

# Ueber binaurale Schwebungen.

Von

**Paul Rostosky.**

Großenhain.

Mit 5 Figuren im Text.

---

Die vorliegende Arbeit soll ein Capitel aus einer im Leipziger Institut für experimentelle Psychologie vorgenommenen und schon vor ca. 7 Jahren abgeschlossenen Untersuchung »über functionelle Beziehungen beider Gehörorgane« behandeln, deren erster, ausschließlich historisch-kritischer Theil, die einschlägige Literatur bis 1896 behandelnd, bereits 1897 in den »Beiträgen zur Psychologie und Philosophie« von G. Martius erschien. Die spätere berufliche Thätigkeit ließ mich aber nicht mehr zu einer umfassenden Bearbeitung des reichen Versuchsmaterials und seiner äußerst mannigfaltigen Consequenzen gelangen. So will ich nun wenigstens bei dieser festlichen Gelegenheit, die den Wunsch, das Resultat mehrjähriger Arbeit doch nicht ganz der Vergessenheit anheim fallen zu lassen, besonders regemacht hat, einen kleinen Theil aus jener Untersuchung, der z. Z. von besonderem Interesse sein dürfte, nämlich den Abschnitt über die binauralen Schwebungen der Oeffentlichkeit übergeben. Ich möchte damit zugleich dem Herrn Jubilar, meinem hochverehrten Lehrer, zu einem kleinen Theile eine Dankesschuld für die reiche Unterstützung und Förderung abtragen, die ich durch ihn bei meiner experimentellen Untersuchung erfahren habe.

### Einleitung.

Da ich nun, wie gesagt, hier nur ein Capitel bringen kann, so glaube ich, doch wenigstens einiges über den ehemaligen Plan des Ganzen vorausschicken zu müssen.

Ostern 1893 begann ich auf Anregung des Herrn Geheimrath Wundt eine Untersuchung über die Entstehung der binauralen Schwebungen. Bereits zu Pfingsten desselben Jahres war ich zu einem Resultate gelangt, das meiner Meinung nach eigentlich schon entscheidend war. Ich setzte dennoch die Untersuchung fort, einerseits weil ich einigen mir geäußerten Zweifeln gegenüber noch weitere Stützen für mein Ergebniss zu gewinnen hoffte, anderseits weil eine Reihe interessanter Nebenbeobachtungen mich zu besonderer Behandlung derselben reizte. So erweiterte sich mir die Aufgabe, der ich dann den schon oben erwähnten Titel gab. Mit dem Gegenstande der Untersuchung wuchs natürlich auch die Literatur, welche ich in den Kreis der Betrachtung zu ziehen hatte, und zwar in dem Maße, dass sich die historisch-kritische Uebersicht, die ich anfangs der Arbeit nur als Einleitung vorausschicken wollte, zu einer selbständigen Abhandlung entwickelte.

Die derzeit vorliegenden Erfahrungen über functionelle Beziehungen beider Gehörorgane gruppirt<sup>te</sup> ich darin nach den am Empfindungsorganen beobachteten Besonderheiten der Intensität, der Qualität, der Localisation und der Zusammensetzung. Auf Grund kritischer Betrachtungen, die überall eingestreut und besonders am Schluss jedes Abschnittes zusammengefasst wurden, glaubte ich dann, in der Hauptsache drei Arten von Functionsbeziehungen beider Gehörorgane unterscheiden zu können, nämlich 1) die unmittelbaren, bei denen die beiderseitigen Erregungen in oscillatorischer Form direct zu einer vollen Mischung gelangen, 2) die mittelbaren, bei denen die Beziehung nur in einer wechselseitigen Beeinflussung besteht, die durch besondere locale Bedingungen im Verlaufe der beiderseitigen Erregungen vermittelt werden mag, endlich 3) die heterogenen, bei denen sich an die bilateralen akustischen Erregungen gemeinsame Wirkungen knüpfen, die von einer Hörempfindung als solcher nichts mehr an sich haben. Als Beziehungen der ersten Art hat man die Interferenzerscheinungen, die binauralen Schwebungen und Combinationstöne zu betrachten;

denjenigen der zweiten Art sind die nichtperiodischen (d. h. von der momentanen Phasendifferenz der beiderseitigen Erregungen unabhängigen) Intensitätsmodificationen und Aenderungen der Qualität zuzurechnen; solche der dritten Art endlich haben wir in den Localisationserscheinungen vor uns. Dieser Eintheilungsplan sollte der Bearbeitung meiner eigenen Versuchsergebnisse zu Grunde gelegt werden. So schwebte mir auch bei der Abfassung dieser Arbeit, obwohl dieselbe durchaus nicht als erster von mehreren Abschnitten gedacht ist, noch immer jenes Gesamtbild vor, hoffentlich ohne ihre Verständlichkeit zu beeinträchtigen.

### Versuchseinrichtung.

Die Einrichtung, mit welcher ich meine Untersuchungen ausführte, wich in mehrfacher Hinsicht von den üblichen Versuchsanordnungen ab. Ich ging bei deren Aufbau darauf aus, die mannigfaltigsten, irgend in Betracht kommenden Experimente zwecks vergleichbarer Bedingungen mit dieser selben Einrichtung anzustellen. Demgemäß musste dieselbe die einzelnen Factoren, welche bei der akustischen Reizung auf die Empfindung Einfluss haben, nach Möglichkeit rein, sowie unabhängig und continuirlich variabel darzustellen und in verschiedene Verbindungen zu bringen gestatten. Solcher Factoren können wir nun überhaupt folgende unterscheiden: erstens hinsichtlich der Reizquelle, und zwar einerseits den Einzelreiz betreffend, Amplitude und Wellenlänge, andererseits eine Summe solcher angehend, Zahl und Phasendifferenz, zweitens hinsichtlich der Beziehung des Reizes zum Reagenten, und zwar auf Seiten der Reizquelle, Entfernung und Richtung, aus welcher der Reiz kommt, auf Seiten des Reagenten, Art, Ort und Dauer der Reizapplication. Diese theoretisch ausgeschalteten Factoren verdienen natürlich nicht alle die gleiche Berücksichtigung. Die Vernachlässigung eines solchen erscheint gerechtfertigt, sobald entweder im Allgemeinen seine Zurückführbarkeit auf andere Factoren feststeht, wie dies z. B. für die Richtung und Entfernung gilt, aus welcher ein Schall kommt, oder im Besonderen sich etwa seine Unvereinbarkeit mit andern Factoren in derselben Versuchsanordnung ergibt, oder seine Bedeutungslosigkeit für eine engere Frage evident ist. So wird sich z. B. eine Variation

der Phasendifferenz bei zwei auf kranio-tympanalem Wege zugeleiteten Reizen schwerlich ermöglichen lassen, und bei aëro-tympanaler Reizzuführung kann von einer Variation des Ortes der Reizapplication nicht gesprochen werden. In der Natur unserer Frage dagegen liegt es, dass die Reizdauer zumeist nur eine untergeordnete Rolle spielt, und dass man im Allgemeinen nicht mehr als zwei Reize gleichzeitig zuzuleiten hat. Daneben kann gleich hier bemerkt werden, dass man als Reize am besten einfache Töne verwendet, die allein eine exacte Variation von Amplitude, Wellenlänge und Phase zulassen.

An der Versuchseinrichtung sind nun zunächst zwei Theile zu unterscheiden, der schallgebende und der schallleitende Theil.

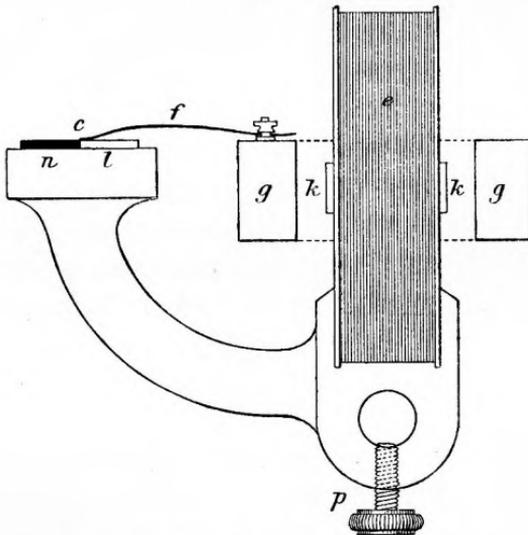
### 1. Der schallgebende Theil.

Als Schallquellen benutzte ich Stimmgabeln, meistens solche in mittleren Lagen. Innerhalb gewisser Grenzen war ihre Tonhöhe wie gewöhnlich durch Laufgewichte regulirbar. Alle Gabeln wurden auf elektrischem Wege angeregt und in Schwingungen erhalten. Jedoch erwies sich nur die directe Erregung als brauchbar. Mit Hülfe der bekannten indirecten Anregung durch eine tiefere Gabel ließ sich nie ein glatter, von allen Schwankungen der Höhe und namentlich der Intensität freier Ton erzielen. Selbst wenn die secundäre Gabel anfangs in peinlichster Weise auf ein Vielfaches der Schwingungszahl der tieferen Gabel gestimmt war, so deuteten doch regelmäßig schon nach kurzer Zeit Intensitätsschwankungen der secundären Gabel auf eine Verstimmung derselben, die vielleicht in einer nach der Manipulation des Stimmens unvermeidlich eintretenden kleinen Temperaturänderung der Gabel oder in sonst irgend einem Umstande ihre Ursache haben mochte. Aber gerade für unsere Aufgabe, speciell für die Untersuchung der binauralen Schwebungen war es naturgemäß von höchster Wichtigkeit, Töne zu erzielen, die an sich nicht die geringsten Intensitätsschwankungen zeigten, zumal eine fortdauernde Controle der Gabeln, die sich doch in verschiedenen Zimmern befinden mussten, während der Versuche ausgeschlossen war. So blieb nichts anderes übrig, als die Gabeln auf elektrischem Wege direct in Schwingungen zu versetzen. Ein Quecksilbercontact war aber hier nicht brauchbar, theils weil dafür ihre Frequenz zu groß war, theils

weil ihre freie Handhabung durch einen solchen unmöglich gemacht wurde. Bei einem trockenen Contact aber war wieder das Geräusch der Contactfeder und des Funkens äußerst störend. Nach verschiedenen vergeblichen Versuchen glückte es jedoch, beides fast völlig zu beseitigen.

In den mit grüner Seide umspunnenen dünnen Leitungsschnüren befindet sich gewöhnlich neben einem ganz schwachen Kupferdrahte

Fig. 1.



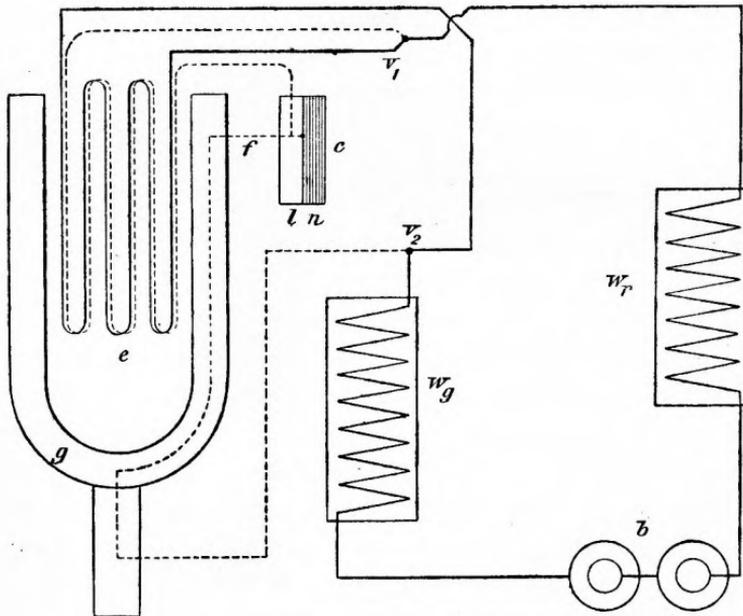
Montirung der aufrecht stehenden Gabel von oben gesehen.

