

(Aus dem Psychologischen Seminar der Universität Berlin.)

# Über Kombinationstöne und einige hierzu in Beziehung stehende akustische Erscheinungen.

Von

MAX MEYER.

Mit 9 Figuren im Text.

## I. HELMHOLTZ' Theorie der Kombinationstöne.

Die Kombinationstöne sind eine auf dem Gebiete der Sinnesempfindungen insofern einzig dastehende Thatsache, als hier — wenigstens dem Anscheine nach — bei gleichzeitiger Einwirkung zweier Reize auf das Sinnesorgan nicht nur die diesen beiden primären Reizen entsprechenden, sondern noch eine (oder mehrere, was wir vorläufig dahingestellt sein lassen wollen) weitere Empfindung zu stande kommt. Gleich hier nun drängt sich uns die Frage auf, ob denn diese hinzukommende Empfindung in der That erst durch das gleichzeitige Einwirken zweier Reize auf das Sinnesorgan zu stande kommt, oder ob nicht vielleicht schon in den tönenden, d. h. schwingenden Medien, noch bevor jene primären Wellenbewegungen bis zum eigentlichen Sinnesorgane gelangen, solche Bewegungen entstehen, durch deren Einwirken auf die Nervenendigungen die zu den primären hinzukommenden sekundären Empfindungen ausgelöst werden. Nun hat H. VON HELMHOLTZ thatsächlich theoretisch den Nachweis geführt, daß solche Bewegungen, sei es in einer schwingenden Luftmasse, sei es im Trommelfell, entstehen können. Damit scheint denn das ganze Problem der Kombinationstöne gelöst zu sein.

Unterzieht man aber die mannigfachen Erscheinungen auf dem Gebiete der Kombinationstöne einer eingehenden Untersuchung, so wird man bald Bedenken tragen, das Problem hiermit als gelöst anzusehen und zu glauben, daß die mathematische Ableitung den Thatsachen wirklich gerecht zu werden vermöge. Die Erscheinungen sind viel zu verwickelt, um mit einer einfachen Formel abgethan zu werden. Wir müssen daher weiter gehen und nach einer physiologischen Erklärung suchen. Hier aber läßt uns die HELMHOLTZsche Theorie von dem Zustandekommen der Tonempfindungen im Stich. So wertvoll diese Theorie für die Deutung der allgemeinen Erscheinungen auf dem Gebiete der Gehörsempfindungen auch ist, so vermag sie doch in ihrer vorliegenden Gestalt nicht nur keine Erklärung für die Kombinationstöne zu geben, sondern schließt das Zustandekommen solcher Töne vielmehr fast gänzlich aus. Die Kombinationstöne haben deshalb für die Lehre von den Tonempfindungen die allergrößte Wichtigkeit, und es dürfte nicht unrichtig sein, gerade von ihnen auszugehen, um die Gesetze des Hörens auf eine einigermaßen sichere Grundlage zu stellen.

Vor HÄLLSTRÖM<sup>1</sup> war die Lehre von den Kombinationstönen mehr spekulativ als wissenschaftlich. Erst von HÄLLSTRÖM wurde die Regel aufgestellt, daß der erste Kombinationston durch die Differenz der Schwingungszahlen der Primärtöne bestimmt sei. Dieses auf Grund sorgfältigster Beobachtungen von ihm gefundene Gesetz ist allgemein anerkannt.<sup>2</sup> HÄLLSTRÖM fand ferner, daß außer dem durch das obige Gesetz bestimmten Differenztone noch ein zweiter hörbar ist, dessen Schwingungszahl der Differenz der Schwingungszahlen des tieferen Primärtones und des ersten Differenztones gleich ist. Dieser sog. sekundäre Differenzton ist vielfach stärker als der eigentliche; eine leicht zu beobachtende Thatsache, die der Erklärung widerspricht, die HÄLLSTRÖM für die sekundären Differenztöne gab, indem er meinte, der erste Differenzton könnte mit einem der Primärtöne wieder einen neuen Differenzton bilden; denn wie sollte der schwache erste Differenzton mit einem der starken Primärtöne den starken sekundären Differenzton zu stande

<sup>1</sup> *Pogg. Ann.* Bd. 24.

<sup>2</sup> Dieses Gesetz scheint aber doch kein ganz passender Ausdruck des Thatsächlichen zu sein, wie wir später sehen werden.



bringen. Wenn es wirklich der Fall wäre, so würde es ganz im Widerspruche stehen mit der sonst allgemein beobachteten Thatsache, daß Differenztöne gerade dann am stärksten auftreten, wenn die erzeugenden Töne angenähert gleiche Stärke besitzen.

Das Problem der Entstehung der Kombinationstöne schien in ein neues Stadium eingetreten, ja endgültig gelöst zu sein, als HELMHOLTZ seine mathematische Ableitung der Kombinationstöne veröffentlichte. HELMHOLTZ hat neben dem Differenztone noch den Summationston entdeckt, den man vor ihm nicht kannte. Sehen wir zu, wie es sich damit verhält. In der Beilage XIII seiner „*Lehre von den Tonempfindungen*“<sup>1</sup> sagt HELMHOLTZ: „Wenn wir nun annehmen, daß bei den Schwingungen des Paukenfelles und seiner Annexa das Quadrat der Elongationen auf die Schwingungen Einfluß gewinnt, so geben die ausgeführten mechanischen Entwicklungen einen vollständigen Aufschluß über die Entstehung der Kombinationstöne. Namentlich erklärt die neue Theorie ebensogut das Entstehen der Töne  $(p + q)$ , wie der Töne  $(p - q)$  und läßt einsehen, warum bei vermehrter Intensität  $u$  und  $v$  der primären Töne die der Kombinationstöne, welche proportional  $uv$  ist, in einem schnelleren Verhältnisse steigt.“

Zunächst haben wir — ganz abgesehen davon, daß es eine unbewiesene und auch schwer zu beweisende Behauptung ist, daß die wirkliche Stärke der Kombinationstöne proportional  $uv$  wächst — kaum Veranlassung, die von HELMHOLTZ geforderte Annahme zu machen. Das Quadrat der Elongationen gewinnt auf die Schwingungen Einfluß, wenn die Amplitude der Schwingung ziemlich groß ist. Den Differenzton höre ich aber auch dann, wenn die Primärtöne sehr schwach sind. Im Einklange hiermit sind die Beobachtungen von STUMPF,<sup>2</sup> HERMANN,<sup>3</sup> SCHAEFER<sup>4</sup> und anderen. STUMPF meint hier, daß es auch nicht notwendig sei, daß die Primärtöne gleiche Stärke untereinander besitzen. Dies ist wohl nur dahin zu verstehen, daß die Differenztöne auch bei verschiedener Stärke der Primärtöne zu hören sind, wenn auch schwächer. Im allgemeinen ist die

<sup>1</sup> 4. Aufl. S. 652.

<sup>2</sup> *Tonpsychologie*. II. S. 248 f.

<sup>3</sup> *Pflügers Arch.* 49.

<sup>4</sup> *Zeitschr. f. Psych.* I.

Wahrnehmung des Differenztones um so leichter, je weniger die Primärtöne in der Stärke voneinander abweichen. Versuche, die ich an Stimmgabeln machte, hatten folgendes Ergebnis: Der Differenzton wird nicht gehört, wenn der eine der beiden Primärtöne den anderen an Intensität bedeutend übertrifft, und zwar ist es hierbei gleichgültig, ob der stärkere Ton der höhere oder der tiefere ist. Wenn man nun den stärkeren Ton dämpft, so erscheint der Differenzton und nimmt an Intensität zu, bis die beiden Primärtöne ungefähr gleiche Stärke haben. Dämpft man den einen Primärton weiter, so wird der Differenzton schwächer und verschwindet früher als der gedämpfte Primärton, da nun dasselbe Verhältnis der Primärtöne wie früher, nämlich starkes Überwiegen des einen über den anderen, eintritt, nur bei absolut geringerer Intensität.

Die Bedeutung, die das Stärkeverhältnis der Primärtöne für das Hören des Differenztones hat, erkennt man auch, wenn man den Differenzton zu hören sucht bei zwei an beide Ohren verteilten Gabeln. Hier hört man den Differenzton nur dann, wenn die eine Gabel leise und die andere laut tönt, und zwar hört man ihn, wenn man die Aufmerksamkeit auf dasjenige Ohr richtet, an dem die leisere Gabel ertönt. Dafs sich dies so verhält, ist auch schon von SCHAEFER<sup>1</sup> angegeben worden. Die Erklärung hierfür ist leicht zu geben. Der Differenzton ist eben dann zu hören, wenn in dem Ohre, an dem die leisere Gabel ertönt, der schwächere Ton und der stärkere, der aber durch Knochen- und zum Teil auch durch die längere Luftleitung auf dieses Ohr einwirkt, in ungefähr gleicher Stärke gehört werden. Auch dies ist zugleich ein Beweis dafür, dafs grofse Stärke der Primärtöne zum Hören des Differenztones nicht erforderlich ist.

Es ist hier noch zu bemerken, dafs es vielleicht nicht richtig ausgedrückt ist, wenn man sagt, es sei für das Hören des Differenztones am günstigsten, wenn die Primärtöne gleiche Empfindungsstärke haben. Die Schwierigkeit liegt darin, dafs es keine anerkannte Mafseinheit für die Empfindungsstärke zweier Töne giebt. Gegen die zur Messung angewandten Methoden läfst sich wenigstens noch manches einwenden. Vielleicht ist es genauer, wenn wir als das günstigste Verhältnis

---

<sup>1</sup> *Zeitschr. f. Psych.* I. S. 93 f.

zum Heraushören der Differenztöne nicht gleiche Empfindungsstärke der beiden Primärtöne, sondern ein bestimmtes Verhältnis der in Betracht kommenden physikalischen Größen annehmen. Wenn ich daher auch im Folgenden noch davon spreche, daß der Differenzton am besten zu hören sei, wenn die Primärtöne gleiche Empfindungsstärke haben, so ist dies nur eine vorläufige Ausdrucksweise in Ermangelung einer noch zu machenden genaueren Bestimmung der Werte der in Frage kommenden physikalischen Größen.

So wenig, wie die bereits behandelte, von HELMHOLTZ gemachte Voraussetzung berechtigt ist, ist es auch die andere, daß die Differenztöne bedingt seien durch den unsymmetrischen Bau des Trommelfelles, der für HELMHOLTZ' mathematische Theorie der Kombinationstöne wesentlich ist. Zunächst ist die Ansicht zurückzuweisen, daß die lebhafteste Tastempfindung im Trommelfell beim Hören eines Differenztones Grund zu der Annahme gebe, daß der Differenzton im Trommelfell entstehe. Man findet in der Litteratur die Empfindung des Differenztones häufig so ausgedrückt, als fühle man ihn als Tastempfindung im Trommelfell. Aus der häufig vorkommenden Gleichzeitigkeit zweier Empfindungen ist man jedoch noch nicht berechtigt, zu schließen, daß sie in einem ursächlichen Zusammenhange ständen. Bei der Einwirkung mehrerer gleichzeitiger Wellen macht das Trommelfell verwickelte Bewegungen von ziemlich großer Amplitude, so daß es weiter nicht verwunderlich ist, wenn hier Tastempfindungen entstehen. Daß diese aber mit dem Differenztone nichts zu thun haben, kann man daraus ersehen, daß man bei Verschluss des äußeren Gehörganges nicht die geringste Empfindung im Trommelfell hat, den Differenzton aber doch hört. PREYER<sup>1</sup> behauptet zwar, „daß der Verschluss des äußeren Gehörganges mit dem Finger oder mit Watte die Wahrnehmung des Differenztones unmöglich macht, auch wenn die beiden primären Töne deutlich hörbar bleiben“. Ich kann diese Beobachtung jedoch in keiner Weise bestätigen, höre vielmehr bei festem Verschluss der äußeren Gehörgänge den Differenzton deutlich, und zwar bei Pfeifen sowohl wie bei Gabeln, wenn nur die Primärtöne so stark sind, daß sie überhaupt gehört werden. Ebenso sagt HERMANN:<sup>2</sup> „Viele Personen

<sup>1</sup> *Wiedemanns Ann.* 38. S. 131.

<sup>2</sup> *Pflügers Arch.* 49. S. 512.



ferner hören, wie ich zuerst an mir selbst bemerkte, bei Stimmgabeln auf Resonanzkästen, bei Pfeifentönen und erst recht bei der Doppelsirene (welche aber aus dem S. 501 angegebenen Grunde weniger beweisend ist) die Differenztöne ausgezeichnet, auch wenn beide Gehörgänge mit Baumwolle verstopft sind, die Trommelfelle also jedenfalls mehr in ihrer Mitwirkung beeinträchtigt sind, als andere Teile des Gehörorgans.“ Hierdurch ist das Hauptargument PREYERS für die Behauptung, daß die Differenztöne im Trommelfelle entstanden, hinfällig geworden. Ebenso wenig stichhaltig sind die übrigen Beweise, die PREYER anführt. Er untersuchte einen sehr intelligenten Jüngling, dem beiderseits das Trommelfell fehlte, und fand, daß dieser keine Differenztöne hörte. Beweisend wäre dieser Fall für PREYERS Ansicht nur dann, wenn PREYER hätte darlegen können, daß jeder andere Grund für das Nichthören der Differenztöne ausgeschlossen war. Interessant ist an dieser wichtigsten der von PREYER untersuchten Personen noch der Umstand, daß sie auch schnellere Schwebungen nicht zu hören vermochte. Nach PREYER soll bei einigen Personen der Ersatz des fehlenden Stückes des Trommelfelles durch eine dünne Wasserscheibe das Zustandekommen des Differenztones ermöglicht haben. HELMHOLTZ' Theorie der Kombinationstöne (getrennter Primärtöne) würde dadurch aber gar nicht gestützt werden, wie HERMANN bemerkt, da eine Wasserscheibe nicht den vorausgesetzten unsymmetrischen Bau hat.

Dazu kommt nun noch, daß von DENNERT<sup>1</sup> das Gegenteil von dem festgestellt worden ist, was PREYER gefunden zu haben glaubte. Hier wiegt nun, wie HERMANN mit Recht betont, ein einziger Fall, in welchem die Differenztöne trotz Trommelfelmangels gehört werden, Hunderte von negativen Fällen auf. DENNERT fand, daß Patienten ohne Trommelfell, auch solche ohne Trommelfell, Hammer und Ambos, mit nur erhaltenem Steigbügel, ebenfalls Differenztöne hörten.

Wir sehen also, daß die Voraussetzungen der mathematischen Theorie, daß die Amplitude der Schwingung ziemlich groß sei, und daß ein unsymmetrisch gebauter Körper in Schwingung gerate, gar nicht zuzutreffen brauchen und doch ein Differenzton entsteht. Nehmen wir nun trotzdem einmal

---

<sup>1</sup> *Arch. f. Ohrenheilkde.* 24. S. 173.

an, die Voraussetzungen von HELMHOLTZ' mathematischer Theorie könnten in gewissen Fällen vorhanden sein. Dann muß neben dem Differenzton auch noch der Summationston<sup>1</sup> entstehen. Und zwar hat der Differenzton vor dem Summationstone nur wenig voraus. Die Stärke der beiden Kombinationstöne wird

bestimmt durch die Koeffizienten  $\frac{uv}{m(p-q)^2-a}$  und  $\frac{uv}{m(p+q)^2-a}$ .<sup>2</sup>

Der Summationston wird also, wie HELMHOLTZ betont, gewöhnlich viel schwächer sein als der Differenzton. Aber es kann doch auch vorkommen, daß die Schwingungszahlen  $p$  und  $q$  der Primärtöne und die übrigen Konstanten in einem solchen Verhältnisse stehen, daß der Summationston nur wenig schwächer ist als der Differenzton. Trotzdem hat noch niemand den Summationston (bei getrennten Tonquellen) auch nur angenähert so stark gehört wie Differenztöne, von denen schon TARTINI sagt, sie kämen oft den Primärtönen an Stärke gleich. In einem Falle existiert der Summationston thatsächlich objektiv, wenn nämlich, wie bei HELMHOLTZ' Sirene oder beim Harmonium, ein gemeinsamer Windraum<sup>3</sup> vorhanden ist. Hier konnte HELMHOLTZ in Übereinstimmung mit der mathematischen Theorie den Summationston durch schwingende Membranen und Resonatoren als objektiv nachweisen. Dies ist aber trotz der sorgfältigsten Methoden bisher in keinem anderen Falle, in dem die Primärtöne getrennt erzeugt wurden, gelungen.

Bei Stimmgabeln behauptet APPUNN Summationstöne besonders dann gehört zu haben, wenn es sich um sehr große, über mehrere Oktaven sich erstreckende Intervalle handelte. Ich habe entsprechende Versuche angestellt und gefunden, daß man z. B. bei dem Intervall 1:8 den Ton 9 deutlich hört, aber nur, wenn die Gabeln so stark wie möglich tönten, und auch dann so schwach, daß seine Stärke in keinem Ver-

---

<sup>1</sup> Man könnte vielleicht denken, das ganze Problem sei zu vereinfachen, indem man nur nach einer Erklärung der Differenztöne sucht und die Summationstöne als Differenztöne höherer Teiltöne auffaßt, was ja rein zahlenmäßig möglich ist. Wo man jedoch einen Summationston überhaupt hört, da ist er manchmal so stark (wie bei der im Folgenden erwähnten Wellensirene), daß seine Ableitung aus den (viel schwächeren) in Frage kommenden Obertönen von vornherein unmöglich erscheint.

<sup>2</sup> HELMHOLTZ, *Tonempfindung*. 4. Aufl. S. 651.

