die nächstfolgende trifft nicht für die Obertöne zu, wenn sie für den Grundton gilt. Wollte man also ein übersehbares Resultat erlangen, so mußten die Töne, mit welchen experimentiert wurde, den Sinusschwingungen möglichst nahe stehen. Aber auch die in Kurven geschnittenen Sirenenscheiben schienen uns nicht die nötige Garantie zu geben, bei den einzuschaltenden Unregelmäßigkeiten arm an Obertönen zu sein.

---

Die vorstehenden Versuche haben folgende mit der Mitschwingungstheorie in Einklang stehende Resultate ergeben,

deren Erklärung auf Grund einer anderen Theorie der Tonempfindungen noch zu suchen wäre:

1. Die in einem Tonwellenzuge periodisch wiederkehrende Verschiebung um eine halbe Wellenlänge erzeugt eine Empfindung, welche sich von der durch Schwebungen erzeugten nicht unterscheiden läßt.

2. Ein Tonwellenzug, in dem die genannten Phasenverschiebungen in genügender Frequenz vorhanden sind, erzeugt eine Tonempfindung von geringerer Intensität, als derselbe Tonwellenzug, wenn er von jenen Phasenverschiebungen frei ist.

3. Der Gehörseindruck, den ein mit den genannten Phasenverschiebungen versehener Tonwellenzug verursacht, sinkt in seiner Intensität, nicht nur, wenn die Elongation seiner Schwingungen kleiner wird, sondern auch, wenn die Anzahl der Verschiebungen in der Zeiteinheit steigt.

4. Diese Abnahme der Intensität kann bis zur Unmerklichkeit des Tones führen.

*(Eingegangen am 2. Juni 1903.)*

---