*gg* Gabelzinken, *e* Elektromagnetspule, *kk* Spulenkern, *f* Contactfaden, *c* Contactfläche, *l* leitender, *n* nichtleitender Theil derselben, *p* Klemme zur Feststellung der Spule in verschiedenen Höhen.

ein Bündel gelber mit Metall umspinnener Seidenfäden. Letztere fand ich als das geeignetste Material für die Contactfedern. Die Contactfläche wurde aus zwei mit den Gabelzinken gleichlaufenden Streifen aus Platin und Kautschuk hergestellt und in die Ebene der Zinken neben eine derselben gebracht, an welcher in ihrer Schwingungsrichtung der Contactfaden derart befestigt wurde, dass seine Spitze bis zur Berührungskante jener beiden Streifen reichte (Fig. 1). Zwischen die Gabelzinken wurde eine große flache kreisrunde Elektromagnetspule mit kurzem Kern gebracht und konnte dort durch

Verschiebung längs eines Stabes, der zugleich zur Leitung des Stromes diente, verschieden hoch eingestellt werden, wie es gerade die verwendete Gabel erforderte. Die Spule selbst wurde mit einer Differentialwicklung versehen, wodurch die Funkenbildung an der Contactstelle vollständig vermieden wurde. Das Leitungsschema ist folgendes: Die beiden von den Polen der Batterie kommenden Drähte

Fig. 2.



Schaltungsschema für die Gabel.

*g* Gabel, *e* Elektromagnetspule, *f* Contactfaden, *c* Contactfläche, *l* leitender, *n* nichtleitender Theil derselben,  $v_1$   $v_2$  Verzweigungsstellen, *wg* *wr* Widerstände an der Gabel bzw. im Reagentenzimmer, *b* Batterie.

vereinigen sich zu der bifilaren Wicklung der Spule, worauf der eine den Strom direct, der andere über Contact und Gabel zur Batterie bzw. zu deren Anschlussdrähten zurückführt. Vor den Verzweigungen sind an passenden Stellen (am besten am Gabelgestell und im Reagentenzimmer) kleine Widerstände zur Regelung der Tonstärke der Gabel, sowie Unterbrecher einzuschalten (Fig. 2).

Durch diese Einrichtungen erreichte ich endlich, dass das schwache schwirrende Geräusch der Feder höchstens unmittelbar an der Gabel

hörbar war, während schon in ganz geringer Entfernung von derselben, ja selbst beim Aufsetzen des Gabelfußes auf den Kopf nur immer ein ganz reiner glatter Ton gehört wurde, der, so lange jedesmal die Versuche währten, ununterbrochen mit constanter Intensität erklang. Auch konnten auf diese Weise Gabeln jeder Tonhöhe bis zu ca. 1500 Schwingungen p. s. direct erregt werden. Obertöne, welche die Resultate hätten störend beeinflussen können, wurden von den Reagenten bei den Versuchen nicht bemerkt, obwohl ja solche, wie schon aus der Schwingungskurve elektrisch erregter Gabeln zu ersehen ist, sicher in den Stimmgabelklängen vorhanden waren. Sie auch objectiv völlig auszuschließen, war schon aus diesem Grunde weniger erforderlich und wäre freilich auch schwerlich gelungen. Für die Bestimmung der Tonhöhe der zu den Versuchen verwendeten Gabeln genügten die bekannten Appunn'schen Tonmesser. Die Gabeln waren sammt ihrer Montirung an einer Handhabe befestigt, welche am Ende von dem Stimmgabelfuß durchbohrt wurde. So konnte, wenn nöthig, auch bequem die schwingende Gabel mit ihrem Fuße auf beliebige Stellen des Kopfes aufgesetzt werden.

## 2. Der schalleitende Theil.

Dieser hat den beiden möglichen Arten der Reizzuführung, der äéro- und der kranio-tympanalen Zuleitung entsprechend ein sehr verschiedenes Aussehen<sup>1)</sup>.

### a) Anordnung für äéro-tympanale Reizzuleitung.

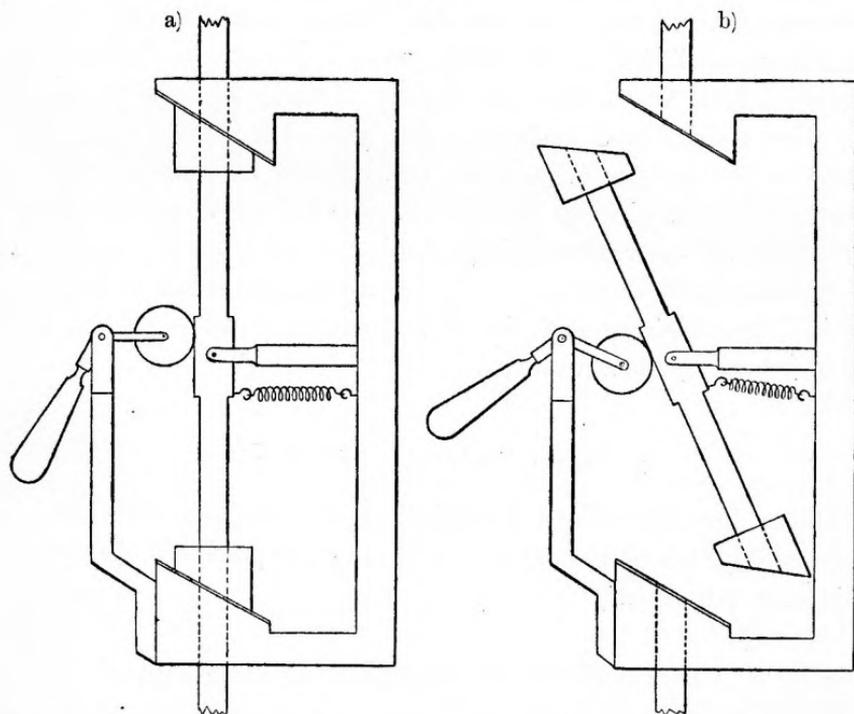
Die Zuleitung der Töne zu den Ohren, die natürlich so erfolgen musste, dass jedes Ohr, soweit dies äußerlich erreichbar ist, ausschließlich seinen Reiz auf demjenigen Wege empfing, welcher der Zuleitung dienen sollte, erforderte eine ziemlich subtile Versuchsanordnung. Jede

---

1) Die Zuleitung von Tönen durch die Eustachischen Röhren mit Hilfe eingeführter Katheter gelang bei mir nicht, wohl infolge sofort eintretender Verschleimung, wiewohl ich sonst die Tuben willkürlich zu öffnen und offen zu halten vermag, so dass ich die eigene Stimme dröhnend vernehme. Zu den sehr wenig angenehmen Katheterversuchen, bei welchen mich Herr Ohrenarzt Dr. med. Pfeiffer in dankenswerthester Weise unterstützte, noch andere Reagenten zu suchen, schien mir hiernach in doppelter Beziehung nicht sehr aussichtsvoll.

der bei einem Versuche verwendeten Gabeln befand sich in einem besonderen Zimmer, wo sie nur so schwach, als es die Versuche eben zuließen, erregt wurden. Das ganze Gabelgestell war mittelst Fäden an einem Stative aufgehängt, dessen Fußplatte durch Filz- und Wattenunterlagen von der Tischplatte getrennt war. Auch der Tisch stand auf Filzklötzchen. Infolge dieser Maßregeln konnten sich natürlich

Fig. 3.



Absperrvorrichtung. a) geschlossen. b) geöffnet. (An den schrägen Flächen des Rahmens befindet sich ein schwacher Gummiüberzug.)

außer auf dem für die Ueberleitung vorgesehenen Luftwege weder durch die Luft noch durch feste Theile irgendwelche Erschütterungen bis in's Reagentenzimmer fortpflanzen. Auch das Eindringen etwaiger von den Zimmerwänden u. s. w. reflectirter Wellen in den gegebenen Luftweg konnte infolge der geringen Stärke der verwendeten Töne für völlig ausgeschlossen gelten. Von jeder Gabel führten nun zwei von einander völlig getrennte, gleich lange, aus Messingröhren hergestellte Leitungen

— Gummischläuche erwiesen sich wegen der Veränderlichkeit ihrer Länge und ihrer Gestalt (hinsichtlich Krümmung und Querschnitt) als durchaus unbrauchbar — bis in das Reagentenzimmer. Ihre Enden an der Gabel lagen, mit ihren Oeffnungen den Gabelzinken zugewandt, in der Ebene derselben über einander, natürlich ohne sich zu berühren. Auch in ihrem weiteren Verlaufe waren sie überall, insbesondere auch an den Befestigungsstellen durch Filz und Watte von den Fußböden und Wänden der Zimmer isolirt. Im Reagentenzimmer mündete die eine von ihnen gegenüber dem einen Ohre, die andere Leitung vor dem anderen Ohre des Beobachters. Insgesamt führten also von den beiden bei der Untersuchung der Schwebungen benutzten Gabeln vier unter sich gleich lange Leitungen in den Beobachtungsraum, und zwar mündeten immer zwei aus verschiedenen Zimmern kommende vor demselben Ohre des Reagenten. Die Mündungen lagen auch hier über einander. Eine Vorrichtung zur geräuschlosen und fast momentanen Zuführung und Absperrung des Reizes befand sich in jeder der vier Leitungen im Beobachterzimmer und leistete besonders gute Dienste bei der successiven Intensitätsvergleichung diotischer Reize (Fig. 3). Ich hatte diese Vorrichtung einem gewöhnlichen Absperrhahn seiner Zeit auch deswegen vorgezogen, weil bei ihrer Function kein Reibungsgeräusch den Reagenten stört, und keine Querschnittsänderung in der Leitung stattfindet. Für Darbietung zeitlich genau begrenzter Reize eignet sie sich natürlich in dieser Form nicht.