<sup>3</sup> Gegen die für diesen Fall von HELMHOLTZ gegebene mathematische Theorie dürfte sich nichts einwenden lassen.



hältnisse steht zu der, in der die Differenztöne zur Empfindung zu gelangen pflegen. Man hörte 9 am besten dann, wenn man das Ohr nahe an die Öffnung des Resonanzkastens der tieferen Gabel hielt. Ferner gaben die Töne 800 und 150 den Summationston 950. Auch bei einem kleineren Intervalle, 2:3, habe ich mich von der Existenz eines schwachen Summationstones 5 überzeugt. In allen Fällen aber war maximale Stärke der Primärtöne erforderlich. Sobald die Gabeln auch nur wenig schwächer tönnten, war der Summationston verschwunden. PREYER behauptet ebenfalls in der bereits oben erwähnten Abhandlung,<sup>1</sup> einen wirklichen Summationston gehört zu haben, wenn die Gabeln sehr stark gestrichen wurden. Da nun die hier in Betracht kommenden Beobachter sämtlich keine Trommelfelldefekte besitzen, so ist es wahrscheinlich, daß in der That auch im Trommelfelle HELMHOLTZ' Berechnung entsprechend bei sehr starken Primärtönen ein sehr schwacher Summationston und ein der Formel gemäß wenig stärkerer Differenzton entstehen. Durch diese Annahme sind jedoch die Bedenken durchaus nicht widerlegt, die im Obigen dagegen gemacht wurden, die gewöhnlichen, den Primärtönen an Stärke nahekommenden Differenztöne durch die von HELMHOLTZ entwickelte Theorie für erklärt zu halten.

Gegen das objektive Vorhandensein der Kombinationstöne im Luftraume bei voneinander unabhängigen Tonquellen sprechen die äußerst sorgfältigen und genauen Untersuchungen von WIEN<sup>2</sup> und in letzter Zeit von RÜCKER und EDSE,<sup>3</sup> die mit den feinsten Methoden bei Stimmgabeltönen nichts von der objektiven Existenz solcher Schwingungen nachweisen konnten, die einem Differenz- oder Summationstone entsprochen hätten, obwohl der Differenzton sehr stark zu hören war.

Eine merkwürdige Beobachtung konnte ich kürzlich machen bei Gelegenheit von Versuchen, die Herr Prof. STUMPF an einer kleinen KÖNIGSchen Wellensirene anstellte. Es zeigte sich, daß bei dem Intervall 8:11 der Summationston 19<sup>4</sup> der stärkste der hörbaren Töne war, während von Differenztönen nur 5

<sup>1</sup> *Wiedemanns Ann.* 38. S. 135.

<sup>2</sup> *Wiedemanns Ann.* 36. S. 853.

<sup>3</sup> *Philos. Mag.* 39. XXXIII.

<sup>4</sup> Daß es wirklich der Ton 19 war, wurde durch eine größere Zahl von Vergleichen sicher festgestellt.



und 3 sehr schwach zu hören waren. Man kann jedoch hieraus keine weitreichenden Schlußfolgerungen ziehen, da, wie schon HERMANN bemerkt hat, die Wellensirene keineswegs Luftwellen erzeugt, die mit der Gestalt der Kurve übereinstimmen.

Bereits in einer früheren Anmerkung wurde erwähnt, daß eine allgemeine Ableitung des Summationstones als Differenztones höherer Teiltöne unmöglich ist. Hier bleibt noch zu bemerken, daß auch die Ableitung  $m + n = 2m - (m - n)$  zurückgewiesen werden muß. Bei der Wellensirene war  $m - n = 3$  viel schwächer, als  $m + n = 19$ .  $2m = 22$  war allerdings ziemlich stark; aber der Summationston blieb auch dann sehr gut hörbar, wenn  $2m$  durch Interferenz vollständig ausgelöscht war.

Nach VOIGTS mathematischer Ableitung,<sup>1</sup> der die lineare Differentialgleichung zu Grunde gelegt ist, bei der also eine ungestörte Superposition der Schallwellen angenommen ist, würde man auch bei schwachen Tönen und ohne Trommelfell Differenz- und Summationstöne hören, wenn man voraussetzt, daß das Ohr jede Periodik als Ton empfindet, was aber in der hier angenommenen Form auf Schwierigkeiten stößt und mit der Hypothese mitschwingender Teilchen im Widerspruche steht, da diese nach den Gesetzen der Mechanik nur durch wirkliche physikalische Töne zum Mitschwingen gebracht werden und nicht durch eine beliebige Periodik von derselben Frequenz. Wenn auch VOIGTS Voraussetzungen richtig wären, so muß er doch zugeben:<sup>2</sup> „Selbst bei den im Obigen gemachten, wie wir sehen werden, günstigen Annahmen erscheint ihre (der Kombinationstöne) Beobachtung, im Falle die primären Töne das Intervall der Oktave, Quinte, Quarte und Terz besitzen, fast ausgeschlossen, bei großer Sexte und Duodezime sehr fraglich.“ Auch diese Behandlung der Sache führt uns also nicht weiter.

Wir kommen demnach in Übereinstimmung mit HERMANN'S<sup>3</sup> ausführlicher Kritik der HELMHOLTZschen Theorie der Kombinationstöne zu folgendem Ergebnis: Wenn zwei Tonquellen von demselben Windraume aus angeblasen werden, so entstehen Kombinationstöne. Ebenso ist es möglich, daß im Trommel-

<sup>1</sup> *Wiedemanns Ann.* 40.

<sup>2</sup> S. 657.

<sup>3</sup> *Pflügers Arch.* 49.

felle Kombinationstöne entstehen. Trotzdem vermag HELMHOLTZ' Theorie der Kombinationstöne den Thatsachen nicht vollständig gerecht zu werden. Die beim gleichzeitigen Erklängen zweier Töne oft so mächtig auftretenden Differenztöne müssen wir auf eine andere Weise zu erklären suchen. Wir werden finden,<sup>1</sup> daß dies ohne besondere Schwierigkeiten durchzuführen ist, wenn man eine etwas andere Art der Entstehung einer Tonempfindung voraussetzt, als die von HELMHOLTZ angenommene, die zwar von nicht zu unterschätzender Bedeutung war, insofern sie zuerst eine für die allgemeinen Erscheinungen des Tongebietes ausreichende Erklärung abzugeben vermochte, die aber doch nicht im stande ist, die zahlreichen schwierigen Fragen zu beantworten und die verwickelten Erscheinungen zu deuten, die sich aus den akustischen Beobachtungen der neuesten Zeit ergeben haben.

## II. Besonderes über Differenztöne.

Zunächst möchte ich noch auf zwei Arten von Differenztönen (mit denen wir uns von nun an allein noch beschäftigen) näher eingehen, nämlich auf solche, deren Schwingungszahl zwischen den Schwingungszahlen der Primärtöne liegt, und zweitens auf diejenigen Differenztöne, deren Schwingungszahl nicht der Differenz der Schwingungszahlen der Primärtöne entspricht. Das Vorhandensein zwischenliegender Differenztöne ist vielfach geleugnet worden. Selbst ein so ausgezeichnete Beobachter wie KÖNIG<sup>2</sup> vermochte bei zwei Tönen des Verhältnisses 4:9 keine Spur des Tones  $9 - 4 = 5$  zu hören. Im Anhang möchte ich auf einen theoretischen Grund dafür hinweisen, daß zwischenliegende Differenztöne nur unter ganz besonders günstigen Umständen und auch dann nur sehr schwach auftreten können. Hörbar jedoch sind auch solche Differenztöne, wenn auch eben nicht leicht. Ich habe mich bei zwei Stimmgabeltönen des Verhältnisses 3:8 von der Hörbarkeit des Differenztones  $8 - 3 = 5$  überzeugt. Ebenso versicherte Herr Prof. STUMPF bei Geigentönen<sup>3</sup> zwischenliegende Differenz-

<sup>1</sup> S. Anhang.

<sup>2</sup> *Poggend. Ann.* 157.

<sup>3</sup> Bei  8, 5, 3, dagegen nicht  9; ebensowenig  9, (5), 4

bei Pfeifen.

töne, und zwar auch solche, die nicht von Obertönen hergeleitet werden können, unzweifelhaft, wenn auch nur schwach gehört zu haben. Bei den Primärtönen 3 und 8 hat auch KÖNIG den Differenzton 5 gehört.

Vor einem Irrtume muß allerdings bei der Beobachtung zwischenliegender Differenztöne gewarnt werden. Wenn man z. B. Primärtöne benutzt, deren Verhältniszahlen 2 und 5 sind, so wird man leicht den Ton 3 zu hören glauben, weil man den Oberton 6 wirklich hört und diesen in die tiefere Oktave transponiert. Andererseits könnte der Ton 3 auch wirklich entstehen, nämlich als Differenzton des Tones 5 und des Obertones 8. Bei den Primärtönen 3 und 7 hört man den Differenzton  $9 - 7 = 2$ ; und da er nicht sehr stark ist, muß man sich versehen, daß man ihn nicht mit 4, den ich bei Gabeln in diesem Falle nicht herauszuhören vermochte, verwechselt, zumal da man auch noch den Ton  $7 - 6 = 1$  hört. Es ist jedoch zu bemerken, daß gerade bei dem Verhältnis  $3:8$ , wo der Differenzton 5 sicher festgestellt ist, ein derartiger Irrtum als ausgeschlossen gelten kann. Die Obertöne  $9.3$  und  $4.8$  dürften hier wohl nicht als die Ursache des Tones 5 angesehen werden.

(Anmerkung. Ich will hier noch eine Beobachtung anknüpfen, die mir aufgefallen ist. Es ist eine bekannte Thatsache, daß laut tönende Stimmgabeln tiefer erscheinen als leise von derselben Schwingungszahl. Dasselbe kann man auch bei den Differenztönen beobachten. Schlägt man zwei Gabeln stark an und läßt sie ausschwingen, so werden nicht nur die Gabeltöne, während sie leiser werden, zugleich höher, sondern auch der Differenzton wird in derselben Weise wie die Gabeltöne leiser und höher.)

Daß die am stärksten hervortretenden Differenztöne durchaus nicht immer der Differenz der Schwingungszahlen der Primärtöne entsprechen, ist eine ebenso bekannte wie bisher unerklärbare<sup>1</sup> Thatsache. Bei den Tönen des Verhältnisses  $5:8$  hört man, wenn 5 gleich stark oder etwas stärker ist als 8, nur bei großer Übung im Heraushören sehr schwach den Ton 3, sehr stark dagegen den Ton 2. Ändert man nun das Stärkeverhältnis so, daß 8 überwiegt, so tritt 2 zurück, und der Ton 3 tritt stärker hervor. Einen Versuch, diese bisher noch wenig beachtete Abhängigkeit der Stärke der verschiedenen Differenztöne von der relativen Stärke der Primär-

---

<sup>1</sup> S. IV. Teil, wo eine Erklärung dieser Thatsache angedeutet ist.



töne zu erklären, habe ich nicht finden können. Ich selber war ursprünglich der Meinung, die Obertöne seien die Ursache der erwähnten Verschiedenheiten.

{ I	9	14	5	4	391	608
{ II	9	13	4	5	391	565
{ I	7	11	4	3	387	609
{ II	7	10	3	4	387	552
{ I	8	13	5	3	500	813
{ II	8	11	3	5	500	688
{ I	11	17	6	5	495	765
{ II	11	16	5	6	495	720

In der nebenstehenden Tabelle bezeichnen in jeder Reihe die beiden ersten Zahlen rechts vom Striche das Verhältniß der Primärtöne. Die beiden folgenden sind die Verhältniszahlen des primären ( $m - n$ ) und des sekundären ( $2n - m$ )

Differenztones. Die beiden letzten Zahlen sind die Schwingungszahlen der zu den Versuchen gebrauchten Stimmgabeln. Die mit I und II bezeichneten untereinanderstehenden Reihen gehören immer insofern zusammen, als sie dieselben Differenztöne enthalten, nur so, daß der primäre Differenzton der einen Reihe der sekundäre der anderen ist. Schlägt man nun die Gabeln einer der mit I bezeichneten Reihen so an, daß sie gleich stark ertönen (oder besser, daß sie das zum Hören des Differenztones günstigste Verhältniß haben), so hört man sehr gut den eigentlichen Differenzton, während der sekundäre, obwohl er der tiefere ist, sich nur schwach bemerkbar macht. Schlägt man nun die tiefere Gabel stark an, so tritt sofort der sekundäre Differenzton hervor und verdrängt gewissermaßen den höheren eigentlichen Differenzton. Schlägt man beide Gabeln abwechselnd in Intervallen von etwa 1 oder 2 Sekunden an, so tritt jedesmal beim Anschlagen der tieferen der tiefere Differenzton, beim Anschlagen der höheren Gabel der höhere Differenzton hervor, und man gewinnt fast den Eindruck, als schlage man zwei Gabeln, deren Eigentöne die betreffenden Differenztöne sind. Das Entgegengesetzte geschieht bei den Reihen II. Bei gleich starken Tönen der beiden Gabeln hört man den tieferen (primären), bei überwiegender Stärke des tieferen Gabeltons den höheren (sekundären) Differenzton. Bei abwechselndem Schlagen beider Gabeln tritt dieselbe Erscheinung des abwechselnden Hervortretens der Differenztöne ein.

Die einfachste Erklärung des Differenztones ( $2n - m$ ) ist ja freilich die, daß man sagt, der Differenzton erster Ordnung bilde mit dem tieferen Primärtone einen neuen Differenzton. In der That ist dies aber gar keine Erklärung. Denn warum soll derselbe Primärton zweimal zur Wirkung kommen? Wie

erklärt es sich, daß der schwache, kaum hörbare Differenzton mit dem starken Primärtone einen starken neuen Differenzton bildet, während sonst bei annähernd gleicher Stärke der erzeugenden Töne die stärksten Differenztöne zu stande kommen? Es ist unmöglich, anzunehmen, daß der Differenzton zweiter Ordnung (vorausgesetzt, daß er wirklich von dem erster Ordnung hervorgebracht werde) gerade dann am stärksten, wenn der erster Ordnung am schwächsten, und gerade dann am schwächsten sein müsse, wenn der Differenzton erster Ordnung am stärksten ist. Warum bringt schließlich der Differenzton erster Ordnung nicht auch mit dem höheren der Primärtöne einen starken neuen Differenzton hervor, der dann, da er die gleiche Höhe hat, den tieferen Primärton verstärken müßte? Letzterer wird jedoch beim Zusammenklang durchaus nicht verstärkt, im Gegenteil geschwächt<sup>1</sup> gehört. Alle diese Fragen bleiben bei dieser Erklärung offen. Man könnte nun, wie schon erwähnt, den Oberton des tieferen Primärtones für die Ursache des Differenztones ( $2n - m$ ) halten. Wir würden dann Folgendes sagen: Tönen beide Gabeln gleich stark, so hört man den primären Differenzton. Schlägt man die tiefere Gabel an, so wird das Stärkeverhältnis zu Ungunsten des primären, aber zu Gunsten des sekundären Differenztones geändert, denn nun haben der höhere Gabelton und der erste Oberton der tieferen Gabel das erforderliche Stärkeverhältnis. Schlägt man nun wieder die höhere Gabel, so wird wieder der primäre Differenzton begünstigt und so fort.

Ich versuchte nun die Frage, welchen Einfluß die Obertöne auf das Zustandekommen der verschiedenen Differenztöne haben, experimentell dadurch zur Beantwortung zu bringen, daß ich die Obertöne durch Interferenz vernichtete. Der Hoffnung, auf andere Weise mit einfachen Tönen arbeiten zu können, darf man sich voraussichtlich nicht hingeben; die bisherigen Mittel zur Hervorbringung von Tönen gestatten uns wenigstens nicht die direkte Erzeugung einfacher Töne. Namentlich darf man sich nicht unbedingt darauf verlassen, durch Stimmgabeln einfache Töne zu erzielen. Gerade durch Interferenzversuche ist leicht festzustellen, wie stark selbst Stimmgabeln auf Resonanzkästen den zweiten Teilton geben.

---

<sup>1</sup> STUMPF, *Tonpsychologie*. II. 418.