Alle irgend erforderlichen Krümmungen in den Leitungen befanden sich an correspondirenden Stellen derselben, waren von gleicher Gestalt und Größe und unterschieden sich lediglich durch die Richtung. Es hatte sich nämlich gezeigt, dass mittelst ausziehbarer U-förmig gebogener Röhrentheile, welche in den Leitungen als eine Art Quincke'scher Interferenzapparate angebracht waren, um Wege- und Phasendifferenzen einführen zu können, fast niemals die aus ihrer Einstellung in der gewöhnlichen Weise berechneten Interferenzen der hindurch geleiteten Töne zu erzielen waren. Die unberechenbaren Reflexionen des Schalles an jeder Krümmung müssen diese Abweichungen verursachen. In der That traten solche Interferenzen sofort in durchaus regulärer Weise auf, als ich die Wegeveränderung nur durch Verlängerung oder Verkürzung der Leitung an langen geradlinigen Endstücken derselben im Reagentenzimmer bewirkte und außerdem nur die Richtung der

Krümmungen im Vergleich zu einander änderte. Ihr Ort im Verlaufe der Leitungen, von den Gabeln aus gerechnet, blieb immer derselbe. Jene Längenänderungen der Leitungen mussten natürlich in der Weise geschehen, dass die Mündungen dabei ihre Entfernung vom Reagenten nicht änderten, mithin so, dass aus den letzten festen Röhrenstücken genau passende eingeschobene Rohre nach der vom Reagenten abgewendeten Seite ausgezogen wurden. Die Größe des Auszuges konnte beiderseits an Scalen in cm abgelesen werden. Die festen Rohrstücke lagen, wie angedeutet, ungefähr in der die Gehörgänge verbindenden Geraden. An ihren dem Reagenten zugekehrten Enden waren noch besondere kurze, mit Mündungsstücken aus Hartgummi versehene Röhren eingeschoben, deren Entfernung vom Reagenten mikrometrisch regulirt werden konnte. Hierdurch war es möglich, die Reizintensität für jedes Ohr auf's Feinste abzustufen; auch konnten die Mündungsstücke auf diese Weise bis in die Gehörgänge des Beobachters vorgeschoben werden. Ein Paar jener Mündungsstücke hatte noch besondere kugelige Ansätze, welche genau in die Gehörgänge passten, so dass hierdurch ein Abschluss gegen etwaige nicht durch die Zuleitungsröhren dringende Reize erzielt werden konnte. Am Platze des Reagenten war für eine Kopfstütze gesorgt, die, ohne unbequem zu werden, besonders seitliche Bewegungen des Kopfes, durch welche die Entfernungen zwischen den Gehörgängen und den Röhrenmündungen geändert worden wären, ziemlich unmöglich machte.

b) Anordnung für kranio-tympanale Reizzuleitung.

Den Hauptanforderungen genügt hier eine sehr einfache Versuchseinrichtung, in der freilich einige der oben genannten Factoren nicht genügende Berücksichtigung finden; jedoch machen, wie wir unten sehen werden, hier zum Theil schon natürliche Umstände eine Bemühung überflüssig.

Was zunächst den Ort der Reizapplication betrifft, so kann derselbe natürlich auf der Oberfläche des Kopfes eine sehr verschiedene Lage haben. Zur Orientirung auf der Schädeloberfläche und zur Festlegung gewisser Punkte daselbst bediente ich mich eines weitmaschig gehäkelten Netzes aus festem, wenig nachgiebigem Garn, das durch verschiedenfarbige Radien und Ringe übersichtlich eingetheilt war, und welches bei diesen Versuchen immer in derselben Weise über

den Kopf gezogen wurde. Dass die am passendsten mittelst fester Leiter zu bewirkende Schallzufuhr zum Kopfknochen an den Ansatzstellen nach Möglichkeit scharf und eng begrenzt, sowie unter sorgfältigem Ausschluss jeder gleichzeitigen Schallzuleitung auf anderem Wege zu erfolgen hatte, bedarf kaum der Erwähnung. Vor solchen störenden Nebeneinflüssen, die namentlich, wenn die Schallquellen ohne längere Leitung mit dem Kopfknochen in Verbindung gebracht werden, auch von diesen selbst ausgehen können, schützte ich die Gehörorgane meist durch Verschluss derselben mit kleinen Ebonit-Antiphonen. Hierdurch werden zugleich, wie bekannt, die zugeleiteten Reize in beiden Ohren beträchtlich verstärkt. Diese Verstärkung ist aber wohl, obgleich sie nur durch einen Theil der jederseits zum Nerven gelangenden Schwingungen, nämlich durch die vom Trommelfell auf die Luft des Gehörganges übertragenen und vom Verschlussstück reflectirten Wellen zu Stande kommt, in beiden Ohren eine sehr angenähert proportionale, wenigstens wenn der Verschluss beiderseits gleich dicht ist. In der That ändert sich auch die Localisation eines durch die Kopfknochen zugeleiteten Tones normaler Weise nicht, wenn beide Ohren gleichmäßig verschlossen werden. Auch die Phasendifferenz, mit welcher zwei qualitativ wenig verschiedene, an verschiedenen Punkten des Kopfes zugeleitete Reize jederseits zu den Nervenendigungen gelangen, kann durch den Ohrverschluss nur eine ganz geringe Veränderung erfahren, so dass wir also bei Anwendung desselben nicht wesentlich andere Erscheinungen vor uns haben werden, als wenn derselbe unterbleibt. Hinsichtlich der durch Aufsetzen und Abheben des Schallleiters genau regulirbaren Dauer der Reizung, welche in unserer Frage ja nur eine untergeordnete Rolle spielt, genügte die manuelle Ausführung dieses Actes. Die gleichzeitige Zuleitung verschiedener Erregungen, sei es mittelst eines gemeinsamen Leiters zu einem, sei es zu mehreren Punkten des Schädels, bereitet natürlich keine Schwierigkeiten. Anders verhält es sich mit der Regulirbarkeit der Intensität des auf diesem Wege zugeleiteten Reizes. Aendert sich dieselbe doch schon ganz beträchtlich mit der geringsten Schwankung in der Stärke, mit welcher der feste Leiter gegen den Kopfknochen gedrückt wird. Man kann daher durch bloße elektrische Intensitätsregulirung der Gabelschwingungen kaum eine exacte Abstufung der Reizintensität bewirken, wenn es auch nach einiger Uebung gelingen wird, gröbere Unterschiede

in der Stärke des Andrückens zu vermeiden. Eine Aenderung der momentanen Phasendifferenz zweier zu den Kopfknochen geleiteter qualitativ gleicher Reize bietet jedenfalls noch größere Schwierigkeiten und ist nicht ohne sehr complicirte Einrichtungen zu erzielen. Solche hätten aber überhaupt nur in der Aussicht auf eine erfolgreiche Analyse der hier auftretenden Erscheinungen einen Sinn. Dieser steht aber der Umstand entgegen, dass jeder Reiz, an welcher Stelle des Schädels er auch zugeleitet werden mag, unvermeidlich beide Gehörorgane in einem Stärkeverhältniss erreicht, welches charakteristische Erscheinungen des monotischen Hörens nicht mehr hervortreten lässt. Dabei ist die natürlich mit der Applicationsstelle wechselnde Intensitäts- und Phasendifferenz, mit welcher der Reiz zu beiden Gehörorganen gelangt, nicht im entferntesten anzugeben, geschweige denn zu regeln. Damit ist nun aber dieser Art der Reizzuführung keineswegs das Urtheil gesprochen; obgleich wir nämlich hier immer nur complexe Erscheinungen vor uns haben werden, so können uns dieselben doch, sobald uns andere Wege zu einem Verständniss ihrer Grundzüge geführt haben, sehr werthvoll sein, indem sie vielleicht lehrreiche Modificationen aufweisen.

Bei meinen Untersuchungen unterstützten mich neben einigen anderen Reagenten regelmäßig die Herren Prof. Dr. Külpe, Prof. Dr. Meumann und Dr. Funk, die ja als vorzügliche Beobachter, namentlich auch auf akustischem Gebiete, bekannt sind. Die subtilsten Versuche, besonders diejenigen mit leisesten Tönen, bei denen der schwächste Laut, das Rauschen unserer Kleidung bei der geringsten Bewegung oder das schwache Geräusch einer Gasflamme, ja sogar das Ticken unserer Taschenuhren die Beobachtung oft geradezu zerstören konnte, wurden Nachts von 12 bis 2 Uhr angestellt; da saßen wir, der Reagent und der Experimentator, in halbdunklem Zimmer während der Beobachtungen regungslos, oft mit angehaltenem Athem. Ein stummes Zeichen des Reagenten deutete diesen oder jenen wichtigen Moment im Verlaufe der Beobachtungen an. Und wenn sie beendet waren, da begann der Austausch der Erfahrungen im Flüsterton; über ein lautes Wort wären wir ja erschrocken.

Den genannten Herren, welche sich bei diesen Zeilen vielleicht jener eigenartigen Situationen erinnern werden, sei noch an dieser Stelle für ihre liebenswürdige Aufopferung bei den anstrengenden Versuchen mein herzlichster Dank dargebracht.

### Versuche.

Die Untersuchung der binauralen Schwebungen zielt ab auf die Lösung der Frage, ob dieselben nach kreuzweiser Ueberleitung jedes Tones durch die Kopfknochen in den Gehörorganen, oder ob sie erst im Gehirn zu Stande kommen. Hiernach konnte für diese Untersuchung natürlich zunächst nur die Anordnung für aëro-tympanale Reizzuleitung in Betracht kommen, da bei der Zuführung beider Töne zu den Kopfknochen das Zustandekommen der Schwebungen in den beiden Ohren außer allem Zweifel steht, man müsste denn ihre peripherische Entstehung principiell leugnen wollen, womit dann natürlich auch die monotischen Schwebungen als cerebral entstandene anzusehen wären.

Vor allem galt es nun, soweit dies äußerlich möglich, eine isolirte Reizung jedes Ohres durch den ihm direct zugeführten Ton zu erzielen. Mithin war einerseits darauf zu achten, dass nicht etwa schon die Art der Zuführung des Reizes seine Ueberleitung durch die Kopfknochen begünstigte. Andererseits musste aber auch eine Ueberleitung durch die Luft um den Kopf des Reagenten herum völlig ausgeschlossen werden. Dass die zur Erfüllung dieser Anforderungen bisher angewandten Methoden sämmtlich nicht ganz einwandfrei sind, habe ich früher gezeigt. Ich verfuhr darum folgendermaßen:

Zunächst vermied ich es, die Mündungsstücke der Zuleitungsröhren mit den Ohren des Reagenten in Berührung zu bringen, und stellte im übrigen in jeder Versuchsreihe die isolirte Reizung jedes Ohres wiederholt durch ein besonderes einfaches Experiment sicher: Ich ließ nämlich erst das eine und dann das andere Ohr durch Finger, Wachs oder Antiphon verschließen; verschwanden dadurch beide Male die zuvor beobachteten Schwebungen, so war zu folgern, dass die Töne weder durch die umgebende Luft, noch etwa nach directer Uebertragung von der Luft auf die Kopfknochen durch diese selbst zur gegenüberliegenden Seite in solcher Stärke gelangten, dass die resultirenden Intensitätsschwankungen die Schwelle der Unterschiedsempfindlichkeit überschreiten konnten.

War auf diese Weise sichergestellt, dass die binauralen Schwebungen auch dann nicht verschwinden, wenn sich beiderseits bis zu dem Punkte, wo die Töne die mitschwingenden Theile der Gehörorgane

erregen, keine wirksame Ueberleitung vollzieht, so blieben nunmehr nur noch die beiden Möglichkeiten, dass die Erregungen durch die mitschwingenden Theile in den Gehörorganen auf die Kopfknochen übertragen werden und auf diesem Wege peripher zur Interferenz gelangen, oder dass sie eine cerebrale Mischung erleiden.

Zwischen diesen beiden Erklärungsweisen sollten nun die folgenden Versuche entscheiden.

1) Zunächst ließ ich zu beiden Ohren des Reagenten den gleichen Ton, und zwar von ein und derselben Gabel aus, auf gleich großen Wegen gelangen; auch die beiderseitigen Reizintensitäten wurden auf Grund subjectiver Vergleichung mit Hülfe der erwähnten mikrometrischen Verschiebung der Mündungsstücke auf's Sorgfältigste gleich gemacht. Hiernach gaben alle Beobachter übereinstimmend an, den Ton nicht zu beiden Seiten, also nicht dort, von wo er zugeleitet wurde, sondern etwa in der Medianebene des Kopfes zu hören. Dagegen wechselten die Angaben der verschiedenen Reagenten hinsichtlich des besonderen Ortes in dieser Ebene; und auch von demselben Reagenten wurde bei verschiedenen Versuchen nicht immer dieselbe Localisation angegeben. Indessen zeigte sich hier insofern eine gewisse Regelmäßigkeit, als leisere Töne immer in größere, stärkere in geringere Entfernung vom Kopfe verlegt wurden, während sehr starke geradezu im Innern des Kopfes ihren Sitz zu haben schienen. Daneben machte sich bei wachsender Stärke auch eine größere Ausbreitung der Tonempfindung bemerkbar. Endlich wurde dieselbe im Allgemeinen sowohl als stärker, wie auch als voller charakterisirt, wenn sie mit derjenigen verglichen wurde, welche bei monotonischer Reizung auftrat.

2) Unter Beibehaltung der vorigen Versuchsanordnung wurde nun ferner mit Hülfe jener mikrometrischen Verschiebung der Mündungsstücke, mit welcher natürlich, wie nochmals betont sei, nicht die geringste Veränderung der Weglängen von der Gabel bis zu den Gehörorganen verbunden war, eine Aenderung des Intensitätsverhältnisses der beiderseitigen Reize vorgenommen. Hierbei trat regelmäßig eine Verschiebung der Localisation aus der Medianebene nach derjenigen Seite hin ein, wo der stärkere Reiz zugeleitet wurde. Diese Verschiebung war schon bei kaum merklicher Differenz der beiden Reizintensitäten eine sehr erhebliche. Bei weiterer Vergrößerung

derselben wanderte der Ton rasch seitwärts bis zu der beide Gehörgänge verbindenden Geraden, wo er dann wieder nach Maßgabe seiner Stärke in größerer oder geringerer Entfernung von dem betreffenden Ohre, eventuell bei sehr starken Reizen im Innern desselben localisirt wurde.

3) Endlich wurde unter Zuleitung des gleichen Tones zu beiden Ohren noch ein dritter Versuch angestellt, bei welchem jedoch den beiderseitigen Reizen wieder immer die gleiche Stärke gegeben wurde. Hier wurde nun aber mittelst der besprochenen langen ausziehbaren Rohrtheile hinter den Mündungsstücken eine Längendifferenz der beiderseitigen Leitungen eingeführt, wobei natürlich die Entfernung der Mündungsstücke von den Ohren höchstens dann eine ganz geringe Aenderung erfuhr, wenn sich bei successiver Vergleichung der beiderseitigen Reizstärken eine kleine Ungleichheit bemerkbar gemacht hatte. Wurde z. B. auf einer Seite etwa eine Wegverlängerung eingeführt, so musste natürlich die auf diese Weise veranlasste geringe Schwächung des Reizes dadurch compensirt werden, dass das Mündungsstück dem betreffenden Ohre ein wenig genähert wurde. Führte ich nun, von der Gleichheit ausgehend, durch Verlängerung der einen der beiden Rohrleitungen allmählich eine immer größere Differenz zwischen beiden Wegen der Schallzuführung ein, so ergab die Beobachtung folgendes: Der Ton wanderte zunächst genau wie beim vorigen Versuche von der Medianebene aus nach einer Seite und zwar nach der Seite der kürzeren Rohrleitung hin, dort blieb er, bis die Verschiebung in der anderen Leitung nahezu die Größe einer halben Wellenlänge des verwendeten Tones erreicht hatte, dann zog sich der Ton gewöhnlich um den Hinterkopf herum rasch, fast sprungweise nach dieser Seite hin, schien auch manchmal für einen Augenblick geradezu gleichzeitig vor beiden Ohren gehört zu werden, um alsbald ausschließlich vor demjenigen Ohre zu erscheinen, zu welchem die längere Leitung führte. Von hier aus wanderte dann die Localisation wieder nach der Medianebene, welche sie in dem Augenblicke erreichte, wo die Verschiebung das Maß einer ganzen Wellenlänge unseres Tones erfüllte. Die ganze Veränderung der Localisation charakterisirt sich hierdurch als eine periodische. Ihr jeweiliger Ort wird durch die Phasendifferenz bestimmt, welche die beiderseitigen Erregungen zu gleichen Zeiten an correspondirenden Orten, z. B. in den Gehörgängen oder an den

Trommelfellen, aufweisen. Die Intensität des Gesamteindruckes zeigte während jeder Periode mehrere Hebungen; ein deutlich ausgeprägtes Maximum fiel mit der ersten Localisation »Mitte« zusammen, zwei weitere Maxima zeigten sich bei den seitlichen Localisationen und endlich wurde auch manchmal noch bei der zweiten Localisation, »Mitte« während des kurzen Ueberganges eine ganz schwache Hebung der Intensität beobachtet.

4) Bei einem weiteren Versuche kamen nun zwei sehr wenig gegen einander verstimmte Gabeln zur Verwendung, die sich natürlich in verschiedenen Zimmern befanden. Der Ton jeder Gabel gelangte unter sorgfältigstem Abschluss des zweiten von da hinüberführenden Rohres nur zu einem Ohre, und zwar derjenige der einen Gabel zum rechten, und der Ton der andern Gabel zum linken Ohre. Die Mündungsstücke wurden so eingestellt, dass beide Töne bei successiver Vergleichung als gleich stark erkannt wurden. Die Frequenz ihrer Schwebungen wurde durch entsprechende Einstellung der Laufgewichte an den Gabeln geregelt und lag bei den verschiedenen Einzelversuchen zwischen ca. 10 pro sec. und 1 pro min. Beide Töne wurden so leise als möglich gemacht, und nachdem dann noch der eingangs beschriebene Versuch zur Sicherstellung der ausschließlich monotonen Zuleitung jedes Tones angestellt war, ergab die Beobachtung zunächst die Existenz deutlicher binauraler Schwebungen, welche bei höherer Frequenz lediglich in beiden Ohren gehört wurden, bei geringerer auf jeder Seite eine periodische mit den Schwebungen synchrone Ausstrahlung der Localisation nach der Mitte zu und Wiedereinschränkung derselben auf die Gehörorgane zeigten. Bei noch geringeren Frequenzen (1 pro 5 sec. bis 1 pro min.) tritt der eigentliche Charakter der Schwebungen, insofern er durch die Intensitätsschwankungen der Gesamtempfindung repräsentirt wird, mehr und mehr zurück, was ja ohne weiteres verständlich ist. Man hört nur immer einen einfachen Ton, dessen Intensität ganz langsam zu- und abnimmt und, was uns besonders wichtig ist, dessen Localisation zwischen beiden Gehörorganen periodisch hin- und herwandert. Dieser Localisationswechsel vollzieht sich in eigenthümlicher Weise: Von der Seite, wo der tiefere Ton zugeleitet wird, wandert die Empfindung deutlich unter gleichzeitiger Steigerung ihrer Intensität und Verbreiterung ihrer Localisation nach der Medianebene zu; von da aus bewegt sie sich zu demjenigen Ohre,

wo der höhere Ton zugeleitet wird, indem gleichzeitig ihre Intensität wieder etwas abnimmt und ihre Localisation sich einschränkt. Jedoch bevor noch die Localisation diese Seite ganz erreicht hat, beginnt die Intensität der Empfindung wieder zu wachsen und erreicht ein zweites Maximum, wenn die Localisation sich nahe dem Ohre dieser Seite befindet. Darauf nimmt sie allmählich wieder ab, während sich die Localisation ein wenig in das Innere des Kopfes zurückzieht. Gleichzeitig wird sie etwas unbestimmter und unsicherer; ein Wandern, das dem oben beschriebenen ähnlich wäre, wurde im Allgemeinen nicht beobachtet; nur eine Localisation in der Medianebene schien sich dann und wann andeuten zu wollen, oder es machte den Eindruck, als ob der Ton die Verbindungslinie beider Gehörgänge einnähme, freilich weder mit überall gleicher Deutlichkeit, noch auch mit einigermaßen sicherer Begrenzung. Dieses Stadium ist nur von ganz kurzer Dauer und entgeht deshalb leicht überhaupt der Beobachtung. Bei wenig größerer Schwebungsfrequenz hat es mehr den Anschein, als verschwände der Ton ohne jene Ausbreitung nach der Medianebene zu auf der einen Seite; und während man ihm dort mit der Aufmerksamkeit noch zu folgen sucht, wird man plötzlich durch einen schon relativ stärkeren Ton von der anderen Seite her überrascht. Nach diesem Uebergangsstadium wächst zunächst die Stärke, sowie die Deutlichkeit der seitlichen Localisation des Tones; erstere nimmt dann wieder ein wenig ab, sobald letztere beginnt, sich etwas nach der Medianebene hin zu verschieben, und wächst dann abermals, bis die Localisation diese Ebene erreicht hat. Damit ist eine Periode vollendet. Im weiteren Verlaufe wiederholt sich beständig der beschriebene Process.

Dieser wie auch der unter Nr. 3 angegebene Versuch wäre nicht denkbar ohne jene Gabeln, welche während einer ganzen Versuchsreihe mit constanter Höhe und Stärke ertönen. Die einzelne Periode ist zu flüchtig, um alle die geschilderten Erscheinungen klar beobachten zu können; ändert sich aber die Stärke oder gar (wie dies ja beim Ausklingen der Fall ist) die Höhe der Gabeln, so wird damit die Erscheinung von einer Periode zur nächsten schon eine andere. Von den drei Hebungen der Intensität wird z. B. bei sehr geringer Frequenz meist das zur Localisation »Mitte« gehörige Maximum als das stärkste bezeichnet, bei größerer Frequenz werden jedoch die

beiden unter sich gleichen seitlichen Intensitätsmaxima die stärkeren. Wurden die Primärtöne während des Versuches immer schwächer gemacht, so trat zunächst an die Stelle des undeutlichen Ueberganges der Localisation eine Lücke, in der jede Empfindung fehlte; der Ton verschwand einfach auf der einen Seite und tauchte nach einer Pause auf der anderen hervor, von wo aus er dann in der oben beschriebenen Weise zur gegenüberliegenden Seite zurückwanderte. Wurden die Töne endlich bis an die Grenze der Hörbarkeit geschwächt, so trat nur noch eine Reihe zusammenhangsloser Empfindungen auf, deren Folge jedoch immer noch deutlich einzelne Momente aus dem früheren Bilde des Vorganges erkennen ließ. So zeigten sich bei ganz langsamen Schwebungen einzelne durch lange Pausen von einander getrennte Empfindungen, welche in der Gegend der Medianebene localisirt wurden, während bei etwas größerer Frequenz diese einzelnen Töne abwechselnd rechts und links gehört wurden. Das Gelingen dieser Versuche mit schwächsten Reizen, die gar leicht überhört werden konnten und dann auch im übrigen den Eindruck der Unregelmäßigkeit gemacht hätten, setzte natürlich ganz bedeutende Uebung und äußerste Concentration der Aufmerksamkeit voraus.

Die Ueberzeugung, dass die Periode des Localisationswechsels in obigen Beobachtungen mit derjenigen der Schwebungen identisch sei, wurde übrigens noch durch einen besonderen Versuch belegt: Die beiden bisher freien von den Gabeln herüberführenden Leitungen verband ich durch Gummischläuche mit einem Y-förmigen Rohrstücke, welches ich mir selbst in's Ohr setzte. Geeignete Momente in der Periode, auf Seiten des Reagenten etwa die deutlichen mittleren Localisationen, auf meiner Seite die Schwebungsminima, wurden mit Hilfe von Tastern elektrisch markirt; zur Aufnahme der Marken diente die beruhte Trommel des bekannten Baltzar'schen Kymographen, welcher auch sonst zur Orientirung über Dauer und Vertheilung der Maxima und der Localisationen mehrfach in Anwendung kam.