Nach vielen vergeblichen, weil keine ganz sichere Entscheidung erlaubenden Versuchen erwies sich endlich die folgende Anordnung als brauchbar. Die Tonquellen und der Beobachter befanden sich in verschiedenen Zimmern, die durch eine starke Wand voneinander getrennt waren, so daß man bei Verschluss der Röhrenleitung nur noch eine ganz unbedeutende Spur der — an sich recht starken — Töne hören konnte. Als Tonquellen dienten angeblasene Flaschen. Die gesamte Klangwelle wurde nun zunächst durch die Wand und dann durch einen verstellbaren Interferenzapparat geleitet. Die zur Leitung benutzten Röhren hatten sämtlich 2 cm Durchmesser. Die größte Schwierigkeit bestand in der Erzielung vollständiger Auslöschung eines Tones. So bekannt die Erscheinung ist, daß interferierende Töne sich schwächen, so unbekannt waren bisher die Bedingungen, um diese Thatsache zu ähnlichen Zwecken, wie dem vorliegenden, nutzbar zu machen. Für wenig empfehlenswert halte ich die Herstellung der Interferenz durch Ansatz eines verschlossenen Röhrenstückes von einer viertel Wellenlänge an das Leitungsrohr. Da die reflektierte Welle stets schwächer ist als die durchgehende, so ist an eine vollständige Auslöschung des Tones in diesem Falle nicht zu denken. Ich habe bei meinen Versuchen die andere Methode angewandt, bei der der Ton geteilt und mit einer halben Wellenlänge Phasenunterschied wieder vereinigt wird. Man findet in den meisten Lehrbüchern der Physik die Angabe, daß dann der Ton vernichtet werde. Wenn man aber den Versuch macht, so bemerkt man gewöhnlich nur eine Abschwächung, manchmal sogar eine Verstärkung gerade dann, wenn der Ton bei einer halben Wellenlänge Unterschied der Leitungen vernichtet sein soll. Namentlich zeigte sich die Unvollkommenheit der angeblichen Vernichtung dann, wenn sehr starke Töne benutzt wurden, und dies war bei meinen Versuchen erforderlich, um die Differenzttöne vollkommen deutlich hören zu können, da die Töne durch die bloße Röhrenleitung schon sehr geschwächt werden. Es gelang mir jedoch schließlich, herauszufinden, unter welchen Bedingungen eine vollständige Auslöschung des Tones erzielt werden kann. Zu dieser genügt jedenfalls nicht, daß die Leitungen sich um eine halbe Wellenlänge unterscheiden. Es ist notwendig, daß beide Teilleitungen und außerdem auch das Zuleitungsrohr durch



Züge beliebig lang gemacht werden können. Um nämlich einen Ton zu vernichten, ist es erforderlich, daß in dem Apparate keine fortschreitenden, sondern nur stehende Wellen dieses Tones enthalten sind, und daß die Höröffnung sich an einer Stelle der Röhrenleitung befindet, wo die stehenden Wellen einen Bauch haben. (Ob auf ähnliche Weise auch ein Interferenzapparat der anderen Art leistungsfähiger gemacht werden kann, habe ich nicht versucht.) Die Wirkung des Apparates wird durch die nebenstehende Skizze angedeutet. Die Kreise sollen Knoten bezeichnen, also Stellen, wo Luftdruckänderungen, die Pfeile Bäuche, also Stellen, wo Luftbewegungen, aber keine Druckänderungen stattfinden. Die Zuleitungsröhre ist in der

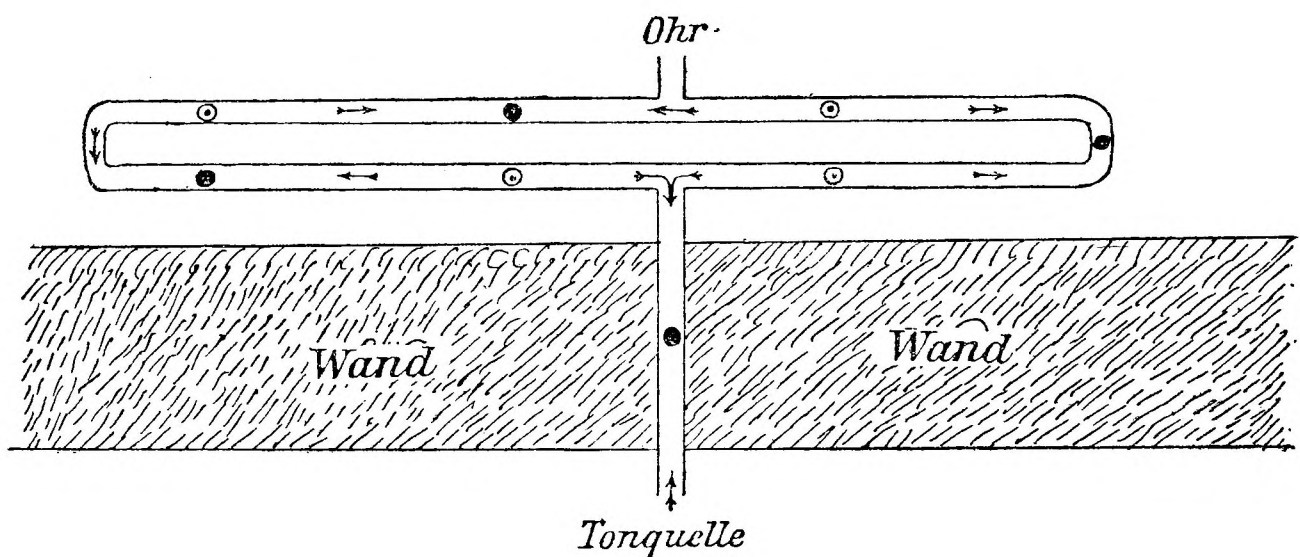


Fig. a.

Zeichnung eine halbe Wellenlänge des zu vernichtenden Tones lang genommen. Sie kann natürlich jedes beliebige Vielfache einer halben Wellenlänge sein. Bei meinen Versuchen betrug die Länge der Zuleitungsröhre, da sie durch eine dicke Wand führte, gewöhnlich drei halbe Wellenlängen. Die eine Teilleitung muß  $n$ , die andere  $n-1$  halbe Wellenlängen lang gemacht werden. Bei der Abstimmung wird der Apparat ungefähr auf die vorher bestimmten Längen gebracht und dann, da sich die Ausmessungen schwer genau genug machen lassen, durch geringe Verschiebungen der Röhren auf die beste Lage eingestellt, was allerdings wegen der dreifachen Verschiebungen etwas mühsam ist. Die von der Tonquelle ausgehenden Wellen des Tones, auf den der Apparat abgestimmt ist, gehen nun nicht hindurch, sondern verursachen in den Röhren stehende Wellen. Ob die Höröffnung offen oder verschlossen ist — bei den Ver-

suchen war sie stets offen, da das Ohr nur in die Nähe gehalten wurde —, ist dabei gleichgültig, da sich an dieser Stelle ein Bauch befindet und keine Wirkung nach außen hin möglich ist. Absolut richtig wäre dies allerdings nur dann, wenn die Höröffnung sehr schmal wäre, da bei einer Öffnung von endlicher Größe doch Druckschwankungen sich bemerkbar machen müssen. Aber diese sind so gering, daß man bei genauer Einstellung des Apparates nur bei sehr starken Tönen noch eine Spur hören kann, die jedoch das Versuchsergebnis nicht mehr zu beeinflussen vermag. Die Töne, auf die der Apparat nicht abgestimmt ist, gehen natürlich wie durch jede Leitung hindurch. Hält man es für nötig, obwohl der Apparat bei genauer Abstimmung ausgezeichnet funktioniert, zweimalige Interferenz desselben Tones anzuwenden, so wird der zweite Apparat ebenso behandelt wie der erste, und das Verbindungsrohr beider als Zuleitungsrohr angesehen. Natürlich kann man auch zwei miteinander verbundene Apparate auf zwei verschiedene Töne abstimmen. Jedoch wirkt der zweite Apparat gewöhnlich nicht ganz so gut wie der erste, aber seine Wirkung reicht doch zu den meisten Versuchen aus.

Es wurden nun drei Flaschen abgestimmt auf die Töne 5, 8 und 10 (in absoluter Tonhöhe einmal 300, 480, 600, ein andermal 250, 400, 500). Von Wichtigkeit ist, daß bei diesen Versuchen der Ton 5 recht stark genommen wird, da der Versuch sonst nicht leicht gelingt. Der Ton 10 wurde dazu benutzt, um die Wirkung des Interferenzapparates gegen jeden Zweifel sicher zu stellen. Wenn die Töne 8 und 10 allein ertönten und der Apparat nicht in Wirkung war, so hörte man natürlich auch den Differenzton 2. Sobald der Apparat auf Interferenz eingestellt wurde, verschwand 2 vollständig, und von 10 blieb nur die ganz geringe Spur übrig, die man bei angespannter Aufmerksamkeit stets durch die Wand hören kann. Da nun der selbständige Ton 10 sicher viel stärker war als der zweite Teilton von 5, und trotzdem der Differenzton 2 völlig verschwand, so dürften alle Einwendungen gegen den folgenden Versuch abgeschnitten sein. Sobald 5 und 8 ertönten, hörte man sowohl, wenn der zweite Teilton von 5 im Klange enthalten, als auch, wenn er durch Interferenz vernichtet war — im letzteren Falle nur sehr wenig schwächer —, den Differenzton 2. Es ist damit bewiesen, daß die Töne 5 und 8 auch ohne Obertöne

den Differenzton 2 erzeugen, ohne daß damit geleugnet werden sollte, daß das Vorhandensein des zweiten Teiltones eine Verstärkung von 2 bewirken könne.

Ich möchte hier eine Bemerkung anschließen. TARTINI<sup>1</sup> erwähnt gleich in seinen ersten Angaben über die Differenztöne auch das Intervall 5:8 und giebt dort als Differenzton nur 2 an. Daß dieser, weil der erste, noch ganz unbefangene Beobachter, 2 und nicht 3 angiebt, kann als ein deutlicher Hinweis angesehen werden, daß 2 und nicht 3 der Hauptdifferenzton — d. h. der am stärksten und gewöhnlich auftretende — ist, daß also jede Theorie, die den Differenztönen gerechnet werden werden will, 2 und nicht 3 als stärksten Differenzton bei dem Intervall 5:8 ergeben muß, und daß daher eine solche Theorie sehr bedenklich ist, die für den Ton 2 einen anderen Ton 3 verantwortlich machen will, den man in den meisten Fällen so gut wie gar nicht hört. Wir werden im Anhang noch einmal darauf zurückkommen.

Ich will hier noch die Thatsache erwähnen, daß wir bei den Differenztonbeobachtungen häufig den tiefsten Differenzton bis zu einem halben Tone zu hoch hörten.

Eine Reihe von fernerer Beobachtungen, bei denen ich von den Herren HENNIG, HEYFELDER, MICHAELIS in der lebenswürdigsten Weise unterstützt wurde, führten zu den folgenden Ergebnissen. Als Tonquellendienten auf Resonanzkästen stehende Stimmgabeln, bei denen mit unbewaffnetem Ohre kein Oberton gehört werden konnte. Beim Intervall 4:5<sup>2</sup> hörte man 1 sehr stark, schwächer 3, außerdem aber deutlich, wenn auch sehr schwach, den Ton 6, wenn 5 sehr stark tönte. Dasselbe giebt Herr Prof. STUMPF an, bei Flötenpfeifen gehört zu haben.

Bei 5:6 traten die Differenztöne 1, 3 und 4 auf. Ferner glaubten wir, deutlich den Ton 7 zu hören. Auch Herr Prof. STUMPF hat an Flötenpfeifen beim Intervall 5:6 den Ton 7 gehört.<sup>3</sup>

Bei 4:7 waren, wenn 7 stärker tönte als 4, sehr gut 6

---

<sup>1</sup> *Trattato di musica*. S. 15.

<sup>2</sup> Die bei den Versuchen benutzten Töne sind die entsprechenden Hunderter.

<sup>3</sup> Bei  $fs' + a'$ .



und etwas schwächer 5 zu hören; wenn 4 stärker tönte, so machte sich 3 mehr bemerkbar. Außerdem hörten wir stets 1.

Das Intervall 6:7 ergab 5, 4, 1.

Bei 7:8 waren 6, 5 und 1 sicher zu hören. Der Ton 4 schien Herrn HENNIG manchmal ganz kurze Zeit aufzutauchen.

8:9 liefs 7, 6, 5 und 1 hören. Herr Prof. STUMPF hat in diesem Falle 7, 6, 1 (1 schwach) gehört bei den Gabeln  $f^3 + g^3$  oder  $h^2 + cis^3$ . Hohe Gabeln sind zu diesen Versuchen überhaupt nützlich.

Bei 9:10 waren 7, 6 und 1 stark; 8 deutlich, wenn 9 und 10 sehr schwach waren.

Bei 16:17 konnte ich aufser 1 nur 10 und 12 feststellen. 11, 13, 14, 15 mögen vorhanden gewesen sein, konnten aber nicht mit Sicherheit herausgehört werden. Dagegen machte sich der bei sehr kleinen Intervallen stets auftretende Zwischenton<sup>1</sup> bemerkbar.

Läfst man zwei der oben angegebenen zusammengehörigen, mit I und II bezeichneten Zusammenklänge, in denen die gleichen Differenztöne enthalten sind, gleichzeitig erklingen, aber so, daß die in den beiden ersten senkrechten Reihen der Tabelle angegebenen Verhältnisse nicht genau stimmen, so hört man beide Differenztöne mit derselben Deutlichkeit wie zwei nicht ganz übereinstimmende Primärtöne schweben, was, wie wir noch sehen werden, als Argument gegen HERMANN'S Erklärung der Entstehung der Differenztöne von Wichtigkeit ist. Man kann sich nun die Frage vorlegen, ob zwei Differenztöne, da sie ja Schwebungen bilden, auch einen neuen Differenzton erzeugen können. Dies ist etwas Anderes als die vorher betrachtete Annahme, daß der Differenzton mit einem der ihn erzeugenden Töne einen neuen (sekundären) Differenzton bilden könne. Zur Untersuchung dieser Frage benutzte ich die drei Stimmgabeltöne 2048, 1920 und 1707. Die ersten beiden allein lassen den Differenzton 128 hören, die beiden letzten 213, der erste und dritte den Differenzton 341. Streicht man jedoch alle drei Gabeln gleichzeitig an, so hört man — wozu allerdings einige Übung erforderlich ist — einen tieferen Differenzton, den ich durch Vergleich mit objektiven Tönen als 85 feststellte. Dies ist nun in der That die Differenz von 213 und 128. Also ist die oben aufgeworfene Frage entschieden zu bejahen.

<sup>1</sup> STUMPF, *Tonpsychologie*, II. S. 480.

Ebenso wie zwei Differenztöne untereinander sowohl Schwebungen, als auch einen neuen Differenzton erzeugen können, hört man auch Schwebungen und einen neuen Differenzton, wenn zu einem bereits vorhandenen Differenztone eine objektive Tonwelle von nicht zu weit entfernter Schwingungszahl hinzutritt. Man ersieht dies aus folgendem Versuch. Die Gabeln 1920 und 1707 werden möglichst stark gestrichen. Man hört dann den Differenzton 213. Wenn aber gleichzeitig die Gabel 200 leise tönt, so hört man deutlich 13 Schwebungen. Ebenso geben die Gabeln 2048 und 1920 den Differenzton 128, und wenn gleichzeitig die Gabel 120 tönt, so hört man 8, tönt die Gabel 125, so hört man 3 Schwebungen. Die Gabeln 1920 und 1365 geben den Differenzton 555. Streicht man gleichzeitig die Gabel 750 an, so hört man den neuen Differenzton 195. Daß dieser auf die angegebene Art und nicht etwa anders entsteht, kann man leicht daran erkennen, daß er sofort verschwindet, wenn man eine der höheren Gabeln dämpft. Läßt man zu der Klangmasse nun noch leise die Gabel 200 hinzutreten, so hört man deutlich die 5 Schwebungen des von einem Differenz- und einem objektiven Tone erzeugten Differenztones 195 mit dem objektiven Tone 200.

### III. HERMANNS Mittelton, Variationstöne und Anderes.

HERMANN<sup>1</sup> hat das Verdienst, zuerst nachdrücklich<sup>2</sup> auf das Unzulängliche von HELMHOLTZ' Theorie der Kombinationstöne hingewiesen zu haben. Die hauptsächlichsten Ergebnisse seiner Untersuchung vom Jahre 1891 kann man wohl kurz in folgenden Sätzen aus HERMANNS Abhandlung zusammenfassen: „Es bleibt folglich nichts anderes übrig, als . . . . dem Ohre die Eigenschaft zuzuschreiben, jede Art von Periodik innerhalb gewisser Frequenzgrenzen mit einer Tonempfindung zu beantworten. Wir müssen . . . . darauf verzichten, den Modus, wie es kommt, daß ein bestimmter Ton ausschließlich oder vorzugsweise eine bestimmte Nervenfasern erregt, schon jetzt zu erklären. Der physikalische Erklärungsversuch hat sich, wie

<sup>1</sup> *Pflügers Arch.* 49. S. 499.

<sup>2</sup> Mehr oder weniger begründete Einwände haben freilich Andere schon früher gemacht, namentlich DENNERT.

schon öfter in physiologischen Dingen, als verfrüht erwiesen.<sup>1</sup> Die dem Prinzip der spezifischen Energie entsprechende Annahme, daß die verschiedenen Töne auf Erregung verschiedener Nervenfasern beruhen, bleibt übrigens unangetastet.“ Sehr befriedigend sind diese Ergebnisse nicht. Die KÖNIGSche Ausdrucksweise, daß das Ohr jede Periodik als Ton empfinde, ist zwar eine kurze, passende Bezeichnung des Thatsächlichen; aber zum Verständnis der physikalisch-physiologischen Vorgänge kann sie in dieser allgemeinen Fassung nichts beitragen. HERMANN hat daher diesen Gegenstand weiter untersucht.<sup>2</sup> Während er in der früheren Abhandlung gegen die HELMHOLTZsche Resonatorenhypothese sehr große Bedenken geltend gemacht hatte, hält er jetzt entschieden an ihr fest, nachdem er sie freilich stark modifiziert und erweitert hat. An der spezifischen Energie hält er noch insofern fest, als jede Nervenzelle sich eine ihrem Resonator entsprechende Eigenperiode habe angewöhnen müssen. Es ist nun unsere nächste Aufgabe, experimentell zu prüfen, ob und wie weit die von HERMANN gemachten Voraussetzungen und die sich aus seiner Hypothese ergebenden Folgerungen mit den Thatsachen übereinstimmen.

### Der Mittelton.

HERMANN geht davon aus, daß bei der Interferenz zweier gleich starker (d. h. von gleicher Amplitude) Töne die resultierende Kurve aus einer Reihe von Schwingungen zusammengesetzt ist, in welchen die Gleichgewichtslage in genau gleichen Intervallen durchlaufen wird, während die Gipfel nicht genau in der Mitte zwischen zwei Durchgängen stehen und die Bewegung keine genau pendelartige ist. Schon KÖNIG<sup>3</sup> hat darauf aufmerksam gemacht, daß eine solche Wellenreihe Ähnlichkeit habe mit der eines Tones, dessen Schwingungszahl das arithmetische Mittel der Zahlen der beiden in Frage kommenden Töne ist. Er hat für diesen hypothetischen Ton die Bezeichnung „son moyen“ gewählt; HERMANN nennt ihn Mittelton. Ein Blick auf die resultierende Kurve<sup>4</sup> zeigt, daß dieser Ton

<sup>1</sup> Daß vielleicht doch noch eine physikalische Erklärung möglich ist, habe ich im IV. Teil auseinandergesetzt.

<sup>2</sup> *Pflügers Arch.* 56. S. 485.

<sup>3</sup> *Expériences d'acoustique.* S. 143.