5) Nur nebenbei sei hier noch ein Versuchsergebniss aus einer weiteren Reihe mitgetheilt, auf die ich im Folgenden nicht genauer eingehen will: Die Ohren des Reagenten wurden mit Antiphonen verschlossen; dann setzte ich ihm zwei continuirlich tönende, sehr wenig gegen einander verstimmt Gabeln auf den Kopf und zwar auf Punkte,

welche sich beiderseits gleich weit von der Medianebene etwa in einer durch die beiden Gehörgänge gelegten Vertikalebene befanden. Wurden nun so die Gabeln unmittelbar über den Ohren aufgesetzt, so wurde ein dem obigen ganz analoges Wandern der Localisation von der Seite der tieferen Gabel zur Seite der höheren beobachtet. Verschob ich dann die Gabeln allmählich nach der Medianebene zu, so schränkte sich das Wandern mehr und mehr ein. Erreichte ich dann mit den Gabeln zwei bestimmte einander correspondirende Punkte, so trat die Localisation gar nicht mehr aus der Medianebene heraus. Verschob ich endlich die Gabeln über diese Punkte hinaus noch weiter nach der Medianebene zu, so wurde wieder wie vorher ein deutliches Wandern der Localisation beobachtet, jedoch — in umgekehrter Richtung von der Seite des höheren Tones zu derjenigen des tieferen.

Noch ist hier zu erwähnen, dass bei allen diesen Versuchen eine Vertauschung von rechts und links hinsichtlich der Versuchsbedingungen, die mittelst des zweiten Paares von Leitungen leicht bewirkt wurde, stets nur eine ebensolche in der Localisation der Empfindungen veranlasste, sonst jedoch keinerlei Aenderungen in ihnen hervorbrachte.

Die vorstehend beschriebenen Versuchsergebnisse sollen uns nun neue Anhaltspunkte liefern für die Entscheidung der Frage nach der Entstehung der binauralen Schwebungen.

### Discussion.

Nach allen bisherigen Erfahrungen gilt zunächst unbestritten, dass die beiderseitigen Reize, bevor sie im Organismus Punkte treffen, deren Erregungsstärken in letzter Instanz für die Empfindungsstärken maßgebend sind, zu einer Mischung gelangen, dass sie dabei oscillatorische Form haben, und dass die Mischung in einer Interferenz bestehe. Wir können nach dem eingangs des vorigen Abschnitts beschriebenen Versuche, wo für Ausschluss jeder äußerlichen Mischung der Tonwellen hinreichend gesorgt ist, noch hinzufügen, dass diese Interferenz nicht vor sich gehen kann, ohne dass auf jeder Seite der dort direct zugeleitete Reiz mitschwingende Theile im Ohre getroffen hat; denn eine durch Fortpflanzung der Wellen von der Luft direct

auf die Kopfknochen vermittelte merkliche Ueberleitung erschien bei obigen Versuchsbedingungen in gleicher Weise ausgeschlossen, wie eine ebensolche durch die umgebende Luft allein.

Ueberblicken wir nun weiter die bei den obigen Versuchen beobachteten Erscheinungen, so ist das Hervorstechendste an ihnen die Localisationsänderung, welche augenscheinlich auf's Engste mit den Schwebungen zusammenhängt und deshalb hier ganz besonderes Interesse verdient. Sie scheint aus verschiedenen Ursachen hervorgehen zu können; denn nach dem zweiten Versuche ist sie bedingt durch eine Aenderung des Intensitätsverhältnisses der beiderseitigen Reize, nach den folgenden dagegen durch die Differenz derjenigen Schwingungsphasen, mit denen die beiderseitigen Reize gleichzeitig correspondirende Punkte beider Gehörorgane erreichen. Dass diese letztere Ursache wie im dritten, so gleicherweise im vierten und fünften Versuche den Localisationswechsel bedinge, liegt auf der Hand; die im dritten Versuche künstlich eingeführte Aenderung der Phasendifferenz vollzieht sich nur in den letzten beiden infolge verschiedener Höhe der zugeleiteten Töne von selbst.

Aber doch existiren hiernach immer noch zwei verschiedene Ursachen für dieselbe Erscheinung. — Dabei können wir nicht stehen bleiben. Unstreitig ist die Aenderung des Intensitätsverhältnisses der beiderseitigen Reize die einfachere von jenen beiden Ursachen; denn erstlich besitzen wir hier doch wenigstens für die beiden Glieder der Beziehung, für die Reizintensitäten, ein Wahrnehmungsvermögen, während uns ein solches für Schwingungsphasen von Schallreizen gänzlich abgeht. Und dann lässt sich aus dem zweiten Versuche bzw. seiner Anordnung in keiner Weise eine der Aenderung des Intensitätsverhältnisses parallel gehende Aenderung der Phasendifferenz herausconstruiren, während es umgekehrt sehr wohl denkbar wäre, dass diese letztere Aenderung, wie sie im dritten bis fünften Versuche vorliegt, unter gewissen Voraussetzungen eine solche des Intensitätsverhältnisses nach sich ziehe.

Nach alledem muss der Versuch gerechtfertigt erscheinen, das Intensitätsverhältniss diotischer Erregungen als die alleinige und vollgültige Bedingung für die jeweilige Localisation der resultirenden Totalempfindung anzunehmen.

Diese für die Localisation direct maßgebenden Erregungen sind

natürlich durchaus nicht mit den Reizen selbst zu identificiren; denn wenn auch letztere die ganze Erscheinung allererst möglich machen, so können sie doch unter Umständen, ehe sie in die Beziehung eintreten, durch irgendwelche Prozesse Aenderungen an ihrer Intensität oder Phase, ja selbst an ihrer Qualität erleiden. Freilich wird darum doch die eine Erregung vorwiegend von dem einen, die andere vom anderen Reize abhängen, wie auch ihre lokalen Träger noch eine Verschiedenheit aufweisen müssen, welche dem Unterschiede des Rechts und Links, der bilateralen Symmetrie in den Aufnahme- und Leitungsapparaten der Reize völlig analog ist.

Es erwächst uns nun die Aufgabe, mit Hülfe der hier dargelegten Auffassung auch den bei Aenderung der Phasendifferenz beider Reize beobachteten Localisationswechsel zu erklären.

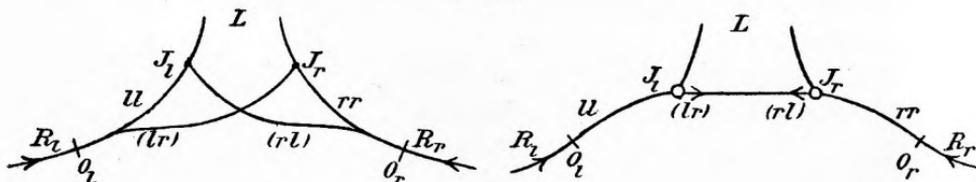
An diesem Localisationswechsel fällt zunächst seine Periodicität auf, welche wir nur auf eine periodische Aenderung des Intensitätsverhältnisses und damit natürlich auch der Intensitäten jener in die Beziehung eintretenden Erregungen selbst zurückführen können. Wenn es hier auch zur Erklärung dieses Localisationswechsels ausreichte, nur für eine der beiden Erregungen eine solche Intensitätsänderung anzunehmen, so spricht doch für eine gleichzeitige periodische Stärkeschwankung beider Erregungen neben der bilateralen Symmetrie, welche für die lokalen Bedingungen, durch die jene Stärkeschwankungen erst möglich werden, in Anspruch zu nehmen ist, auch der Umstand, dass bei correspondirenden seitlichen Localisationen immer gleiche Intensitäten der Totalempfindung beobachtet werden. Die Thatsache ferner, dass jede folgende Periode des Localisationswechsels den vorangehenden in allen Stücken völlig gleich ist, gestattet den Schluss, dass die Periode der Intensitätsschwankung bei beiden Erregungen die gleiche ist. Soll nun aber der Localisationswechsel noch seine Erklärung finden, so dürfen die Intensitätsschwankungen beider Erregungen nicht synchron vor sich gehen, d. h. sie dürfen nicht gleichzeitig gleiche Phasen in der Periode der Intensitätsänderung durchlaufen.

Solche Intensitätsschwankungen können wir natürlich nur als das Resultat von Interferenzen der beiderseitigen Reize auffassen. Zur Erklärung der oben für beide Erregungen behaupteten Intensitäts-

schwankungen haben wir demnach zwei gesonderte Interferenzen und mithin zwei Interferenzorte in Anspruch zu nehmen.

Wir machen uns nach alledem folgendes Bild von den Vorgängen: Nachdem die beiden Reize zu den Gehörorganen gelangt sind, und zwar jeder nur zu dem seinem Zuleitungsrohre nächstliegenden, tritt für die weiter fortgepflanzten Schwingungen jedes Reizes insofern eine Gruppierung ein, als dieselben, sei es in Theilen neben einander, sei es als Ganzes nach einander, zwei Orte erreichen, wo sie je mit wechselseitig entsprechenden Bestandtheilen des anderen Reizes zur Interferenz gelangen. Die von der ersten Erregung des Gehörorganes bis zu dem Eintreffen in diesen beiden Interferenzorten von den Schwingungen durchlaufenen Wege müssen verschiedene akustische Länge haben. Wir verstehen darunter analog der optischen Länge den Quotienten  $\frac{l}{c}$  aus Schallweg und Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Bei gleicher akustischer Länge dieser Wege müssten die in den beiden Interferenzorten entstehenden Schwebungen synchron sein, was wir, wie schon angedeutet, mit Beziehung auf unsere Erklärung nicht annehmen können. Uebrigens gestattet die geringere Schärfe der diotischen Schwebungen gegenüber den monotischen auch noch den Schluss, dass die zu den beiden Interferenzorten gelangenden Bestandtheile jedes Reizes verschiedene Intensität besitzen. Fig. 4, in welcher  $R_r$  und  $R_l$  den rechts bzw. links zugeleiteten Reiz,  $O_r$  und  $O_l$  die beiden Gehörorgane,  $J_r$  und  $J_l$  den vorwiegend vom rechtsseitigen bzw. linksseitigen Reize beeinflussten Interferenzort und  $rr$ ,  $ll$  die akustisch kürzeren,  $(rl)$ ,  $(lr)$  dagegen die akustisch längeren Wege bedeuten, möge rein schematisch unsere Vorstellung veranschaulichen, ohne über die besondere Lage der Interferenzorte irgend etwas anzudeuten. Die Frage, welchem der beiden Schemata der Vorzug zu geben sei, ist für uns zunächst belanglos.

Fig. 4.



Die Erregungsstärken an den Interferenzorten nun sind es erst, welche für die Empfindungsstärken maßgebend sind und welche, sei es unmittelbar, sei es mittelbar, etwa an einem Orte  $L$  in eine Beziehung zu einander treten, von welcher die specielle Localisation abhängt.

Alles zusammen genommen behaupten wir also, dass die Localisation lediglich durch das Intensitätsverhältniss diotischer Erregungen bestimmt wird, und versuchen dementsprechend, den spontanen Localisationswechsel bei diotischen Schwebungen mit Hülfe einer doppelten, aber nicht synchronen Interferenz der beiderseitigen Reize zu erklären, aus welcher in der Periode der Schwebungen abwechselnd bald für die eine, bald für die andere der beiden die Localisation bestimmenden Erregungen die größere Intensität resultirt.