<sup>4</sup> Fig. 5 in HERMANN'S Abhandlung.



jedesmal dort, wo die Amplitude ein Minimum ist, die Phase wechselt. KÖNIG<sup>1</sup> hat experimentell gezeigt, daß, wenn man auf künstlichem Wege eine Luftwelle erzeugt, die der von zwei nicht zu weit voneinander entfernten Tönen gleicht, man in der That diese beiden Töne hört. Dies ist eine interessante Bestätigung der HELMHOLTZschen (eigentlich OHMSchen) Zerlegungshypothese, aber weiter auch nichts. Daß KÖNIG den sogenannten Mittelton auch noch hörte, ist nicht wunderbar, denn die mit KÖNIGS Sirene erzeugte Luftwelle enthält eben auch die dem sogenannten Mittelton entsprechende Partialwelle. Ganz etwas Anderes ist es jedoch mit HERMANNs Behauptung, daß beim Zusammenklange zweier Töne neben diesen auch noch der Mittelton gehört werden könne. HERMANN hat Versuche in Bezug hierauf mit acht KÖNIGSchen Stimmgabeln  $c^1$  bis  $c^2$  angestellt. „In vielen Fällen wurde in der That ein Ton von der erwarteten, dem Hörer meist vorher unbekannten Höhe angegeben.“ Daß dieser Mittelton nicht allgemein gehört wurde, macht die Sache schon sehr bedenklich. Was hat es z. B. für eine Beweiskraft, wenn bei den Primärtönen  $c^1$  und  $c^2$  angeblich der Mittelton  $g^1$  oder bei den Primärtönen  $c^1$  und  $g^1$  angeblich der Mittelton  $e^1$  gehört wurde.  $g^2$  und  $e^3$  sind ja in der That als Obertöne im Klange enthalten und könnten wohl einen Irrtum herbeigeführt haben.<sup>2</sup>

HERMANN scheint nach seiner Darstellung selbst nicht ganz von der Richtigkeit der Sache überzeugt gewesen zu sein. Jedenfalls ist es eine etwas gewagte Behauptung, daß die Resonatoren im Ohre durch den Mittelton erregt würden. Diese Resonatoren müßten — wie HERMANN selbst bemerkt — von ganz anderer Art sein, als die sonst der Physik bekannten. An der HELMHOLTZschen Zerlegungshypothese hält HERMANN entschieden fest, nur meint er, die Resonatoren brauchten nicht als mechanisch-elastische Gebilde aufgefaßt zu werden, sondern könnten nervöse Gebilde von bestimmten Eigenschaften sein. S. 497 spricht HERMANN ganz klar aus und führt noch Analogien dafür an, daß er sich die fraglichen nervösen Vorgänge durchaus nach den Gesetzen der Elastizität denkt.

---

<sup>1</sup> *Expériences d'acoustique*. S. 144.

<sup>2</sup> Vorsichtsmaßregeln, um diesen Fehler zu vermeiden, erwähnt HERMANN nicht.

Dann aber besteht die Zerlegungshypothese eben darin, daß man annimmt, das Ohr zerlege jede beliebige Welle in Sinusschwingungen. Nach HERMANN aber muß man annehmen, daß es solche Resonatoren gebe, die nach Sinusschwingungen zerlegen, und solche, die nach gewissen anderen Schwingungen zerlegen. Denn sonst wäre es physikalisch überhaupt nicht denkbar, daß der Mittelton, dessen Schwingung keine pendelartige ist („keine genau pendelartige“, sagt HERMANN; aber die Ungenauigkeit ist mehr als genügend, um ein Mitschwingen unmöglich zu machen), einen Resonator erregen sollte. Wenn es aber zwei Arten von Resonatoren von so ganz verschiedenen physikalischen Eigenschaften im Ohre gäbe, so würde die ganze Zerlegungstheorie an ihren inneren Widersprüchen scheitern. Diese Theorie ist überhaupt nur dann denkbar, wenn eine aus Sinusschwingungen zusammengesetzte Welle wieder in Sinusschwingungen zerlegt wird. S. 487 sagt HERMANN: „Denken wir uns, eine Reihe zuerst zunehmender, dann wieder abnehmender Schwingungen von der Art der starken Linie in Figur 5 umfasse etwa 16 ganze Schwingungen, so ist kein Zweifel, daß dieselbe trotz ihrer geringen Abweichung von der einfachen Sinusform nicht allein einen entsprechenden Resonator zum Mittönen bringen, sondern auch als Ton empfunden werden würde.“ So ganz zweifellos dürfte dies vielleicht doch nicht sein. Sehr stark aber, fürchte ich, wird man daran zweifeln müssen, daß die Welle noch einen Resonator in Mitschwingung sollte versetzen können, wenn beim Quintenintervall nur  $2\frac{1}{2}$  Schwingungen der Schwebungsperiode in Betracht kommen. Hier ist die Abweichung von der Sinusform so groß, daß selbst Resonatoren von starker Dämpfung schwerlich noch mitschwingen können. Und wie wird es erst bei Intervallen, die der Oktave nahe kommen!

Zu diesen Schwierigkeiten kommt noch hinzu, daß dann, wenn die beiden primären Töne ungleiche Amplituden haben (und das wird ja wohl der gewöhnliche Fall sein), der Mittelton nicht nur dem arithmetischen Mittel nicht mehr entspricht, sondern auch die Durchgänge durch die Gleichgewichtslage nicht mehr von genau gleichem Abstände innerhalb der Periode sind. Konsequenterweise müßte HERMANN also auch für solche Wellen noch eine oder vielleicht sogar unendlich viele Arten von Resonatoren annehmen. Denn daß die HELMHOLTZschen



Resonatoren für Sinusschwingungen dies alles leisten sollen, kann man wohl nicht verlangen.

### Phasenwechselnde Töne.

Schließlich ist noch der Phasenwechsel zu berücksichtigen. Wenn man annimmt, daß ein Resonator durch die Mitteltonwelle erregt wird, so würde er nach Einwirkung so vieler Schwingungen, als in einer Schwebungsperiode der erzeugenden Töne enthalten sind, in entgegengesetztem Sinne erregt werden, d. h. der sog. Mittelton wechselt seine Phase, und zwar, wie HERMANN auf S. 488 seiner Abhandlung angegeben hat (unter der Voraussetzung, daß die Amplituden der Primärschwingungen die gleichen sind, was, wie schon bemerkt, ein ganz spezieller und seltener Fall ist), für das Intervall der Oktave nach  $1\frac{1}{2}$ , für die Quinte  $2\frac{1}{2}$ , für die große Terz  $4\frac{1}{2}$ , für einen Ganzton  $8\frac{1}{2}$ , für einen halben Ton  $16\frac{1}{2}$ , allgemein nach  $\frac{m+n}{2(m-n)}$  Schwingungen.

Es handelt sich nun um die Frage: Ist die Dämpfung der Resonatoren des Ohres so groß, daß trotz des Phasenwechsels bei der angenommenen Einwirkung des Mitteltones innerhalb einer Schwebungsperiode eine die Reizschwelle überschreitende Erregung des Resonators zu stande kommt, und wenn dies der Fall ist, ist die oben angegebene Zahl von Schwingungen zwischen zweimaligem Phasenwechsel fähig, eine Tonempfindung hervorzurufen?

Diese Frage hat HERMANN unter Benutzung von Zahnrad-sirenen experimentell geprüft. Die Ergebnisse waren folgende: Bei Phasenwechsel nach  $7\frac{1}{2}$  Schwingungen (dies ist hier immer so zu verstehen: nach dem achten Maximum folgt an Stelle des Minimums wieder ein Maximum) war der Hauptton noch hörbar. Außerdem hörte man den der Anzahl des Phasenwechsels entsprechenden Unterbrechungston. Auch bei Phasenwechsel nach  $4\frac{1}{2}$  (nach HERMANN'S Bezeichnungsweise 4) Schwingungen war der Hauptton für geübtere Ohren noch deutlich und völlig unzweifelhaft erkennbar. Bei allen diesen Versuchen war der Unterbrechungston stark überwiegend. Die Tonhöhe des Haupttones lag bei HERMANN'S Versuchen in der dreigestrichenen Oktave. Für genaue Beobachtungen scheint mir dies schon zu hoch zu sein; jedenfalls ist diese Tonlage nicht die günstigste. Ich hielt es für nützlich, diese Versuche nach



anderen, mir geeigneter erscheinenden Methoden zu wiederholen. Wer den Ton einer Zahnradsirene kennt, weiß, daß er von einem auf die Dauer fast unerträglichen Geräusche begleitet ist, durch das die Sicherheit der Beobachtung sehr beeinträchtigt wird. Ich habe daher bei der ersten Methode nicht Zahnrad-, sondern Lochsirenen verwandt. Diese erzeugen, wenn man die Windstärke und die Entfernung der Röhrenöffnung, aus der der Wind ausströmt, von der Sirenenscheibe passend reguliert, nur wenig Geräusch und haben die gerade bei den Versuchen, auf die es hier ankommt, sehr wesentliche Eigenschaft, daß der Unterbrechungston ziemlich schwach, viel schwächer als der Hauptton, ist, so daß die Beobachtung eine leichte ist, obwohl natürlich immer ein gewisser Grad von Übung dazu gehört. Bei der zweiten Methode bin ich von einem auf gewöhnliche Weise erzeugten kontinuierlichen Tone ausgegangen und habe ihn auf künstlichem Wege so umgestaltet, daß er nach einer beliebigen Zahl von Schwingungen seine Phase wechselte.

Die zu den Versuchen benutzten Sirenenscheiben waren etwa 3 mm starke Scheiben aus hartem Holze. Der Durchmesser der Scheiben betrug 30 bzw. 21 cm. Der Durchmesser der Löcher betrug  $4\frac{1}{2}$  mm, der Abstand der Mittelpunkte zweier benachbarter Löcher voneinander 9 mm, bei einigen Löcherreihen auch etwas mehr. Angeblasen wurden die Scheiben durch eine Glasröhre von derselben inneren Weite wie die Löcher. Ich hatte mir nun zu diesen Löchern eine große Anzahl kleiner Korkstöpselchen verfertigt, vermittelst deren ich eine beliebige Zahl von Löchern in beliebiger Reihenfolge verstopfen und leicht wieder öffnen konnte, so daß ich ohne Schwierigkeit jede gewünschte Aufeinanderfolge von Luftstößen erzielte. In den im Folgenden gegebenen Darstellungen der Löcherreihen bezeichnen ausgefüllte Kreise verstopfte, leere Kreise geöffnete Löcher. Es ist immer nur eine Periode dargestellt, die sich in der Löcherreihe mehrfach wiederholte (die größte Löcherreihe enthielt 92 Löcher), natürlich so, daß die Reihe durch eine ganze Zahl von Perioden völlig ausgefüllt war. In Rotation versetzt wurden die Scheiben durch einen namentlich bei nicht zu schnellen Geschwindigkeiten fast geräuschlos gehenden Heißluftmotor. Die Übertragung auf die Axe der Scheibe geschah nicht durch Zahnräder, deren Ge-

klapper zu sehr gestört hätte, sondern durch ein Band. Die ungefähre Höhe der entstehenden Töne konnte leicht am Klavier festgestellt werden. Die genauere Bestimmung, bei der namentlich ein Verwechseln von Oktaven ausgeschlossen war, was beim Vergleichen mit Klaviertönen der verschiedenen Klangfarbe wegen doch hätte vorkommen können, wurde dadurch gemacht, daß abwechselnd mit der Versuchsreihe andere Löcherreihen derselben Sirenenscheibe angeblasen wurden. Dies war leicht dadurch auszuführen, daß nach jeder Löcherreihe, die gebraucht werden sollte, eine besondere Röhre geleitet war und jede einzelne Röhre durch ein Ventil geöffnet und geschlossen wurde. Die Bezeichnung ist in allen Fällen diejenige, daß die erste Zahl die (offenen und verstopften) Löcher einer Periode, die folgende Zahl die absolute Tonhöhe des gehörten Tones angiebt. (Der doppelte Quotient aus der letzteren, dividiert durch die erste Zahl, würde also die Anzahl der Wiederholungen einer Periode in einer Sekunde bezeichnen.) Die Versuchsergebnisse waren folgende:

<i>Ia</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	} 13,225.
<i>Ib</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	●	
<i>Ic</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	●	●	●	
<i>Id</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	●	●	●	●	●	
<i>Ie</i>	○	●	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	
<i>If</i>	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
<i>Ig</i>	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

Aus *Ia* ersieht man, daß, wenn die Gröfse der Luftstöße in allen Fällen dieselbe ist, was einmal für alle diese Versuche betont werden mag, bei Phasenwechsel nach  $6\frac{1}{2}$  Schwingungen noch der regelrechte Ton gehört wird. Die Fälle von *b* bis *f* unterscheiden sich von *a* nur dadurch, daß eine geringere Anzahl objektiver Luftstöße vorhanden und am Schlusse der Periode dafür eine Pause ist. In allen diesen Fällen wurde ebenfalls derselbe Ton gehört. Während der Hauptton von *a* bis *f* abnahm, nahm der Unterbrechungston an Stärke zu, jedoch nicht übermäfsig. Bei *g* war dieser letztere natürlich allein zu hören, wenn man ihn überhaupt noch so nennen könnte.

<i>IIa</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	} 11,250.
<i>IIb</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	●	
<i>IIc</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	●	●	●	
<i>IId</i>	○	●	○	●	○	●	●	●	●	●	●	
<i>IIe</i>	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	

Bei *a* und *b* war der Ton trotz des Phasenwechsels hörbar. Bei *c* war er ziemlich schwach, und die höhere Oktave, die natürlich keinen Phasenwechsel erleidet, trat hervor. Bei *d* hörte man ihn, wenn auch nur schwach, noch heraus, während die Oktave auch jetzt noch ziemlich deutlich zu hören war, allerdings auch nicht mehr so gut wie bei Öffnung von vier Löchern. Bei *e* hatte der Unterbrechungston eine relativ sehr große Stärke, so daß der Ton 250 kaum noch zu hören war. Einigermassen deutlich glaubte ich ihn nur dann zu vernehmen, wenn nur äußerst wenig Wind gegen die Scheibe strömte, so daß sich störende Nebengeräusche bei allerdings auch verringerter Stärke des Tones weniger bemerkbar machten.

<i>IIIa</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	○	} 9,180.
<i>IIIb</i>	○	●	○	●	○	●	○	●	●	
<i>IIIc</i>	○	●	○	●	○	●	●	●	●	
<i>IIId</i>	○	●	○	●	●	●	●	●	●	

In diesen Versuchen wechselt der Ton nach  $4\frac{1}{2}$  Schwingungen die Phase. Bei *IIIa* war der Ton neben der höheren Oktave zu hören, wenn auch nicht sehr stark. Er blieb hörbar auch noch bei *d*.

<i>IVa</i>	○	●	○	●	○	●	○	} 7,330.
<i>IVb</i>	○	●	○	●	○	●	●	
<i>IVc</i>	○	●	○	●	●	●	●	

Bei *IVa* war der phasenwechselnde Ton noch gut zu hören. Bei *b* ebenfalls, nur etwas schwächer. Bei *c* war er sehr schwach, aber immerhin noch erkennbar. Der Unterbrechungston nahm, wie bei den früheren Versuchen, von *a* nach *c* an Stärke zu.

V. ○ ● ○ ● ○ 5,220.

In dieser Anordnung findet der Phasenwechsel nach  $2\frac{1}{2}$  Schwingungen statt. Auch hier hört man den phasenwechselnden Ton.

VI. ○ ● ○ 3, in den verschiedensten Tonlagen.



In diesem Falle kann man von dem phasenwechselnden Tone natürlich nichts mehr hören, denn hier würde der Phasenwechsel bereits nach  $1\frac{1}{2}$  Schwingungen stattfinden. Man hört, wie es von vornherein aus der Art der Luftstöße anzunehmen ist, den Unterbrechungston und seine Duodezime.

Bei der zweiten Methode der Untersuchung phasenwechselnder Töne wurde der Ton einer gedackten Pfeife benutzt. Dieser wurde durch ein Loch in der Wand in ein zweites Zimmer geleitet. Hier verteilte er sich in zwei Röhren von 2 cm Durchmesser, welche durch Posaunenzüge beliebig verlängert werden konnten. Die Endöffnungen der beiden Röhren lagen dicht übereinander. Vor diesen Öffnungen rotierte eine Scheibe aus Eisenblech, in der auf zwei konzentrischen Kreisen ovale Löcher so ausgeschnitten waren, daß, während das eine Rohr durch die Scheibe abgeschlossen war, das andere offen stand, so daß niemals beide Röhren gleichzeitig geöffnet oder gleichzeitig verschlossen waren. Die Bogenlänge jedes einzelnen Loches betrug natürlich auf beiden konzentrischen Kreisen gleich viel Grade. Auf der anderen Seite der Scheibe wurde der Ton wiederum von einer Röhre in Empfang genommen, deren längliche Öffnung beiden Röhrenendigungen gleichzeitig gegenüberstand. Auf diese Weise wurde der Ton wiederum durch ein Loch in der Wand in ein drittes Zimmer geleitet, in dem beobachtet wurde. In dem zweiten Zimmer wäre eine ungestörte Beobachtung nicht möglich gewesen, teils wegen des von dem die Scheibe treibenden Motor verursachten Geräusches, teils weil der Ton noch etwas durch die — obwohl 60 cm starke — Wand zu hören war, und weil auch die Scheibe, um jedes Reibungsgeräusch zu vermeiden, die Röhren nicht ganz dicht abschließen konnte und infolgedessen die Beobachtung hätte fehlerhaft werden können. Unter den dargestellten Bedingungen war dies weniger zu fürchten. Wenn wirklich noch Tonwellen aus dem abgeschlossenen Rohre in die weitere Leitung gelangten, so konnten sie doch nur von geringer Amplitude sein und, da sie sich gerade um eine halbe Wellenlänge von den absichtlich fortgeleiteten unterschieden, nur die Amplitude der letzteren etwas vermindern.

Es kam nun darauf an, die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe zu bestimmen. Dies geschah auf folgende Weise. In der Scheibe waren außer den bereits erwähnten Löchern auf

einem dritten konzentrischen Kreise 24 Löcher von 4 mm Durchmesser gebohrt, die auf dieselbe Weise, wie die Sirenscheiben, jederzeit beliebig lange angeblasen werden konnten. Derjenige nun, der den Gang des Motors in dem zweiten Zimmer überwachte, konnte bei Anblasen der Löcher leicht den entstehenden Ton bestimmen, und Division durch 24 ergab dann mit hinreichender Genauigkeit die Anzahl der Umdrehungen in einer Sekunde.