### Theorie der binauralen Schwebungen.

Es bleibt uns nun noch übrig, zu untersuchen, ob das hier entworfene Bild auch wirklich in allen Theilen mit den oben beschriebenen Versuchsergebnissen im Einklang steht. Wir sehen uns zu diesem Zwecke die beiden Interferenzvorgänge und ihr Verhältniss zu einander etwas genauer an.

Was uns vor allem an den Interferenzvorgängen interessirt, ist die aus ihnen hervorgehende Schwingungsamplitude. Dem Quadrate derselben ist die Schwingungsenergie, und mit ihr jedenfalls auch unsere Erregungsstärke proportional zu setzen, und ebenso wird dann weiterhin die Localisation durch das Verhältniss jener Schwingungsenergien bestimmt werden. Für die wechselnde Amplitude der Schwingungsbewegung nun, welche aus der Interferenz zweier einfacher Schwingungen von verschiedener Wellenlänge resultirt, gilt bekanntlich der folgende, auf die Stelle der Phasengleichheit im Verlaufe des Interferenzvorganges bezogene Ausdruck:

$$A = \sqrt{a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos 2\pi(m-n)t} \quad (1)$$

worin  $a$  und  $a_1$  die Amplituden,  $m$  und  $n$  die Schwingungsfrequenzen der beiden interferirenden Wellen, und  $t$  die Zeit bedeutet.  $A$  erscheint mithin als eine Function der Zeit. Für die Intensität der Schwingungen gilt hiernach weiter die Formel:

$$J = a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos 2\pi(m-n)t \quad (2)$$

deren Curve wir sofort als Cosinuslinie erkennen, wenn wir den Coordinatenanfang um das Stück  $a^2 + a_1^2$  in Richtung der positiven Abscissenaxe verschieben und somit die Formel

$$J - (a^2 + a_1^2) = J' = 2aa_1 \cos 2\pi(m-n)t$$

erhalten.

Absolut genommen gelten natürlich die Ausdrücke (1) und (2) für die an beiden Interferenzorten sich abspielenden Vorgänge. Wollen wir jedoch nun letztere in ihrer gegenseitigen Beziehung erfassen, so dürfen wir nur streng gleichzeitige Momente aus ihnen zusammennehmen. Da ferner jene Intensitätsschwankungen, wie wir annahmen, nicht synchron vor sich gehen, d. h. nicht gleichzeitig gleiche Phasen der Aenderung durchlaufen, so müssen wir ihrer Phasendifferenz bei dieser Zusammenfassung Rechnung tragen. Durchläuft nun die eine Schwankung jede Phase der Aenderung um  $t'$  Zeittheile später als die andere, so lassen sich die beiderseitigen Vorgänge wiedergeben durch folgende Ausdrücke:

$$\begin{aligned} J_l &= a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos 2\pi(m-n)t, \\ J_r &= a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos 2\pi(m-n)(t-t'). \end{aligned}$$

Setzen wir hierin zur Vereinfachung die Variable  $2\pi(m-n)t = x'$  und die Constante  $2\pi(m-n)t' = d$ , und verschieben wir weiter den Coordinatenanfang um  $\frac{d}{2}$  in Richtung der positiven Abscissenaxe, so folgt, da  $x' = x + \frac{d}{2}$  ist:

$$\left. \begin{aligned} J_l &= a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos \left( x + \frac{d}{2} \right) \\ J_r &= a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos \left( x - \frac{d}{2} \right) \end{aligned} \right\} (3)$$

Das Verhältniss dieser (für gleiches  $x$  bzw.  $t$ ) immer gleichzeitig anzutreffenden Erregungsstärken soll nun, wie wir annahmen, in jedem Falle die Localisation bestimmen. Wir haben darum vorzugsweise die Function:

$$\begin{aligned}
 V_i = \frac{J_r}{J_l} &= \frac{a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos\left(x - \frac{d}{2}\right)}{a^2 + a_1^2 + 2aa_1 \cos\left(x + \frac{d}{2}\right)} \\
 &= \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{a}{a_1} + \frac{a_1}{a}\right) + \cos\left(x - \frac{d}{2}\right)}{\frac{1}{2}\left(\frac{a}{a_1} + \frac{a_1}{a}\right) + \cos\left(x + \frac{d}{2}\right)} \quad (4)
 \end{aligned}$$

zu untersuchen. Zur Abkürzung sei hierin  $\left(\frac{a}{a_1} + \frac{a_1}{a}\right) = m$  gesetzt; mithin folgt

$$V_i = \frac{\frac{m}{2} + \cos\left(x - \frac{d}{2}\right)}{\frac{m}{2} + \cos\left(x + \frac{d}{2}\right)} \quad (5)$$

In der graphischen Darstellung dieser Function (Fig. 5, auf S. 586) hat die Ordinatenaxe eine besondere Eintheilung erfahren. In Rücksicht darauf, dass  $V_i = 1$  der Localisation »Mitte« entspricht, habe ich diesen Punkt der Ordinatenaxe zum Anfang gewählt und weiter die Bedeutung des oberen und unteren Theiles der Ordinatenaxe nicht nach dem Zahlenwerthe des Verhältnisses  $\frac{J_r}{J_l}$ , sondern nach dem Grade der durch dasselbe bestimmten Rechts- oder Linkslocalisation bemessen.

Die Discussion der Formel (5) ergibt nun leicht eine Reihe von Bestimmungsmomenten für die Curve, nämlich:

für  $\cos\left(x + \frac{d}{2}\right) = \cos\left(x - \frac{d}{2}\right)$ , mithin für  $x = k\pi$ <sup>1)</sup> wird  $V_i = 1$

für  $\cos\left(x - \frac{d}{2}\right) = -\frac{m}{2}$  wird  $V_i = 0$

für  $\cos\left(x + \frac{d}{2}\right) = -\frac{m}{2}$  wird  $V_i = \infty$ .

Während also der erste Fall uns die Schnittpunkte der Curve mit der Abscissenaxe aufweist, liefern uns die beiden letzteren Fälle

1)  $k$  kann hier wie in den folgenden Ausdrücken sowohl 0 als jede positive oder negative ganze Zahl bedeuten.

zwei Gruppen von Asymptoten derselben. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die einzelnen Zweige der Curve nur asymptotisch verlaufen können, wenn  $a = a_1$  ist. Denn der Ausdruck

$$\frac{1}{2} m = \frac{1}{2} \left( \frac{a}{a_1} + \frac{a_1}{a} \right)$$

erreicht für  $a = a_1$ , wie leicht einzusehen ist, seinen kleinstmöglichen Werth, nämlich 1; und dies ist zugleich der größtmögliche für die Cosinusfunction. Sonach ergeben sich aus

$$\cos \left( x \pm \frac{d}{2} \right) = -1, \text{ oder } x \pm \frac{d}{2} = (2k - 1) \pi \text{ die Werthe}$$

$$x = (2k - 1) \pi \mp \frac{d}{2} \quad (6)$$

als Abscissen für die der Ordinatenaxe sämmtlich parallelen Asymptoten.

Der Abstand je zweier auf einander folgender Asymptoten hat abwechselnd die Werthe  $d$  und  $2\pi - d$ . Für alle anderen Verhältnisse von  $a$  und  $a_1$  zeigt die Curve nur Maxima und Minima, für deren Abscissen aus

$$\frac{d V_i}{dx} = \frac{m \sin \frac{d}{2} \cos x + \sin d}{\left[ \frac{m}{2} + \cos \left( x + \frac{d}{2} \right) \right]^2} = 0$$

die Bedingung erhalten wird:

$$\cos x = - \frac{2 \cos \frac{d}{2}}{m} = \frac{2 \cos \left[ (2k - 1) \pi \mp \frac{d}{2} \right]}{m} \quad (7)$$

Je stärker in diesem Ausdrücke das Verhältniss  $\frac{a_1}{a}$  von dem Werthe 1 abweicht, oder was dasselbe ist, je größer (von 2 aus wachsend)  $m$  wird, um so mehr nähert sich  $x$  dem Werthe  $(2k - 1) \frac{\pi}{2}$  und erreicht diesen völlig, wenn  $a$  oder  $a_1$  verschwindet. In diesem Falle gäbe es natürlich auch beiderseits keine Interferenz mehr, und  $V_i$  behielte für jedes  $x$  den Werth 1. Durchläuft also das Verhältniss  $\frac{a_1}{a}$  alle Zahlen von 1 bis zu einem Extremwerthe (0 oder  $\infty$ ),

so ändern sich die Abscissen der Maxima unserer Curve innerhalb der Grenzen  $(2k - 1)\pi - \frac{d}{2}$  und  $(4k - 3)\frac{\pi}{2}$ , sowie diejenigen der Minima innerhalb der Grenzen  $(2k - 1)\pi + \frac{d}{2}$  und  $(4k - 1)\frac{\pi}{2}$ .

Die zu den obigen Abscissenwerthen gehörigen Ordinaten der Maxima und Minima durchlaufen dabei gleichzeitig, gemäß dem Ausdruck:

$$V_i = \frac{\pm \sqrt{m^2 - 4 \cos^2 \frac{d}{2}} + 2 \sin \frac{d}{2}}{\pm \sqrt{m^2 - 4 \cos^2 \frac{d}{2}} - 2 \sin \frac{d}{2}}, \quad (8)$$

alle Werthe von  $\infty$  bis 1 bzw. von 0 bis 1. Aendert sich ferner  $d$  von einem Werthe  $2k\pi$  ausgehend in der Richtung auf einen Werth  $(2k - 1)\pi$ , so schreitet gleichzeitig der obige den Extremwerthen  $V_i$  zugehörige  $\cos x$  von  $\pm \frac{2}{m}$  (je nachdem  $k$  eine gerade Zahl bzw. 0, oder eine ungerade Zahl ist) auf den Werth 0 zu, während jene selbst von dem Werthe 1 (für  $d = 2k\pi$ ) aus für  $d = (2k - 1)\pi$  mit dem Werthe  $\frac{\pm m + 2}{\pm m - 2}$  ein Maximum bzw. Minimum erreichen, um dann wieder mit Annäherung von  $d$  an einen Werth  $2k\pi$  auf die Einheit hinzulaufen.

Fassen wir bei diesen Aenderungen die ganze Curve in's Auge, welche durch die auf einander folgenden Ordinaten der Maxima und Minima wie durch die Asymptoten in aufsteigende und absteigende Aeste getheilt wird, so bemerken wir, dass diese auf einander folgenden Theile einander nur gleich sind für die Fälle  $d = (2k - 1)\pi$ . Je mehr sich dagegen  $d$  einem der Werthe  $2k\pi$  nähert, um so mehr weichen jene Curvenzweige in Gestalt und Größe von einander ab. Dieser Unterschied wird durch Annäherung des Verhältnisses  $\frac{a_1}{a}$  an einen Extremwerth nur im Sinne einer Ausgleichung modificirt, keineswegs aber wird er umgekehrt.

Endlich ist noch die Neigung der Curve in den Schnittpunkten  $x = k\pi$  mit der Abscissenaxe beachtenswerth. Aus obigem Differential-

Quotienten  $\frac{dV_i}{dx}$  erhält man als Tangente des Neigungswinkels für  $x = 2k\pi$  den Werth

$$\text{tang } \sigma = \frac{4 \sin \frac{d}{2}}{m + 2 \cos \frac{d}{2}} \quad (9)$$

und für  $x = (2k - 1)\pi$  den Werth

$$\text{tang } \tau = - \frac{4 \sin \frac{d}{2}}{m - 2 \cos \frac{d}{2}} \quad (10)$$

Während diese beiden Ausdrücke für  $d = k\pi$  offenbar einander entgegengesetzt gleich werden, sei es für  $d = (2k - 1)\pi$  mit dem absoluten Werthe  $\frac{4}{m}$ , sei es für  $d = 2k\pi$  mit dem Werthe 0, weichen ihre absoluten Werthe um so mehr von einander ab, je mehr sich  $d$  einem der Werthe  $2k\pi$  bloß annähert, ohne ihn zu erreichen, und je weniger das Verhältniss  $\frac{a_1}{a}$  von dem Werthe 1 verschieden ist. Da dies gleichzeitig die Bedingungen für die Vergrößerung des Abscissenabstandes zweier benachbarter Extremwerthe sind, so gilt also: Je größer ein zwischen solchen Extremwerthen gelegener Curvenabschnitt ist, um so kleinere Winkel bildet dessen mittlerer Theil mit der Abscissenaxe; auch behält er um so länger diese Richtung bei.

Die obige aus unserer Erklärung entwickelte und construirte Curve muss nun, wenn jene Auffassung zutreffend ist, eine vollständige Illustration zu unseren Beobachtungen geben. Freilich ist uns der genaue Werth von einigen Bestimmungsstücken, von denen die Gestalt der Curve abhängt, nämlich  $d$  und das Verhältniss  $\frac{a_1}{a}$  unbekannt. Dennoch fehlt es nicht an Anhaltspunkten, aus denen wir wenigstens ungefähr die für unseren Fall zutreffenden Werthe erschließen können. Dass hier zunächst die Grenzfälle  $d = 2k\pi$  und  $a_1 = 0$  oder  $a = 0$  gar nicht in Betracht kommen, geht schon daraus hervor, dass sie entweder unserer Annahme eines anisochronen

Verlaufs der beiderseitigen Schwebungen oder überhaupt dem Auftreten einer Interferenz nicht Rechnung tragen. Ebenso ist, wenn unter  $a$  der zu dem nächstliegenden Interferenzorte gelangende und unter  $a_1$  der zu dem gegenüberliegenden geleitete Bestandtheil jedes Reizes verstanden wird, der Fall  $a = a_1$  auszuschließen, da ja sonst schon jeder monotisch dargebotene Reiz stets in der Medianebene localisirt werden müsste.

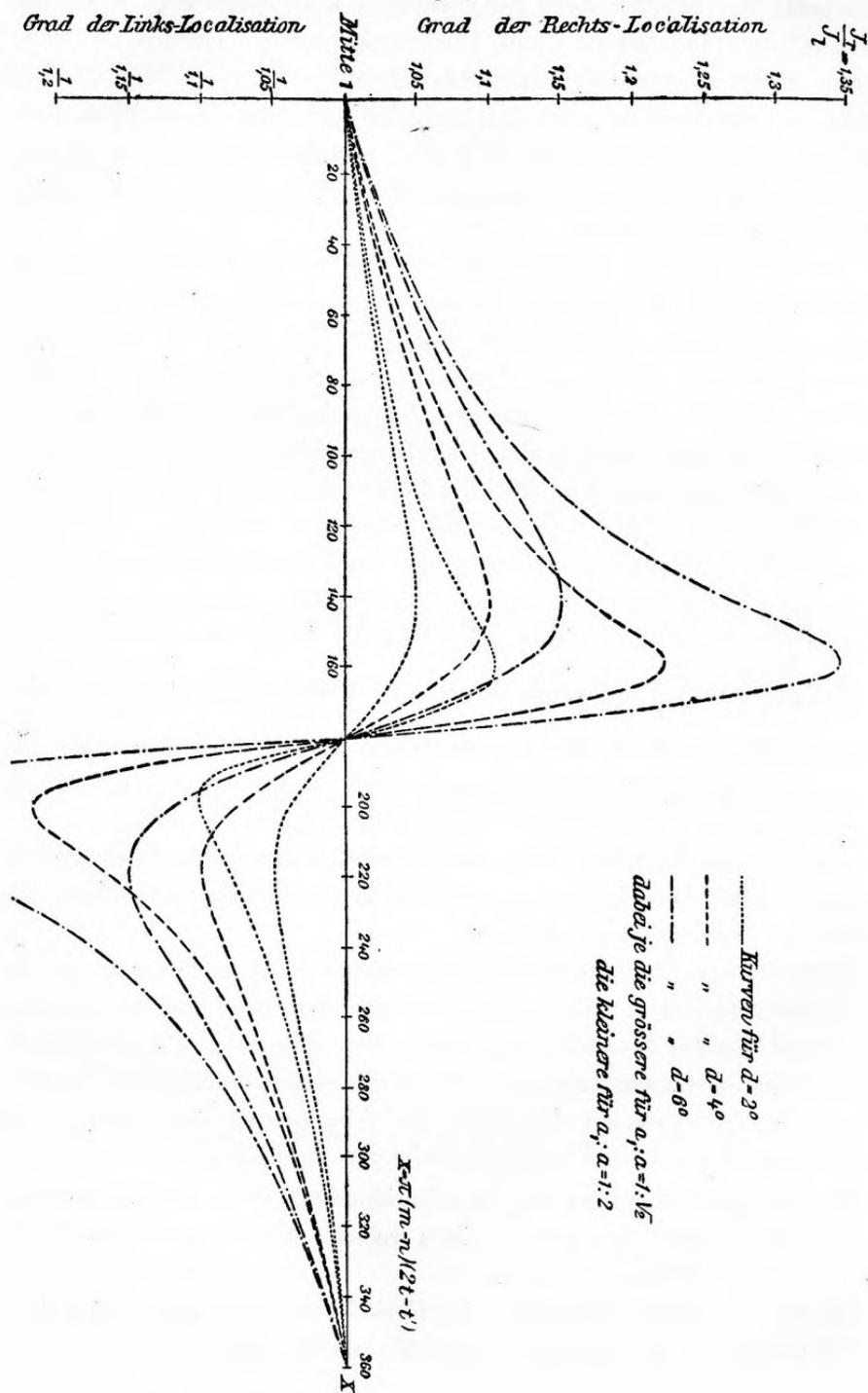
Ferner wird sich einerseits daraus, dass zwei auf einander folgende Uebergänge der Localisation so völlig ungleichartig sind, und anderseits auch schon äußerlich daraus, dass der Weg für die Ueberleitung auf alle Fälle sehr kurz ist, mit einigem Rechte schließen lassen, dass je zwei benachbarte Curvenabschnitte weder einander gleich, noch auch nahezu gleich sind, dass vielmehr  $d$  einem Werthe  $2k\pi$  (wahrscheinlich dem Werthe 0) weitaus näher liegt, als einem Werthe  $(2k - 1)\pi$ . Ebenso wird man nicht fehlgehen, wenn man wegen der geringeren Deutlichkeit der diotischen Schwebungen gegenüber den monotischen, das Amplitudenverhältniss  $\frac{a_1}{a}$  etwa mit einem

zwischen  $\frac{2}{3}$  und  $\frac{1}{2}$  gelegenen Werthe in Rechnung setzt, so dass das Intensitätsverhältniss der übergeleiteten zur direct zugeleiteten Erregung etwa zwischen den Werthen  $\frac{1}{2}$  und  $\frac{1}{4}$  liegen würde. Hiernach werden wir etwa eine Curve, welche den in Figur 5 gezeichneten ähnlich ist, als den in unserem Falle vorliegenden Bedingungen entsprechend bezeichnen können.

Aus dieser Curve ergibt sich nun unter Berücksichtigung dessen, dass die Abscissenaxe die zeitliche Folge der Erscheinungen bestimmt, während die auf ihr gelegenen Ordinatenpunkte der Localisation in der Medianebene entsprechen und die Ordinaten oberhalb und unterhalb der Abscissenaxe das Maß der Abweichung der Localisation von dieser Ebene nach rechts bzw. links darstellen, folgendes:

- 1) Der ganze Vorgang des Localisationswechsels ist ein periodischer,
- 2) jede Periode zerfällt in einen rechtsseitigen und einen linksseitigen Ablauf desselben,
- 3) mithin gibt es während jeder Periode zwei und nur zwei Uebergänge der Localisation durch die Medianebene,

Fig. 5.



- 4) die rechtsseitigen und die linksseitigen Localisationen lösen einander immer ab,
- 5) beide haben gleiche zeitliche Dauer,
- 6) der Ablauf der rechtsseitigen Localisationen vollzieht sich dabei immer in umgekehrter Folge wie derjenige der linksseitigen,
- 7) je zwei auf einander folgende Uebergänge haben im Ganzen betrachtet sehr verschiedene Dauer,
- 8) die Aenderung der Localisation in der Nähe der Medianebene vollzieht sich bei dem einen Uebergang sehr langsam, während sie bei dem anderen außerordentlich schnell von statten geht,
- 9) diejenigen Localisationen, welche in gleichem zeitlichen Abstände vor und nach einem Durchgang durch die Medianebene vorliegen, haben auch örtlich gleichen Abstand von derselben,
- 10) während der Uebergänge hat die Localisationsbewegung eine nahezu constante Geschwindigkeit.

Diese Folgerungen aus der Curvengestalt stehen nun, wie man sieht, bis in's Kleinste mit jenen Erscheinungen der Localisationsbewegung im Einklang, welche bei der künstlichen Phasenverschiebung oder bei ganz langsamen Schwebungen beobachtet wurden. Die Aufgabe, welche wir uns stellten, nämlich diese Localisationsbewegung aus einer Aenderung des Intensitätsverhältnisses der beiderseitigen Erregungen zu erklären, ist hiernach mit Hülfe der Annahme einer doppelten anisochronen Interferenz beider Reize gelöst. Was weiterhin an Besonderheiten in den Localisationerscheinungen oben mitgeteilt wurde, die Localisation während des kurzen Ueberganges, die häufig als eine undeutliche und unbestimmte, auch als eine doppelseitige angegeben wurde, weiter die Ausbreitung der Localisation während ihrer deutlichen Wanderung und ihre Einschränkung bei den seitlichen Lagen, ferner die Einschränkung der ganzen Localisationsbewegung bei Erhöhung der Schwebungsfrequenz, endlich der Unterschied der Entfernung in der Localisation stärkerer und schwächerer Reize, steht mit der Localisationsbewegung als solcher und mit ihren Bedingungen nicht im Zusammenhang, kann also auch durch unsere Curve gar keine Illustration finden. Alle diese Eigenenthümlichkeiten hängen mit dem Wesen der Localisation und ihren Bedingungen auf's Engste zusammen, müssen daher, wenn sich auch