Zunächst wurden die ausziehbaren Röhren so gestellt, daß sie sich um eine halbe Wellenlänge unterschieden. Der Ton 1080 war jetzt bei durch die größtmögliche Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe erzielt 120maligen Phasenwechsel, d. h. Phasenwechsel nach 9 Schwingungen, noch zu hören. Diese größte Geschwindigkeit konnte nur für ganz kurze Zeit erreicht werden und war daher für bestimmtere Beobachtungen nicht brauchbar. Sobald diese große Geschwindigkeit einige Sekunden gedauert hatte, begann der ganze Apparat so stark zu zittern, daß die Scheibe zum Stillstand gebracht werden mußte. Bei 94maligem Phasenwechsel war der Ton sehr deutlich zu hören. Er war schwach und sehr rauh wie ein schwebender Ton. In diesen, wie in allen späteren Fällen hörte man auch den der Anzahl des Phasenwechsels entsprechenden Ton, was ich im Folgenden nicht jedesmal erwähne, da es hier nicht darauf ankommt. Stellte man nun die verschiebbaren Röhren so, daß kein Phasenwechsel eintrat, sondern nur periodische Herabsetzungen der Intensität, so war der Ton bei 94maliger bloßer Schwächung stärker und glatter, wie natürlich, da die Intensitätsschwankungen der Empfindung dann viel geringer sind. Um mit kleineren Geschwindigkeiten auszukommen, wurde zu den ferneren Versuchen ein tieferer Ton gebraucht, und zwar 480, und es wurde folgende Methode angewandt: Die Umdrehungsgeschwindigkeit wurde während der Beobachtung beständig gesteigert, und der Beobachter zeigte durch ein elektrisches Signal an, wann der Ton für ihn gänzlich verschwunden war. Bei 60maligem Phasenwechsel, also nach je 8 Schwingungen, war der Ton noch sehr schwach zu hören. Bei steigender Geschwindigkeit erhielt Herr Prof. STUMPF bei drei Beobachtungen folgende Ergebnisse: Beim ersten Versuch wurde der Ton für völlig verschwunden gehalten bei 80maligem, beim zweiten Versuch bei 74-, beim dritten wieder bei 74maligem



Phasenwechsel, also bei Phasenwechsel nach bzw. 6,  $6\frac{1}{2}$  und  $6\frac{1}{2}$  Schwingungen. Bei den anderen Beobachtern gebe ich nur die nach einiger Vorübung erhaltenen Ergebnisse an: Herr cand. phil. HEYFELDER erklärte den Ton für verschwunden bei 75 maligem (also nach  $6\frac{2}{5}$  Schwingungen) Phasenwechsel, Herr cand. phil. HENNIG bei 72 maligem (also nach  $6\frac{2}{3}$  Schwingungen), ich selber bei 75 maligem (also nach  $6\frac{2}{5}$  Schwingungen) Phasenwechsel. Die Zahl des Phasenwechsels war also bei allen Beobachtern ziemlich dieselbe.

### Variationstöne.

Man kann nicht sagen, daß die Ergebnisse dieser Versuche im Widerspruche ständen mit denen der Versuche mit den Sirenenscheiben. Zwischen beiden Methoden ist ein sehr großer Unterschied. Die erstere schließt sich ziemlich eng an HERMANN'S Versuche mit den Zahnradsirenen an. Die Ergebnisse waren, daß man in der That selbst solche Töne noch hören kann, die nach  $2\frac{1}{2}$  Schwingungen ihre Phase wechseln. Aber HERMANN hat etwas übersehen — und mir selbst ist es zuerst ebenso gegangen —, daß nämlich die untersuchten phasenwechselnden Töne sich insofern sehr von dem angeblichen phasenwechselnden Mittelton unterscheiden, als beim Mittelton die Amplituden von der Mitte der Periode nach beiden Seiten hin abnehmen, bei den von HERMANN mit den Zahnrad-, von mir mit Lochsirenen untersuchten phasenwechselnden Tönen jedoch die Amplituden der Luftschwingungen immer die gleichen sind. Wenn man daher auch phasenwechselnde Töne von gleichen Amplituden hört, so ist damit noch lange nicht bewiesen, daß man auch solche mit schwankenden Amplituden vernimmt, worauf es bei HERMANN'S Mittelton ja gerade ankommt. Aus diesem Grunde wandte ich die zweite Methode der Benutzung eines kontinuierlichen Tones an. Hier nimmt die Amplitude von der Mitte der Periode nach beiden Seiten hin bis zu Null ab. Aber auch hier ist noch ein Unterschied zu machen. Bei langsamer Rotation der Scheibe sind nach der Art der in der Scheibe befindlichen Löcher in der Mitte der Periode eine Anzahl von Schwingungen gleicher Amplitude und erst nahe an den Stellen des Phasenwechsels Schwingungen von abnehmender Amplitude vorhanden. Dieser Fall unterscheidet sich nicht wesentlich von dem der Sirenenscheiben.



Bei schneller Rotation jedoch, wo nur wenige Schwingungen in jeder Periode enthalten sind, wird die phasenwechselnde Wellenreihe der bei Zusammenklang zweier Töne von nicht zu sehr verschiedener Tonhöhe entstehenden ähnlich, da jetzt in der Mitte der Periode kaum zwei Wellen von gleicher Amplitude vorhanden sind. Die Folge davon ist das Auftreten der schon erwähnten sogenannten Variationstöne, die bei anderen Versuchen ähnlicher Art schon vielfach beobachtet und beschrieben worden sind, z. B. von HELMHOLTZ, KÖNIG, ALFR. MAYER. Zunächst hört man neben den Variationstönen auch noch den phasenwechselnden Ton. Bald aber verschwindet bei größerer Schnelligkeit der Umdrehung der phasenwechselnde Ton, und die Variationstöne bleiben allein noch übrig als eine interessante Bestätigung nicht der HERMANNSchen Mittelton-, wohl aber der OHM-HELMHOLTZschen Zerlegungstheorie. Gerade da, wo man den HERMANNSchen Mittelton gern hören möchte, da nämlich, wo er in der Mitte der Periode die grösste, nach beiden Seiten hin abnehmende und an den Stellen des Phasenwechsels die Amplitude Null hat, wird man von ihm im Stich gelassen; das heisst mit kurzen Worten: Das Ohr besitzt nur Resonatoren für Sinusschwingungen, und wenn ein Resonator im Ohre durch irgend eine Schwingung erregt wird, so muß die dem Resonator entsprechende Sinusschwingung als Teilschwingung in ihr enthalten sein. Für den Mittelton bleibt da kein Raum übrig. Nach dem Obigen erledigt sich auch sehr leicht — wenigstens in einem Punkte — der Streit zwischen PIPPING<sup>1</sup> und HERMANN.<sup>2</sup> Beide haben Zahnradversuche gemacht, jedoch sind die Zahnräder des einen etwas anders gestaltet, als die des anderen. Bei dem sonst gleichen Versuche hört HERMANN den Ton 90, PIPPING die Töne 84 und 96. HERMANN fordert PIPPING auf, seinen Versuch noch einmal zu machen und ebenfalls den Ton 90 zu hören. Dazu wird nun wohl PIPPING selbst beim besten Willen nicht im stande sein. Sie haben eben beide recht. Was PIPPING hört, sind (nicht Obertöne von 12, sondern) die beiden Variationstöne. Er hört diese, weil jedenfalls bei seinem Versuche die Kurve der Luftwelle von der Mitte der Periode nach beiden Seiten hin abnehmende Amplitude hat. Bei HER-

<sup>1</sup> *Zeitschr. f. Biologie* 31. S. 524.

<sup>2</sup> *Pflügers Arch.* 61. S. 200.

MANNS anders gestaltetem Zahnrade dagegen sind die Amplituden in der ganzen Periode annähernd gleich. Infolgedessen hört er den phasenwechselnden Ton.

Nicht ganz uninteressant ist vielleicht die Bemerkung, daß die Variationstöne mit einem Stimmgabeltone sehr deutlich schwebten. Stellte man den Phasenwechsel ab, so verschwanden natürlich die Variationstöne sofort, und der infolge der einfachen Intensitätsschwankungen etwas rauhe eigentliche Ton wurde wieder hörbar.

Wieviel Schwingungen sind für eine Tonempfindung erforderlich?

Ich will hier noch einige Beobachtungen erwähnen, die zwar nach dem Obigen weder für noch gegen die Mitteltontheorie etwas zu beweisen vermögen, die ich jedoch im Anschlusse an die obigen Untersuchungen zu machen Gelegenheit hatte. HERMANN meint, bei seiner Theorie des Mitteltones voraussetzen zu müssen, daß bereits die Anzahl der in einer Periode enthaltenen Schwingungen eine Tonempfindung hervorzurufen geeignet sei. Nun könnte man vielleicht auch annehmen, daß eine Periode nicht für eine Tonempfindung genüge. Sie könnte zwar einen schwachen nervösen Prozeß in den peripherischen Nerven entstehen lassen. Aber es wäre denkbar, daß dieser sich nicht zum Zentralorgane fortpflanzte und infolgedessen keine Empfindung zu stande brächte, während bei öfterer Wiederholung der Periode die Empfindung des Tones entstände. Man kann daher aus den obigen Versuchen, bei denen ein Phasenwechsel nach  $2\frac{1}{2}$  Schwingungen stattfindet, nicht etwa schließen, daß an und für sich diese Zahl von Schwingungen für eine Tonempfindung hinreichend sei. EXNER<sup>1</sup> fand vermittelst einer (wie er selbst zugiebt, nicht ganz unanfechtbaren) Methode durch Abklemmen und Öffnen eines Schlauches, daß 16 Schwingungen<sup>2</sup> zur Erkennung der Tonhöhe erforderlich seien. Ich habe mit den zu den früheren Versuchen benutzten Holzscheiben folgende Beobachtung gemacht. In einem Kreise von 88 Löchern wurden alle Löcher bis auf zwei nebeneinander liegende verstopft und bei Rotation der Scheibe angeblasen.

<sup>1</sup> *Pflügers Arch.* 13. S. 228.

<sup>2</sup> Zu einer etwas größeren Zahl (20) gelangte AUERBACH (*Wiedemanns Ann.* VI, S. 591) auf andere Weise, zu einer geringeren (4 bis 8) MACH.

Man hörte dann bei einer zweimaligen Umdrehung in der Sekunde zwei den beiden Umdrehungen entsprechende Stöße. Daß jeder einzelne ein Doppelstoß war, ließ sich nicht heraus hören. Wurden statt der zwei drei Löcher geöffnet, so zeigte sich kaum ein wirklicher Unterschied. Bei Öffnung von vier Löchern nahmen die Stöße einen tonähnlichen Charakter an. Wurden fünf Löcher geöffnet, so hörte man deutlich Tonstöße von der richtigen Tonhöhe 176, was durch Anblasen einer anderen Löcherreihe leicht festzustellen war. Die Tonhöhe konnte auch von jemandem, der sie nicht vorher kannte, bei Öffnung von fünf Löchern mit Sicherheit festgestellt werden, obwohl die Tonstöße eine nicht sehr große Intensität hatten. Die zwischen zwei Wellenperioden liegende Pause, die frei von Luftwellen ist, war  $472 \sigma$ .<sup>1</sup> In dieser Zeit muß die mitschwingende Faser längst gedämpft sein, wie die Möglichkeit des Trillers in der Tonlage 176 beweist. Eine Verstärkung von noch vorhandenem Mitschwingen durch die folgenden Perioden von Luftwellen ist daher ausgeschlossen. Man könnte also wohl aus diesem Versuche folgern, daß bereits fünf Luftschwingungen (von den etwa in Betracht kommenden Nachschwingungen im Ohre, die auch EXNER bei seinen Versuchen nicht berücksichtigt hat, sehen wir ab) genügen, um eine Tonempfindung zu erzeugen. Daß das Erkennen des Tones in unserem Falle dadurch erleichtert werde, daß sich die Tonstöße in Abständen von ungefähr einer halben Sekunde wiederholen, dürfte kaum als Einwand hiergegen geltend gemacht werden können, weil die Tonempfindung vollkommen deutlich und die Tonhöhenbestimmung so leicht und mit so unzweifelhafter Sicherheit ausführbar ist, daß sie auch bei nur einem Stöße ohne Wiederholung möglich scheint.<sup>2</sup>

Ich füge noch einige Versuche, die dieses bestätigen, hinzu. Bei vier Umdrehungen der Scheibe in der Sekunde war der Ton 352 bei Öffnung von drei benachbarten Löchern deutlich erkennbar und die Tonhöhe der viermal in der Sekunde folgenden Stöße zu bestimmen. Hier betrug die Pause zwischen je zwei Perioden  $241 \sigma$ . Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe wurde in diesem, wie in dem folgenden Falle durch Anblasen

---

<sup>1</sup>  $\sigma = 0,001$  Sekunden.

<sup>2</sup> Der Versuch wäre noch zu machen.



einer anderen Löcherreihe festgestellt. Bei acht Umdrehungen der Scheibe war der Ton der Stöße bei drei sowohl, wie auch bei zwei geöffneten Löchern erkennbar. Man konnte die Tonhöhe bestimmen, würde den Ton dabei aber wahrscheinlich um eine oder zwei Oktaven zu tief geschätzt haben. Er hatte in keiner Weise das eigentümliche Spitzige, durch das sich die hohen Töne (der hier in Betracht kommende hat 704 Schwingungen) vor den tiefen auszeichnen. Vielleicht liegt dies an der Schwäche des Tones und dem tiefen Charakter der ihn begleitenden Geräusche. Bei Öffnung von vier Löchern ist der Ton leichter als vorher erkennbar, hat aber auch noch nicht das Eigenthümliche eines hohen Tones. Bei fünf Löchern ist die Tonhöhe der Stöße schon sehr klar. Der Ton ist hier schon ziemlich spitz, so daß man ihn kaum noch, wie bei den anderen Fällen, mit tieferen Oktaven verwechseln könnte. Die Pause zwischen zwei Perioden ist bei Öffnung von fünf Löchern 118  $\sigma$ .

Ich machte noch einen ähnlichen Versuch, bei dem eine Verstärkung des Mitschwingens der Teilchen im Ohre durch die sich wiederholenden Perioden, selbst wenn man einen so geringen Dämpfungsgrad annehmen wollte, ausgeschlossen war. Hier wurde an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen einer Reihe je eine Periode von Löchern offen gelassen, und zwar so, daß die eine Periode die entgegengesetzte Phase hatte wie die andere. Natürlich mußte hierzu der doppelte Abstand der Löcher genommen werden. Bei achtmaliger Umdrehung der Scheibe war also der Ton 352 zu beobachten. Bestand jede Periode aus zwei Löchern, so hatten die Stöße keine Spur von Toncharakter. Bei drei Löchern machte sich etwas Tonähnliches in dem Geräusche geltend. Bei vier Löchern begannen die Stöße die verlangte Tonhöhe anzunehmen, aber noch schwach und undeutlich. Bei fünf Löchern in jeder Periode war die Höhe der Tonstöße klar erkennbar. Die zwischen zwei Perioden liegende Pause betrug hier 50, bzw. 47  $\sigma$ , da die beiden aufeinanderfolgenden Pausen des Phasenwechsels wegen nicht ganz gleich groß sein konnten. Wenn mit den hier beschriebenen Versuchen die betrachtete Frage auch wohl nicht endgültig beantwortet ist, so dürfte doch ein Anhaltspunkt dafür gewonnen sein, daß die von EXNER gefundene Zahl von 16 Schwingungen zu hoch sei. Bei EXNERS Versuchen bleibt der Einwand, daß der bei Öffnung des ab-

geklemmten Schlauches entstehende Knall die Empfindlichkeit des Ohres stark beeinträchtigte; bei meinen könnte man immerhin die Wiederholungen der Tonstöße als Einwand geltend machen.

### Doppel-Unterbrechungstöne (?).

Zum Schlusse dieses Abschnittes will ich noch auf eine etwas seltsame Beobachtung HERMANN'S eingehen. HERMANN berichtet, daß bei einfachen Unterbrechungen des Tones, wo an seiner Sirene abwechselnd nach sechs und sieben Zähnen ein solcher fehlte (in Wirklichkeit war eine Lücke ausgefüllt geblieben), der gehörte Unterbrechungston einen halben Ton tiefer lag, als es der Anzahl der Unterbrechungen entsprach. Er giebt auch eine Erklärung dieser Erscheinung an, die auf den ersten Blick ganz einleuchtend aussieht. Nach HERMANN sollen hier zwei Unterbrechungstöne entstehen, einer, der dem kürzeren, und einer, der dem größeren Abstände der Unterbrechungen entspricht. Der tiefere von beiden, meint HERMANN, sei viel stärker und daher allein hörbar. Wenn man näher zusieht, so wird man durch diese Erklärung doch wenig befriedigt. Wie HERMANN sich physiologisch das Zustandekommen der beiden angenommenen Unterbrechungstöne denkt, hat er nicht angegeben, denn aus der oben wiedergegebenen Erklärung kann man eine Beantwortung dieser Frage schwerlich entnehmen. Warum der tiefere der beiden Unterbrechungstöne so viel stärker sein soll, daß man ihn allein und den anderen gar nicht hört, ist auch nicht einzusehen. Da ich von vornherein an der Richtigkeit der HERMANN'Schen Erklärung zweifelte, habe ich eine experimentelle Prüfung der Sache für notwendig gehalten.

Ich öffnete in einer Reihe zwölf Löcher, von denen je sechs die Ecken eines regulären Sechsecks bildeten. Die Lage der beiden Sechsecke war so, daß eine Ecke des einen nicht genau gleichen Abstand von den beiden benachbarten des anderen hatte, sondern auf der Peripherie des umschriebenen Kreises um etwas mehr als den Durchmesser eines Loches aus der symmetrischen Lage verrückt war. Man hörte dann nicht etwa zwei Töne, die dem weiteren und dem kleineren Abstände je zweier aufeinanderfolgenden Löcher entsprechen würden, oder den ersteren allein, weil er der tiefere ist (in diesem Falle

freilich würde dies HERMANN auch schwerlich behaupten, da es sich ja hier um direkte Einwirkung auf die Resonatoren handelt); man vernimmt vielmehr den Ton 6 (multipliziert mit der Umdrehungszahl der Scheibe). Die objektive Luftwelle ist in diesem Falle dieselbe, als wenn zwei Töne von gleicher Höhe da wären, deren Phasenunterschied etwas weniger als eine halbe Wellenlänge beträgt. Dafs diese Welle in die beiden Sinuswellen zerlegt wird, bestätigt die HELMHOLTZsche Resonatorenhypothese. Folgt man dagegen der von HERMANN

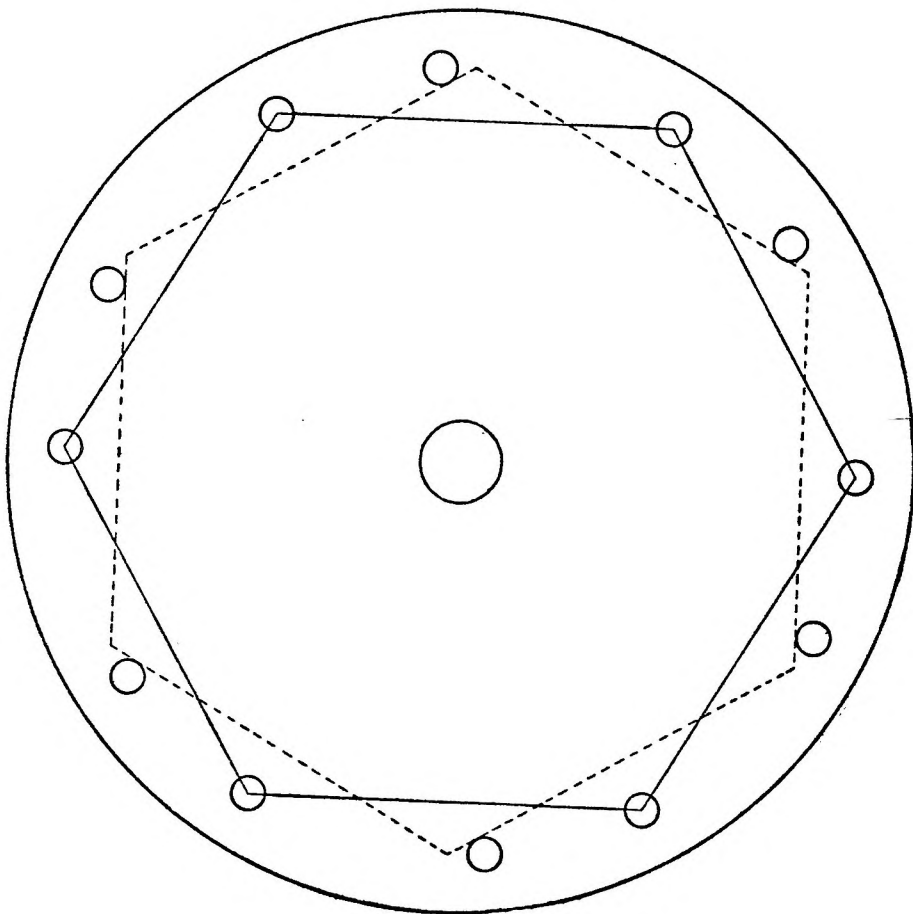


Fig. b.

als möglich angenommenen Resonatorentheorie, so müfste man den Ton 12 hören, da ja nach HERMANN der entsprechende Resonator auch dann erregt wird, wenn die Maxima der Wellenkurve nicht ganz genau gleichen Abstand haben; und in unserem Falle beträgt die Abweichung von der Gleichheit nur sehr wenig. Ich habe diesen Versuch hier eingefügt, weil er grofse Ähnlichkeit hat mit den folgenden, obwohl er gegen HERMANNS Annahme der beiden Unterbrechungstöne noch nichts beweist. Denn die Unterbrechungstöne entstehen nach HERMANN durch die Schwankungen der Erregung einer Nervenzelle, während es sich hier darum handelt, zunächst einmal einen Resonator zu erregen.



Ich stellte nun eine grössere Zahl von Versuchen an, die alle das Charakteristische haben, daß die Unterbrechungen eines Tones in abwechselnd kleinerem und grösserem Abstände erfolgen. In der nachstehenden Tabelle bedeuten die beiden ersten Zahlen die zwischen zwei verstopften befindlichen offenen Löcher. Die folgenden Zahlen sind die gehörten Töne (die Zahlen sind hierbei natürlich multipliziert zu denken mit der Anzahl der Wiederholungen der Periode in einer Sekunde).

6, 7 — 2, 15.	
5, 6 — 2, 13.*	2 etwas unbestimmt.
4, 5 — 2, 11.	
3, 6 — 2, 11.	
4, 7 — 2, 13.	Schwächer noch andere Töne.
7, 8 — 2, 17.	
8, 9 — 2, 19.	
9, 10 — 2, 21.	
10, 11 — 2, 23.	
6, 9 — 2, 17.	Außerdem mehrere andere tiefe Töne.
7, 10 — 2, 19.	2 ist etwas unklar in der Tonhöhe.
9, 12 — 2, 23.	2 war hörbar, aber undeutlich und mit anderen Tönen vermischt.
5, 12 — $\frac{3}{2}$ , 19.**	
3, 4 — 1, 9.	1 ziemlich schwach.
2, 3 — 1, 7.	
1, 2 — 1, 5.	
1, 3 — 1, 3.	Außerdem 6 schwach hörbar.
3, 5 — 1, 10.	
4, 6 — 1, 12.	
5, 7 — 1, 14.	
3, 9 — 1, 14.	
6, 15 — 1, 23.	1 wenig deutlich, mit anderen Tönen vermischt.

In allen Versuchen war von den nach HERMANN zu erwartenden beiden Unterbrechungstönen nichts zu hören. Da nun ein wesentlicher Unterschied zwischen der Zahn- und der Lochsirene nicht besteht (ich habe wenigstens keinen solchen finden können), so glaube ich zu dem Schlusse berechtigt zu sein, daß die Annahme HERMANNS falsch ist. Im allgemeinen zeigen die obigen Ergebnisse, daß dort, wo der Abstand der Unterbrechungen nur wenig verschieden ist, der Ton 2, wo der Unterschied grösser ist, der Ton 1 entsteht. Beachtet man dies und namentlich auch den Fall \*\*, so dürfte man die Annahme für das wahrscheinlichste halten, daß hier verwickelte Luftwellen

entstehen, die nach der HELMHOLTZschen Resonatorentheorie vom Ohre in Sinuswellen zerlegt werden. Ich glaube nicht, daß die Behauptung berechtigt ist (es scheint mir freilich, als wenn gerade diese HERMANNs Ansicht entspräche), daß wir es hier mit Intensitätsschwankungen der dem Haupttone entsprechenden Nervenenerregung zu thun haben, durch die der Unterbrechungston hervorgebracht würde. Die Dämpfung der schwingenden Teilchen im Ohre ist allerdings groß genug, um Reizschwankungen erklärbar zu machen, da sonst nicht drei Luftwellen bereits eine Tonempfindung bewirken könnten. Gerade deshalb aber muß man die von A. MAYER beobachteten beträchtlichen Nachempfindungen nicht durch mechanische, sondern durch physiologische Nachwirkungen erklären, und dann wiederum kann man schwerlich sagen, daß nach sechs oder sieben gleich großen — zum Unterschiede von schwebenden Tönen — Reizungen der Ausfall einer solchen eine Intensitätsschwankung der Nervenenerregung hervorruft.

Etwas seltsam ging es bei dem Falle \* zu. Als ich den Versuch zum ersten Male machte, fand ich — was auch Herr Prof. STUMPF bestätigte —, daß der tiefe Ton einen halben Ton zu hoch<sup>1</sup> war, so daß man die beiden Töne als reine Duodezime-plus-Oktave hörte. Doch war der tiefe Ton in diesem Falle nicht sehr klar; er lag in der Kontra-, der höhere in der kleinen Oktave. Nahm man die Töne dagegen höher, so wurde der Ton 2 gehört. In dem ersten Falle der Tabelle, wo HERMANN den tiefen Ton einen halben Ton zu tief hörte, vernahm ich deutlich den Ton 2.

Herr Prof. HERMANN hatte nun die Liebenswürdigkeit, die von ihm zu seinen Versuchen benutzte Zahnradsirene nebst den dazu gehörenden Kombinationsscheiben nach Berlin zu senden, so daß ich die hier in Betracht kommenden Beobachtungen nachzuprüfen Gelegenheit hatte. Die dem physiologischen Institute der Königsberger Universität gehörende Sirene ist ein handlicher, äußerst leicht in Betrieb zu setzender und vorzüglich funktionierender Apparat, der freilich die nicht abzuändernde unangenehme Eigenschaft aller Zahnradsirenen (wenn auch in verhältnismäßig noch ziemlich geringem Grade) hat, in der Höhe kreischende, in der Tiefe schnatternde Töne

---

<sup>1</sup> Ähnliches bei STUMPF, *Tonpsychologie*. II. S. 397 f.

zu geben. Ich kann alle von Herrn Prof. HERMANN gemachten Beobachtungen an der Sirene durchaus bestätigen — mit nur einer Ausnahme. Bei den einfachen Unterbrechungen mit verschiedenem Abstände hörte ich ohne jeden Zweifel den Unterbrechungston nicht einen halben Ton zu tief, wie HERMANN angegeben hatte, sondern die tiefere Oktave, wie es PIPPING behauptet, und wie sie auch nach meinen Beobachtungen an der Lochsirene einzig und allein neben dem eigentlichen Unterbrechungstone zu erwarten war. Für die Richtigkeit meiner Beobachtung stütze ich mich auf Herrn Prof. STUMPF, ferner auf den mit sehr feinem Gehör begabten und musikalisch hoch gebildeten Herrn cand. phil. BIEDERMANN und den ebenfalls sehr musikalischen Herrn cand. phil. HENNIG. Von HERMANN'S hypothetischen beiden Unterbrechungstönen war keine Spur zu hören.

#### IV. Einige theoretische Erwägungen zur Erklärung der Differenzttöne.

Von den bisher aufgestellten Tontheorien sind in der Hauptsache nur drei zu berücksichtigen, die von HELMHOLTZ, WUNDT und HERMANN. Der Hauptsatz der HELMHOLTZschen Theorie, die Zerlegung jeder Welle in Sinusschwingungen durch Resonatoren im Ohre, dürfte schwerlich anzufechten sein und wird auch von WUNDT und HERMANN angenommen. Für die Richtigkeit der HELMHOLTZschen Zerlegungshypothese haben wir auch in den obigen Untersuchungen mehrfache Bestätigungen gefunden. Dagegen vermag die HELMHOLTZsche Theorie die Differenzttöne nicht zu erklären. Dies hat HELMHOLTZ selbst erkannt und deshalb zu seiner mathematischen Ableitung der Kombinationstöne gegriffen, die aber, wie wir sahen, den Thatsachen nicht genügend entspricht. WUNDT glaubt, die HELMHOLTZsche Hypothese ausreichend ergänzt zu haben durch seine Annahme, daß der Acusticusstamm direkt durch Tonwellen erregbar sei. Nun soll (nach WUNDT) bald durch Vermittelung der Resonatoren, bald durch direkte Erregung des Acusticus, bald durch beide gleichzeitig die Tonempfindung zu stande kommen. Die Differenzttöne erklärt WUNDT so, daß durch die auf- und abschwankende Erregung des ganzen Nervenapparates ein der Zahl der Schwankungen entsprechender Ton zur Empfindung komme. Daß diese Anschauung zu roh ist, um die in Ab-



schnitt I und II zusammengestellten Erscheinungen zu erklären, leuchtet wohl ein. Sie würde höchstens erklären, daß man einen, nicht aber, daß man mehrere Differenztöne gleichzeitig zu hören vermag. Daß der Acusticusstamm direkt erregbar sei, schließt WUNDT in Übereinstimmung mit SCRIPTURE<sup>1</sup> daraus, daß man Schwebungen zweier Töne auch dann höre, wenn monotisches Hören ausgeschlossen sei, und daraus, daß eine labyrinthlose Taube habe hören können. Daß man bei je einohrigem Hören Schwebungen bemerken könne, soll aus SCRIPTURES Versuchen hervorgehen. BERNSTEIN<sup>2</sup> hat mit Recht dagegen den Einwand erhoben, „daß, wenn auch der zum anderen Ohre übergeleitete Ton an sich gar nicht mehr wahrgenommen wird, er doch im stande sein kann, mit dem anderen an der Schwelle der Empfindung liegenden Töne wahrnehmbare Schwebungen zu erzeugen“. Wenn man SCRIPTURES<sup>3</sup> ausdrückliche Bemerkung liest, daß bei seinen Versuchen Kopfknochenleitung ausgeschlossen zu sein scheine, so versteht man es nicht, wie SCRIPTURE und WUNDT aus diesem Scheine eine im übrigen so unwahrscheinliche Folgerung ziehen konnten, wie die Annahme cerebraler Entstehung von Schwebungen. Daß die labyrinthlose, zuerst von EWALD, dann von WUNDT untersuchte Taube noch habe hören können, ist experimentell nicht mit hinreichender Sicherheit bewiesen<sup>4</sup> und wird widerlegt durch die Beobachtung von MATTE,<sup>5</sup> daß nach Entfernung des Labyrinths einer Taube Degeneration des Acusticus eintritt. Die im Königsberger physiologischen Institute gemachten Untersuchungen<sup>6</sup> deuten darauf hin, daß die wirklich beobachteten Reaktionen der Taube nicht auf Schall-, sondern auf taktile Empfindungen zurückzuleiten sind. WUNDTs Tontheorie führt uns also nicht zum Ziele.

HERMANN glaubte, für die Differenztöne in seiner Mitteltontheorie eine genügende Erklärung gefunden zu haben. Hier ist die erste Schwierigkeit, daß man von dem Mittelton schlechterdings nichts hören kann, obwohl man in der Intensität

---

<sup>1</sup> WUNDT, *Phil. Stud.* VIII.

<sup>2</sup> *Pflügers Arch.* 57. S. 486.

<sup>3</sup> *Phil. Stud.* VIII. S. 640.

<sup>4</sup> BERNSTEIN, *Pflügers Arch.* 57 und 61.

<sup>5</sup> *Pflügers Arch.* 57.

<sup>6</sup> *Pflügers Arch.* 61. S. 214.

schwankende (schwebende) Töne viel leichter hören kann, als kontinuierliche, und diese Eigenschaft beim Mittelton vorliegt. Aber es zeigen sich noch viel mehr Schwierigkeiten. Der Mittelton erregt nach HERMANN die entsprechende Zählzelle. Da die Erregung aber schwankend ist, so wird nach HERMANN auch die der Zahl der Schwankungen entsprechende Zählzelle erregt, und der Differenzton kommt zu stande. Auf eine sehr wichtige Frage, die sich hier sofort aufdrängt, giebt nur leider HERMANNS Theorie keine Antwort: Dafs ein Differenzton mit einem anderen oder mit einem objektiven Tone schweben und wieder einen neuen Differenzton erzeugen kann, dafür hat diese Theorie keine Erklärung. Hier ist keine in der Intensität der Erregung schwankende Mitteltonzelle vorhanden. Der einzige Ausweg wäre die Annahme, dafs die Zählzellen nicht nur durch Töne von bestimmter Schwingungszahl erregbar seien, sondern auch durch solche, die bis zu einer Quarte höher oder tiefer sind, so dafs dann eine neue schwankende Erregung entstehen könnte. Dann könnte man diese Zellen freilich kaum noch Zählzellen nennen und ihnen eine spezifische Energie in dem Sinne zuweisen, dafs sie sich an die ihrem Resonator entsprechende Zahl von Schwingungen gewöhnt hätten. Mir scheint HERMANNS Theorie keine ausreichende Erklärung der Thatsachen abzugeben.

Vielleicht kommen wir etwas weiter, wenn wir es mit einer Zerlegung der resultierenden Tonwelle versuchen. Ich will hier ausdrücklich bemerken, dafs es sich zunächst nur um ein Schema und um Definitionen handelt, die wir dann später auf die physiologischen Vorgänge anzuwenden versuchen werden. Für die Zerlegung einer Tonwelle gelte folgende Regel.

Man suche die kleinste zwischen einem benachbarten Maximum und Minimum (oder Minimum und Maximum; eine bestimmte Reihenfolge ist dabei nicht zu berücksichtigen) bestehende Ordinatendifferenz und schneide von der Spitze eines jeden Maximums und Minimums der Kurve die Hälfte dieser Differenz ab. Je ein höher und ein darauffolgendes, tiefer gelegenes, abgeschnittenes Stück bezeichnen wir zusammen als eine Schwingung. Die halbe Ordinatendifferenz betrachten wir als Mafs der Tonstärke.

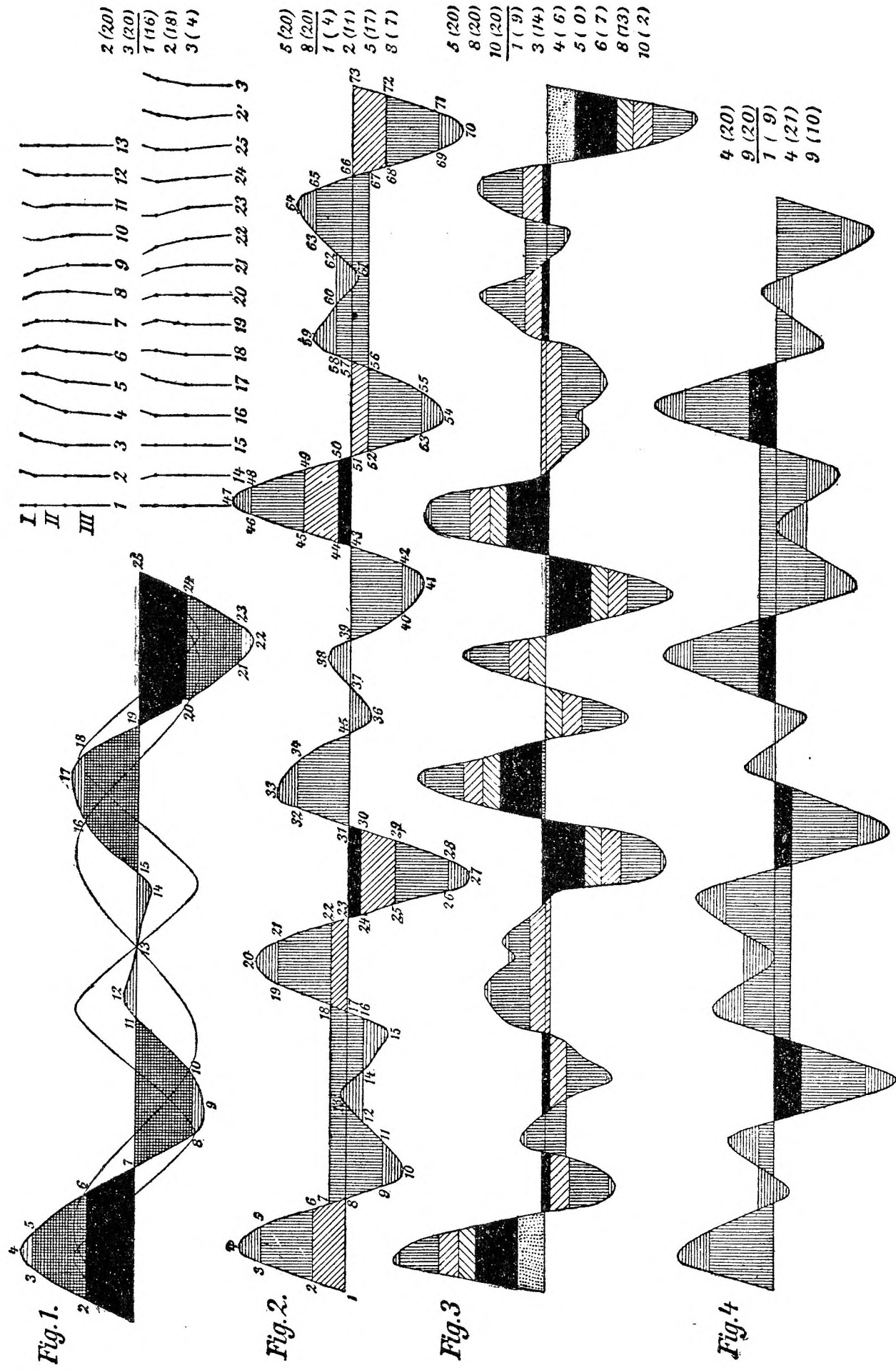
Nachdem wir dies mit der ursprünglichen Kurve vorgenommen haben, bleibt eine neue übrig, die einige Maxima

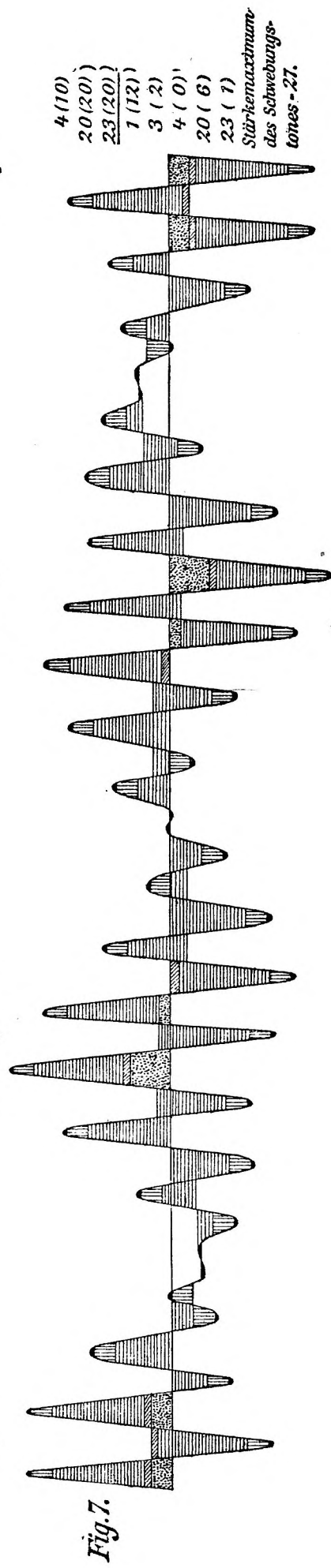
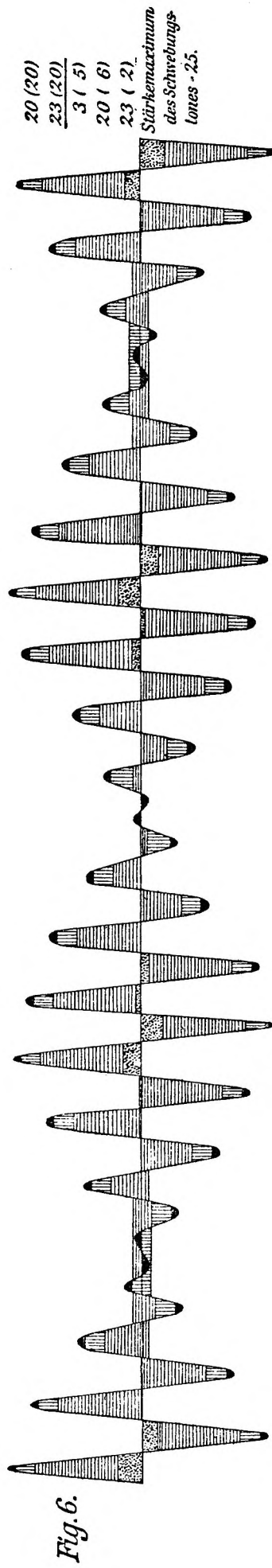
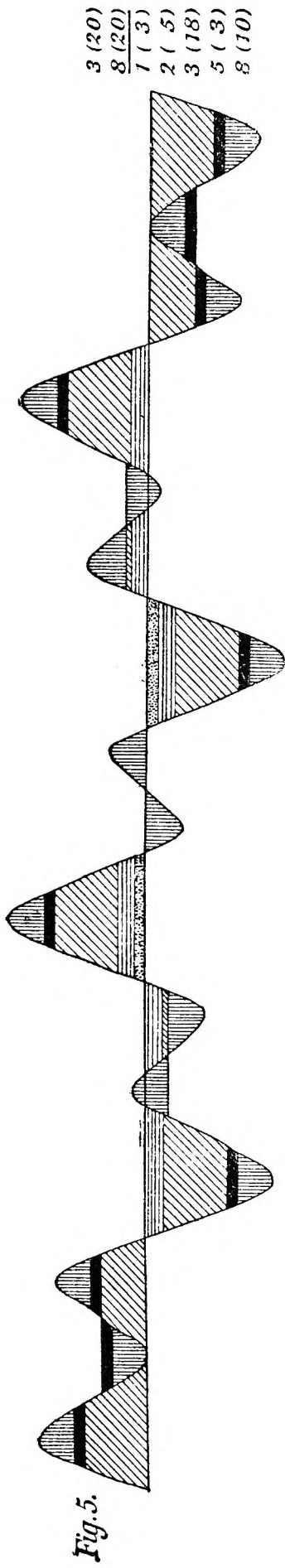
und Minima weniger hat und an einigen Stellen der Abscissenaxe parallel verläuft, was wir jedoch als ein unendlich kleines Auf- oder Absteigen ansehen können. Auf diese neue Kurve wenden wir dieselbe Zerlegungsregel an u. s. w., bis die Kurve auf eine gerade Linie (die Abscissenaxe) zurückgeführt ist.

Ich will nun spezielle Fälle dieser Zerlegungsart erörtern. In Figur 1 haben wir eine Kurve, die zusammengesetzt ist aus den Komponenten 2 und 3. Letztere beiden haben gleich große Amplitude. Sie sind gezeichnet als Sinusschwingungen. Die Tonstärke jeder Komponente nehmen wir nach unserer Definition gleich einem und demselben Zahlenwerte unter Zugrundelegung einer willkürlichen Maßeinheit, und zwar gleich 20. Die kleinste Ordinatendifferenz ist die zwischen den Punkten 12 und 14 der resultierenden Kurve. Die Hälfte dieser Differenz schneiden wir nun von den Spitzen sämtlicher Maxima und Minima ab. Die abgeschnittenen Stücke (3, 4, 5) und (8, 9, 10) ergeben die erste, (11, 12, 13) und (13, 14, 15) die zweite, (16, 17, 18) und (21, 22, 23) die dritte Schwingung. Die Stärke des Tones 3 ist etwa gleich 4. Die übrigbleibende Kurve hat folgenden Verlauf: 1, 2, 3, dann der Abscissenaxe parallel bis 5, dann weiter über 6, 7, 8, der Abscissenaxe parallel bis 10, weiter über 11, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25. Die kleinste Ordinatendifferenz dieser Kurve ist die zwischen (8, 10) und (16, 18). Die abgeschnittenen Stücke (2, 3, 5, 6) und (7, 8, 10, 11) bilden die erste, (15, 16, 18, 19) und (20, 21, 23, 24) die zweite Schwingung. Die Stärke des Tones 2 ist ungefähr gleich 18. Die übrigbleibende Kurve verläuft über 1, 2, 6, 7, dann die Abscissenaxe entlang bis 19, weiter über 20, 24, 25. Nach Abschneiden der halben Ordinatendifferenz ist die ganze Kurve auf eine Gerade zurückgeführt. Die abgeschnittenen Stücke (1, 2, 6, 7) und (19, 20, 24, 25) ergeben eine Schwingung. Die Stärke des Tones 1 ist 16. Die Stärke des Gesamtklanges erhalten wir durch Summation der Stärken der einzelnen Töne, aus denen sich der Klang zusammengesetzt (sc. nach der Zerlegung). Sie ist gleich  $4 + 18 + 16 = 38$ .

Soweit handelte es sich nur um Definitionen mathematischer Größen. Es fragt sich nun, wie diese Definitionen mit den Erfahrungsthatfachen der physiologischen Akustik übereinstimmen. Wenn zu einem Tone ein anderer von gleicher Empfindungsstärke hinzukommt, so haben wir durchaus nicht den







Eindruck einer doppelten Stärke des Empfindungsganzen gegenüber dem ersten Tone allein. STUMPF<sup>1</sup> meint sogar in Bezug auf einen speziellen Fall: „Das Hinzukommen anderer, selbst einer großen Zahl anderer Töne bedingt keine Verstärkung des Empfindungsganzen.“ Unserer Definition entsprechend würden wir in unserem Falle eine Gesamtstärke von 38 statt 40 haben. Der Ton 3, der für sich allein die Stärke 20 hat, behält im Zusammenklänge nur die Stärke 4, der Ton 2 statt 20 die Stärke 18. Daß gleichzeitig erklingende Töne sich gegenseitig schwächen, ist allgemein zu beobachten. „Manches scheint dafür zu sprechen, daß tiefere weniger durch höhere benachteiligt werden, als umgekehrt“,<sup>2</sup> was mit unserer Ableitung übereinstimmt. Schließlich erhielten wir noch einen Ton, der objektiv gar nicht hervorgebracht wurde. Dies ist der in solchem Falle stets vernehmbare Differenzton. Nach der Definition hat er die Stärke 16. Soweit man sich auf den subjektiven Eindruck verlassen kann, steht unsere Ableitung auch in dieser Beziehung durchaus mit den Thatsachen im Einklänge.

Zerlegen wir nun auf dieselbe Weise die Kurve der Fig. 2. Ihre Komponenten sind die Tonwellen 5 und 8. Beide haben für sich allein die Stärke 20. Die kleinste Ordinatendifferenz der Resultante ist die der Punkte 13 und 15, oder 36 und 38, oder 59 und 61. Diese drei Differenzen sind in diesem Falle zufällig gleich groß. Die Hälfte der Differenz schneiden wir nun überall ab. Die abgeschnittenen Stücke (3, 4, 5) und (9, 10, 11) bilden die erste Schwingung, (12, 13, 14) und (14, 15, 16) die zweite, (19, 20, 21) und (26, 27, 28) die dritte, (32, 33, 34) und (35, 36, 37) die vierte, (37, 38, 39) und (40, 41, 42) die fünfte, (46, 47, 48) und (53, 54, 55) die sechste, (58, 59, 60) und (60, 61, 62) die siebente, (63, 64, 65) und (69, 70, 71) die achte Schwingung. Die Stärke des Tones 8 ist 7. Die übrigbleibende Kurve verläuft über folgende Punkte: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 37, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 60, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73. Die kleinste Ordinatendifferenz ist die zwischen (9, 11) und (19, 21). Sie ist hier zufällig gleich groß, wie die zwischen

<sup>1</sup> *Tonpsychologie*. II. 425.

<sup>2</sup> STUMPF. II. 421.



(32, 34) und (40, 42) und die zwischen (53, 55) und (63, 65). Wir schneiden nun wieder von allen Gipfeln und Thälern die Hälfte davon ab. Die abgeschnittenen Stücke (2, 3, 5, 6) und (7, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 18) ergeben die erste, (18, 19, 21, 22) und (25, 26, 28, 29) die zweite, (31, 32, 34, 35) und (39, 40, 42, 43) die dritte, (45, 46, 48, 49) und (52, 53, 55, 56) die vierte, (56, 57, 58, 60, 62, 63, 65, 66, 67) und (68, 69, 71, 72) die fünfte Schwingung. Die Stärke des Tones 5 ist 17. Wieder sehen wir hier die Übereinstimmung mit der Thatsache, daß beim Zusammenklänge der tiefere Ton (17 statt 20) weniger beeinträchtigt wird, als der höhere (7 statt 20). Die jetzt übrigbleibende Kurve verläuft über die Punkte 1, 2, 6, 7, 18, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 35, 37, 39, 43, 44, 45, 49, 50, 51, 52, 56, 67, 68, 72, 73. Die kleinste Differenz ist die zwischen (2, 6) und (68, 72). (2, 6) und (68, 72) sind natürlich benachbart, weil sich die Perioden ja wiederholen. Die abgeschnittenen Stücke (1, 2, 6, 7, 18, 22, 23) und (24, 25, 29, 30) ergeben die erste Schwingung, (44, 45, 49, 50) und (51, 52, 56, 67, 68, 72, 73) die zweite. Die Stärke des Tones 2 beträgt 11. Aber bei dieser Zerlegungsart kommt der Differenzton  $8 - 5 = 3$  gar nicht heraus?! Dies spricht jedoch durchaus nicht gegen die hier angewandte Zerlegung, sondern vielmehr dafür. Denn man hört ja, wie oben erwähnt, wenn die Töne 5 und 8, isoliert genommen, ungefähr gleich stark ertönen, nur sehr schwach den Differenzton 3, dagegen sehr laut und deutlich 2. Mit der Ausdrucksweise, daß das Ohr jede Periodik als Ton empfinde, ist hier gar nichts zu machen; denn was haben die Zahlen 5 und 8 mit einer Periodik 2 zu thun? Die noch übrig gebliebenen Stücke unserer Kurve (43, 44, 50, 51) und (23, 24, 30, 31) geben den Ton 1 mit der Stärke 4. Dieser ist zwar schwer herauszuhören wegen seiner Schwäche und der Verschmelzung mit 2. Doch hat der Ton 2 einen sehr tiefen, brummenden Charakter, was auf das Vorhandensein der Tonempfindung 1 hindeutet.

Wir können jetzt noch etwas näher auf den früher besprochenen Fall eingehen, daß wir die Stimmgabeltöne 5 und 8 jeden für sich in der Stärke variieren. Wir hatten gefunden, daß, wenn 5 stärker ertönte, der Differenzton 2, wenn die Gabel 8 stärker ertönte, der Differenzton 3 sich am meisten bemerkbar machte. Ich habe nun auch eine Kurve konstruiert,

bei der die Komponente 8 eine sehr viel größere Amplitude hat, als 5. Jedoch ergab sich bei der Zerlegung ein Ton 3 von so geringer Stärke, daß ich ihn nicht auf diesem Wege erklären zu können glaube. Ich müßte daher annehmen, daß 3 bei 5 und 8 auf dieselbe Weise entsteht, wie die im Früheren erwähnten Summationstöne bei Stimmgabeln, nämlich im Trommelfell, entsprechend der HELMHOLTZschen Ableitung. Dann müßte nun auch der Summationston 13 entstehen, und ich konnte diesen Ton in der That, wenn auch nicht mit völliger Sicherheit einfach heraushören, so doch durch Schwebungen mit einer ähnlich gestimmten Gabel ohne jeden Zweifel nachweisen. Indessen halte ich es für wahrscheinlicher, daß wir es hier mit einer ausfüllbaren Lücke meiner theoretischen Voraussetzungen zu thun haben, die ich bis jetzt allerdings nicht auszufüllen weiß. Vielleicht würde eine analytische Untersuchung der Kurve zum Ziele führen.

In Figur 3 haben wir eine Kurve, die aus drei gleich starken Komponenten zusammengesetzt ist.<sup>1</sup> Daß der Ton 5 hier bei der Zerlegung gar nicht herauskommt, könnte zunächst widerspruchsvoll erscheinen. Es wird sich jedoch bei der Anwendung auf die im Ohre möglichen Vorgänge zeigen, daß diese, sowie andere aus den Intensitätsverhältnissen erwachsende Schwierigkeiten von selbst verschwinden.

Daß in dieser Klangmasse (5, 8 und 10 in gleichen Tonstärken) der Differenzton 3 sehr stark auftritt, davon kann man sich durch einen Versuch leicht überzeugen. Ich habe auch diesen Fall nicht unvereinbar mit den Thatsachen finden können.

Figur 5 zeigt eine aus den Tönen 3 und 8 zusammengesetzte Resultante. Wir sehen auch hier, daß der höhere Ton (10 statt 20) beim Zusammenklange mehr geschwächt wird als der tiefere (18 statt 20). Die aus der Zerlegung hervorgehenden Differenztöne sind 5, 2 und 1, die man auch wirklich hören kann. Wie schon erwähnt, sind Differenztöne bei einem Intervall der Primärtöne, das größer ist als eine Oktave, stets sehr schwach. Dies steht vollkommen im Einklange mit den Ergebnissen unserer Zerlegung. Bei dieser erhalten wir für den Ton 5 die

---

<sup>1</sup> Die rechts von den Kurven stehenden Zahlen bedeuten die Töne (über dem Strich die Komponenten, darunter die bei der Zerlegung entstehenden), die eingeklammerten Zahlen die relativen Intensitäten.



Stärke 3, für 2 die Stärke 5, während die Primärtöne verhältnismäßig recht stark geblieben sind. Eine Resultante, deren Komponenten um mehr als eine Oktave auseinanderliegen, zeigt uns auch Figur 4. Bei den Primärtönen 4 und 9 ist der Differenzton 5 bisher noch von keinem Beobachter sicher gehört worden. Bei der Zerlegung der Kurve kommt nun der Ton 5 auch gar nicht heraus, wohl aber der Ton 1; und dieser wird in der That auch bei den Primärtönen 4 und 9 gehört.

Die Kurve in Figur 6 ist zusammengesetzt aus 20 und 23. Bei der Zerlegung erhalten wir den Ton 23 mit der Stärke 2 und den Ton 20 mit der Stärke 6. Für die weitere Zerlegung ist, um die Kurven nicht unübersichtlich zu machen, hier, wie in Figur 7, die Schraffierung nicht vollkommen, sondern nur so weit durchgeführt, als es unbedingt nötig war, um die Zerlegung überhaupt vornehmen zu können. Diese selbst wird jedoch dadurch nicht beeinflusst. Wenn nun nach Abtrennung der den Tönen 23 und 20 entsprechenden Stücke von der übrigbleibenden Kurve von neuem der Regel nach Stücke abgeschnitten werden, so zeigt sich, daß an drei Stellen der Periode eine unverhältnismäßig große Unterbrechung stattfindet, so daß wir kein Recht zu der Annahme haben, daß wirklich ein der Zahl der Schwingungen in der ganzen Periode entsprechender Ton entstehen müsse. Wohl aber wird innerhalb einer jeden der drei Teilperioden ein Ton entstehen, da die darin enthaltene Anzahl von Schwingungen unseren experimentellen Ergebnissen nach zur Erzeugung einer Tonempfindung durchaus hinreichend ist. Wenn wir berücksichtigen, daß die zeitliche Aufeinanderfolge etwas schneller als die der regelmäßigen Schwingungen des Tones 20 und langsamer als die von 23 ist, so können wir annehmen, daß dreimal innerhalb der ganzen Periode ein zwischenliegender Ton auftaucht und wieder verschwindet. Die nächsten der Regel nach ausgeführten Abtrennungen ergeben nur eine Verstärkung dieses Zwischentones jedesmal in der Mitte seines zeitlichen Vorhandenseins. Alle abgeschnittenen, diesen Zwischenton erzeugenden Stücke sind daher in der Zeichnung gleichmäßig schraffiert. Wir müßten also hiernach neben den Tönen 20 und 23 einen dreimal innerhalb der Periode in seiner Intensität schwankenden Zwischenton hören. Dies ist nun auch in der That der Fall. Das Maximum der



Stärke dieses Zwischen- oder Schwebungstones würde sich aus der Zeichnung gleich 25 ergeben.

Da nun nach den obigen experimentellen Feststellungen zwei und auch selbst drei Schwingungen keine oder doch nur eine sehr unvollkommene Tonempfindung liefern, so ist anzunehmen, daß diese Schwingungen dieselbe Wirkung wie eine einzige haben. Wir würden also in der Mitte jeder der drei Teilperioden eine, zwei oder drei der Zerlegung nach sich entsprechende Schwingungen<sup>1</sup> als je eine Schwingung in Rechnung bringen, die den Ton 3 erzeugen würde. Dies entspricht nun vollkommen den objektiven Thatsachen, denn man hört wirklich neben den Schwebungen auch noch den entsprechenden Differenzton. Seine Stärke ist der Zeichnung nach gleich 5.

Die Kurve in Figur 7 enthält außer den Komponenten 20 und 23 mit einer Stärke von je 20 auch noch 4 mit der Stärke 10. Die Zerlegung der Kurve ergibt die Töne 23 mit der Stärke 1 und 20 mit der Stärke 6. Das Stärkemaximum des zwischen 20 und 23 liegenden Schwebungstones ist 27. Der Ton 4 kommt gar nicht heraus. Wenn man in Bezug hierauf den Einwand machen wollte, daß er im Zusammenklange in Wirklichkeit doch nicht leicht gänzlich verschwindet, so können wir dem zunächst freilich nicht entgegen treten. Wir werden aber bald sehen, daß diese Schwierigkeit sich beseitigen läßt. Der Differenzton 3 erhält nur die Stärke 2. Neu erscheint hier der Differenzton 1 mit der Stärke 12. Dieser Ton wird auch thatsächlich in diesem Falle laut gehört. In der bisher gebräuchlichen Ausdrucksweise müßte man sagen, der Differenzton 3 erzeugt mit dem objektiven Tone 4 den sekundären Differenzton 1, was seine Schwierigkeiten hat, weil nicht recht einzusehen ist, wie der objektiv gar nicht existierende Differenzton 3 einen neuen erzeugen solle. Nach der hier angewandten Zerlegung ergibt sich der Differenzton 1 sehr einfach aus der Gestalt der zusammengesetzten Kurve.

Wir hätten somit einen Weg gefunden, das Heraushören der Teiltöne aus einem zusammengesetzten Klange, den Zwischen-

---

<sup>1</sup> Bei der Zerlegung wird die Zahl der den Zwischenton verstärkenden Schwingungen bei jeder neuen Abtrennung kleiner, bis nur 3, 2 und schließlich nur eine übrig bleiben.

ton bei kleinen Intervallen, Schwebungen, sowie Differenztöne beliebig hoher Ordnung — alles aus einem und demselben Prinzip — herzuleiten, ohne daß wir die Hypothese machen müßten, daß die resultierende Klangwelle im Ohre durch Resonatoren zerlegt werde (wir kommen jedoch hierauf noch einmal zurück), durch die zwar die Zerlegung des Klanges in seine Teiltöne, auch wohl primäre Schwebungen und unter gewissen Voraussetzungen auch der Zwischenton,<sup>1</sup> nicht aber die anderen akustischen Erscheinungen erklärt werden können. Die hier zur Anwendung gebrachte neue Zerlegung würde aber bei aller Übereinstimmung mit den thatsächlichen Verhältnissen nicht viel mehr als eine geometrische Spielerei sein, wenn wir nicht auch die physikalische Möglichkeit einer derartigen Zerlegung nachweisen könnten. Dieser Nachweis nun ist ohne besondere Schwierigkeit zu führen.

Denken wir uns ein unvollkommen elastisches Stäbchen, das an einem Ende befestigt sei und am anderen Ende einer unserer Kurven gemäß hin und her geführt werde; dann werden die entsprechenden Wellen in dem Stäbchen fortschreiten, aber infolge der unvollkommenen Elastizität gedämpft werden und schließlic verschwinden. Die Elastizität des Stäbchens soll so beschaffen sein, daß die Strecke vom freien Ende bis zu dem Punkte, an dem eine Welle verschwunden ist (genauer gesagt: auf eine nicht mehr in Betracht kommende Größe herabgesunken ist), proportional ist der ursprünglichen Höhe der Welle. Unter dieser Voraussetzung wird sich der überhaupt schwingende Teil des Stäbchens in so viele Teile zerlegen, als wir bei unserer Zerlegung der Kurve Töne erhielten. Die Längen dieser einzelnen Teile werden den Größen entsprechen, die wir als Maß der Tonstärken definiert haben, die Zahl ihrer Hin- und Herbewegungen den Schwingungszahlen der bei der Kurvenzerlegung sich ergebenden Töne; und zwar wird der zunächst am freien Ende befindliche Stäbchenteil die meisten, der am weitesten davon entfernte die wenigsten Schwingungen machen.

Man kann sich einen ähnlichen Vorgang folgendermaßen anschaulich machen. Wir verbinden eine Anzahl von Gliedern durch Gelenke und machen das eine Endglied irgendwo fest.

---

<sup>1</sup> STUMPF, *Tonpsychologie* II, S. 484.



Die Gelenke sind so eingerichtet, daß sie nur eine Drehung um einen bestimmten kleinen Winkel gestatten. Ferner ist die Reibung in dem letzten Gelenke am freien Ende der Gliederreihe am kleinsten und nimmt zu, bis sie bei dem Gelenke am befestigten Ende ihren größten Wert erreicht. Ziehen wir nun das freie Ende etwas nach seitwärts, so wird sich zunächst das äußerste Glied um sein Gelenk drehen, bis der Grenzwinkel erreicht ist. Alsdann wird es das nächste Glied mit sich ziehen u. s. w. Die neben Figur 1 gezeichneten Striche sollen uns eine schematische Darstellung der Bewegungsart geben, wenn das freie Ende der Kurve in Figur 1 entsprechend hin und her geführt wird. Eine Aufwärtsbewegung auf der Kurve soll gleichkommen einer Bewegung des freien Endes nach rechts, eine Abwärtsbewegung einer solchen nach links. Beim Punkte 4 der Kurve wird ein bestimmter Teil der Gliederreihe (in der Figur sind nur die drei Einzelstücke davon, und zwar immer gerade gezeichnet) nach rechts hin gebogen sein. Bei 5 ist das äußerste Stück davon wieder nach links gebogen. Wir bezeichnen es mit I. Der Rest zerlegt sich in zwei Stücke, die wir mit II und III bezeichnen. Bei 6 ist auch II wieder zurückgebogen. Bei 9 hat III die ursprüngliche Lage wieder erreicht. Bei 10 wird I allein nach rechts gebogen u. s. w. Auf 3' folgt wieder 4, so daß der ganze Vorgang periodisch verläuft. Sehen wir uns nun die Bewegung an, so finden wir, daß I während der Periode dreimal, II zweimal und III einmal hin und her gegangen ist. Wir erhalten also für jeden aus unserer Zerlegung sich ergebenden Ton einen besonderen hin und her sich bewegenden Teil der Gliederreihe.

Wir können uns nun die einzelnen Teile des vorausgesetzten Stäbchens mit nervösen Endorganen verbunden denken, und zwar gleiche Längen mit einer gleichen Anzahl von Ganglienzellen. Ferner können wir uns vorstellen, daß bei einer Reizung der Zelle eine chemische Zersetzung bewirkt wird, die qualitativ abhängig ist von der Zahl der in der Zeiteinheit erfolgenden Reizungen, so daß verschiedenen Tönen verschiedene chemische Prozesse entsprächen. Die Quantität der Zersetzung und damit die Intensität der Tonempfindung könnte abhängig sein von der Zahl der gereizten Nervenzellen. Nehmen wir dann an, wie es A. MAYER für das Wahrscheinlichste hält, daß bei den Tonempfindungen die Empfindungsintensität proportional dem



Reize wächst, so würden die unserer Definition entsprechenden Tonstärken, wie sie sich bei der Zerlegung der Kurve herausstellen, direkt als Maß der Empfindungsstärke gelten können. Man kann jedoch auch ein anderes Gesetz der Abhängigkeit zwischen Reiz und Empfindung annehmen; mit unserer Zerlegung hat das gar nichts zu thun. Mit einer spezifischen Energie der einzelnen Nervenendigungen sind die hier gemachten Annahmen freilich unvereinbar.

Es fragt sich nun, ob wir im Ohre Organe haben, denen man die Funktion unseres Stäbchens zuschreiben könnte. Dabei kämen wohl nur die CORTISCHEN Bögen in Betracht, die sich bekanntlich durch eine gewisse Festigkeit vor den anderen, weicheren Teilen des eigentlichen Gehörorganes auszeichnen. Vielleicht könnte man annehmen, daß der eine Pfeiler eines jeden Bogens nur dazu dient, um die Schwingungen der Basilar-membran direkt auf das Ende des anderen Pfeilers zu übertragen, in dem dann die Wellen, wie wir es vorausgesetzt haben, mit starker Dämpfung fortschreiten würden. Hierbei ist vorausgesetzt, daß eine objektive Klangwelle die ganze Membran nach Art dieser Klangwelle in Bewegung versetzt, und daß die Zerlegung der Gesamtwellen dann nicht nur durch ein Stäbchen, sondern durch sämtliche CORTISCHE Bögen ausgeführt wird. Bei der so sehr starken Dämpfung der Membran kann man es sich gar nicht anders vorstellen, als daß durch jede Klangwelle die ganze Membran in Bewegung versetzt wird. Daneben aber ist es nicht unmöglich, daß die einzelnen Teile der Membran auf bestimmte Töne in Eigenschwingungen mitschwingen. Darauf deutet schon die verschiedene Breite der Membran an verschiedenen Stellen hin. Wir würden dann für die einzelnen Töne eines Zusammenklanges an den entsprechenden Stellen der Membran Schwingungsmaxima anzunehmen haben, während nach HELMHOLTZ nur diese Stellen überhaupt schwingen. Denken wir uns z. B., die einwirkende Luftwelle habe die Bildung von Figur 3, so würden die Bewegungen der Membran dieser Kurve vollständig entsprechen mit Ausnahme von den drei Stellen, wo die Membran für die Töne 5, 8 und 10 Schwingungsmaxima besitzt. In der Nähe dieser Stellen muß die Membran Bewegungen machen, die nur wenig abweichen von den Schwingungen, die den Einzeltönen zukommen. Wir können daher nicht direkt von der Kurve der Luftwellen auf die Beschaffen-

heit und die Stärke der Tonempfindungen schliessen, sondern müssen die Kurve der Membranbewegung für jede einzelne Stelle der Membran zerlegen und die Einzelergebnisse summieren. Dann fällt selbstverständlich der Ton 5 bei dem Zusammenklange 5, 8, 10 nicht aus. Auf diese Weise erledigen sich auch sehr einfach die übrigen Schwierigkeiten in betreff der Intensitätsverhältnisse, wie bei Figur 7 der Ausfall des Tones 4.

Gegen diesen Versuch, das Zustandekommen der Tonempfindungen zu erklären, könnte man vielleicht gewisse pathologische Vorkommnisse geltend machen, namentlich das Doppelt-hören. Diese Erscheinungen lassen sich auf Grund der HELMHOLTZschen Theorie<sup>1</sup> ganz gut, aber doch nicht ganz einwandfrei deuten, wie die Fälle zeigen, in denen ein Ton bei Knochenleitung richtig, bei Luftleitung verstimmt gehört wurde.<sup>2</sup> Man kann diese pathologischen Erscheinungen weder als einen strengen Beweis für die Richtigkeit der HELMHOLTZschen Hypothese noch als unvereinbar mit den hier entwickelten Voraussetzungen ansehen.

Wir sind somit wieder zu der alten Theorie von dem Einflusse der Kurvengestalt auf unsere Gehörsempfindungen zurückgekehrt. Aber es ist doch ein sehr wesentlicher Unterschied zwischen der hier angenommenen Hypothese und jener alten Theorie. Diese stellte die rein spekulative Behauptung auf, das Ohr habe eine Einsicht in die Form der Tonwelle, was ebenso grundlos ist, wie die andere, ebenfalls oft ausgesprochene Behauptung, die Konsonanzen würden deshalb als angenehm klingend empfunden, weil die Seele die einfachen Verhältnisse der Schwingungszahlen der Töne erkenne und ihre Freude daran habe. Hier ist gezeigt worden, daß unter Voraussetzung eines gewissen einfachen, rein mechanisch wirkenden Apparates im Ohre der Gestalt der Kurve der Schwingung ein Einfluß zugeschrieben, und daß auf diese Weise für eine Anzahl wichtiger akustischer Thatsachen möglicherweise eine Erklärung gewonnen werden kann, nach der man unter Voraussetzung der bisherigen Theorien vergeblich gesucht hat.

Ich möchte jedoch zum Schlusse noch ausdrücklich darauf hinweisen, daß es mir fern liegt, die von HELMHOLTZ aufge-

<sup>1</sup> STUMPF, *Tonpsychologie*. I. S. 275 f.

<sup>2</sup> *Arch. f. Ohrenheilkde.* Bd. 41.

stellte Theorie der Kombinationstöne durch die hier entwickelte ersetzen zu wollen. Jene soll durchaus unangetastet bleiben, aber eingeschränkt werden auf die Fälle, in denen sie wirklich Geltung hat; diese soll die Möglichkeit zeigen, die von HELMHOLTZ nicht erklärten Thatsachen als gesetzmäßig abhängig von der Funktion unseres Gehörorgans zu verstehen.

---

Es bleibt mir nur noch übrig, den im Vorstehenden erwähnten Herren, die mich bei den Beobachtungen unterstützten, auch an dieser Stelle meinen Dank auszusprechen, namentlich Herrn cand. phil. V. HEYFELDER, der mir bei den überaus zeitraubenden Vorversuchen stets bereitwillig seine Unterstützung lieh.

Herrn Prof. HERMANN in Königsberg habe ich zu danken für die Liebenswürdigkeit, mit der er es mir ermöglichte, die von ihm zuerst angestellten Zahnradversuche an demselben Apparate zu wiederholen.

Vor allem aber ist es meine Pflicht, Herrn Prof. STUMPF meinen ehrerbietigsten Dank abzustatten für die Anregung zu dieser Arbeit und Unterstützung bei ihrer Ausführung, namentlich auch durch seine eigene Beteiligung an den meisten der beschriebenen Versuche.

---