aus ihnen noch manche wichtige Bestätigungen für unsere Auffassung ableiten ließen, einer besonderen Abhandlung über die Localisation vorbehalten bleiben. Auch den unter Nr. 5 mitgetheilten Versuch habe ich aus einem anderen Zusammenhange hier nur herübergenommen, um durch denselben zu zeigen, dass einerseits der Werth von  $d$  bei dieser Art der Zuleitung durchaus von dem Kopfknochenwege abhängig ist, anderseits eine enge Verwandtschaft zwischen den Erscheinungen bei aëro-tympanaler und denjenigen bei kranio-tympanaler Zuleitung bestehen muss. Was endlich die Beobachtungen über die verschiedenen in jeder Periode auftretenden Intensitätsmaxima anlangt, so erklären sich, da wir ja hier nicht etwa wie bei Interferenzen eine Superposition unserer beiderseitigen, um den Betrag  $d$  gegen einander verschobenen Intensitätscurven vornehmen dürfen, die beiden seitlichen Maxima ohne weiteres, während die in der Medianebene beobachteten Maxima auf eine Erscheinung hinweisen, welche einer besonderen Gruppe functioneller Beziehungen beider Gehörorgane angehört. Diese viel umstrittene Erscheinung besteht darin, dass diotische Erregungen besonders im Falle ihrer qualitativen und intensiven Gleichheit verstärkend auf einander einwirken. Vielleicht könnte jedoch auch die Verbreiterung der Localisation, welche beim Durchgang durch die Medianebene ihr Maximum erreicht, schon allein den Eindruck einer Intensitätssteigerung erwecken und damit die bezügliche Angabe verständlich machen. Die Entscheidung hierüber muss dahingestellt bleiben. Wir begnügen uns hier damit, einige der wichtigsten Zusammenhänge aufgewiesen zu haben, welche zwischen den vorstehend behandelten diotischen Interferenzerscheinungen und den übrigen functionellen Beziehungen beider Gehörorgane bestehen. Aber auch ohne die Bestätigungen, welche aus dem Verfolg aller dieser Zusammenhänge erwachsen, halten wir unsere Erklärung des Localisationswechsels und damit unsere Theorie der binauralen Schwebungen durch obige Darlegung für genügend gestützt, um noch zum Schluss der Frage näher treten zu können, welche Bedeutung diese Erklärung für die Bestimmung des Entstehungsortes der binauralen Schwebungen gewinnt.

### Schlussfolgerungen.

Die Beobachtungen ergaben, dass langsame diotische Schwebungen stets von einer in gleichem Tempo mit jenen sich wiederholenden Localisationswanderung begleitet sind. Von der Erklärung dieser Erscheinung versprachen wir uns neue Aufschlüsse über die Natur und Entstehungsweise der diotischen Schwebungen selbst. Anderweitige Versuche schienen nun zu lehren, dass die Richtung der Localisation in jedem Falle durch das Intensitätsverhältniss diotischer Erregungen bestimmt wird. Es gelang nun, auf dieselbe Weise auch die fragliche Localisationswanderung mit all ihren Einzelheiten zu erklären, unter der Voraussetzung, dass die beiderseits isolirt zugeleiteten Reize an zwei Orten, deren Erregungsstärken für die Empfindung maßgebend sind, zur Interferenz gelangen, und dass die aus den Interferenzen resultirenden Bewegungsvorgänge nicht synchron verlaufen. Diese Voraussetzungen können wir hiernach als zu Recht bestehend erachten.

Dass hierdurch diejenige Annahme, nach welcher die binauralen Schwebungen mittelst Ueberleitung der Schwingungen von Ohr zu Ohr durch die Kopfknochen zu Stande kommen, eine wichtige Stütze erhält, liegt auf der Hand. Denn hier fügt sich alles zwanglos den aus den Versuchen gefolgerten Postulaten: In den mechanischen Theilen beider Gehörorgane haben wir die beiden Interferenzorte vor uns; dort sind die Bewegungen sicherlich von oscillatorischer Art; die Wege, welche jeder Reiz bis zu den beiden Interferenzorten zurückzulegen hat, nämlich der Weg von den mitschwingenden Theilen bis zu den Nervenendigungen desselben Gehörorgans und der andere Weg durch den Kopf, speciell die Kopfknochen, bis zu denjenigen des gegenüberliegenden Ohres haben, wie gefordert, naturgemäß verschiedene akustische Länge; daneben stimmt zugleich auch der geringe Werth der Phasendifferenz  $d$ , auf welchen wir schon oben aus den Beobachtungen schlossen, auf's Beste zur Ueberleitung durch die Kopfknochen, da in ihnen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles sicher eine ganz beträchtliche ist; endlich haben die auf diesen verschiedenen Wegen fließenden Erregungen jedenfalls eine verschiedene Intensität, die übergeleiteten eine geringere als die anderen, woraus sich das geringere Maß der Stärkeschwankungen bei

den diotischen Schwebungen gegenüber den monotischen auf einfachste Weise erklärt.

In allen Punkten nun, in denen sich die für den Fall peripherer Entstehung der Schwebungen gegebenen localen Bedingungen durchaus ungezwungen den obigen Forderungen anpassen, bereitet die Placirung der Vorgänge im Falle cerebraler Entstehung derselben die größten Schwierigkeiten. Gegen die Annahme zweier Interferenzorte wäre im Hinblick auf die durchweg bilaterale Anordnung der nervösen Leitungsbahnen noch nicht viel einzuwenden, wengleich für eine nähere Bestimmung ihrer Lage jeder Anhaltspunkt fehlt. Umgekehrt könnte man die neuerdings festgestellte partielle Kreuzung der Akustikusbahnen als locale Grundlage für die Ueberleitung in Anspruch nehmen, wenn nicht hier wieder die Annahme, dass alle jene vier Zweige demselben Zwecke, nämlich der Leitung specifisch akustischer Reize dienen, zum mindesten sehr hypothetisch wäre; auch müssten die nach je einer Seite führenden Bahnen Erregungen verschiedener Stärke leiten und wirklich in einander übergehen, Annahmen, für die keinerlei Beleg gegeben werden kann. Die Hauptschwierigkeit besteht aber immer in der für diese Erklärungsweise nothwendigen Voraussetzung, dass die Erregungen nach ihrem Uebergang auf die nervösen Bahnen noch ihre oscillatorische Natur behalten. Gerade für diese Voraussetzung, für welche nur die Existenz cerebraler Schwebungen einen strengen Beweis hätte abgeben können, gibt es sonst keine Stütze, man müsste denn die bekannten Versuche an labyrinthlosen Tauben, bei denen jedoch weder über die Ergebnisse selbst, noch auch über deren Deutung eine Einigung erfolgt ist, in diesem Sinne verwerthen wollen.

Dieser Vergleich lehrt zur Genüge, dass, wenn man einmal die Erklärung der Localisationsbewegungen durch zwei anisochrone Interferenzen als gültig anerkennt, kaum noch ein Zweifel darüber bestehen kann, ob die binauralen Schwebungen durch periphere oder cerebrale Interferenz zu Stande kommen. Sollte mithin die letztere Erklärung der diotischen Schwebungen beibehalten werden, so müssten jedenfalls auch die mit ihnen auf's Innigste zusammenhängenden Localisationsphänomene eine ganz andersartige Erklärung finden.

Wenn nun aber auf der anderen Seite gegen die Uebertragung der Töne von den mitschwingenden Theilen im Ohre auf die Kopf-

knochen von den Gegnern dieser Anschauung geltend gemacht wird, dass die Befestigungsart der betreffenden Theile, zumal der Membranen überhaupt sehr wenig, geschweige denn bei leisesten Tönen für eine solche Uebertragung geeignet erscheine, so möchte ich dagegen zunächst auf einen Versuch hinweisen, bei welchem ich den Ton einer Stimmgabel mit Hülfe einer Glimmermembran sofort zur deutlichen Perception bringen konnte, wenn ich mit deren Fassung (Glasringe mit Tuchzwischen-schichten in Holzringe gelagert) den Kopf des Beobachters berührte. Wenn aber einmal diese Ueberleitung für stärkere Töne außer allem Zweifel steht, so kann, meine ich, die Behauptung, dass auch leiseste Töne so übertragen werden, keineswegs als ungerechtfertigt erscheinen. Denn man hat doch wohl anzunehmen, dass immer derselbe Bruchtheil der zugeführten Schwingungen zu den Kopfknochen gelange. Dass diese übergeleiteten Schwingungen für sich genommen keineswegs die Empfindungsschwelle zu überschreiten brauchen, habe ich schon in der früheren Arbeit mehrfach betont; nur das ist zu fordern, dass sie merkliche Intensitätsschwankungen der direct zugeleiteten Schwingungen hervorrufen, oder was vielleicht noch weniger ist, dass die beiderseits erzeugten Intensitätsschwankungen gerade noch stark genug sind, um durch ihr alternirendes Auftreten jene Localisationswanderung zu veranlassen. Und dazu brauchen gewiss die übergeleiteten Schwingungen nur einen geringen Bruchtheil der auf dem gewöhnlichen Wege fortgepflanzten darzustellen.

Weit mehr indess als dieses bisher allgemein gebräuchliche Verfahren, die Ueberleitung mechanisch plausibel zu machen, scheint mir für die Entscheidung unserer Frage der durch obige Versuche gegebene Nachweis zu leisten, dass sich auch bei leisesten Tönen dieselben Erscheinungen finden, auf welche wir unsere ganze Erklärung aufbauten. Ja, diese Erscheinungen müssen hier sogar infolge der Existenz einer Reizschwelle noch an Deutlichkeit gewinnen, was ja auch die bezüglichen Versuche vollkommen bestätigen, in welchen die allein noch über die Schwelle sich erhebenden Maxima im Contrast zu den Intermissionen besonders deutlich hervortraten. Man könnte hier einwenden, dass Intermissionen der Empfindung bei schwächsten Reizen allgemein beobachtet werden, mithin auch in jenen Versuchen mindestens nicht nothwendig als das Resultat von

Interferenzen anzusehen seien. Demgegenüber ist jedoch zu bemerken, dass in der Aufeinanderfolge solcher Intermissionen, welche besonders in Schwankungen der Aufmerksamkeit ihre Ursache haben mögen, sich nie ein bestimmter Rhythmus wird erkennen lassen. Wo ein solcher zu Tage tritt und noch obendrein die Frequenz der Schwebungen zeigt, welche die beiden Theiltöne mit einander geben, da hat man es sicher mit Interferenzerscheinungen zu thun<sup>1)</sup>. Bei den bezüglichen oben mitgetheilten Versuchen mit leisesten Tönen zeigte nun außerdem die rhythmisch intermittirende Empfindung stets, eventuell unter regelmäßigem Wechsel, dieselben Localisationen, mit denen zuvor bei größerer Intensität beider Reize die Maxima verbunden erschienen, — der beste Beweis, dass auch für leiseste Töne, bei denen noch binaurale Schwebungen erkennbar sind, unsere Erklärung gültig bleibt.

Hiernach vollends glaube ich auf die Heranziehung weiterer Stützen, wie sie sich sowohl für die obige Theorie der binauralen Schwebungen, als auch besonders für ihre periphere Entstehung aus der Untersuchung der übrigen »functionellen Beziehungen beider Gehörorgane« noch ergeben haben, für jetzt und in diesem engeren Zusammenhange verzichten zu können, freilich in der Hoffnung, bald wieder einmal Muße zur Arbeit an diesem Thema zu finden.

### Nachtrag.

Die vorstehende Arbeit war bereits abgeschlossen, als mir ein paar neuere Untersuchungen in die Hand kamen, die unter anderem einiges, was unsere Frage angeht, behandeln.

H. Frey hat nämlich kürzlich »experimentelle Studien über die Schalleitung im Schädel« gemacht.<sup>2)</sup> Die Töne wurden dabei durch eine schwingende Gabel direct auf die Kopfknochen übertragen. Ich theile nach obigem die Ansicht des Verfassers, dass diese Bedingungen nur einen quantitativen Unterschied gegenüber den bei der »natürlichen Knochenleitung« vorliegenden einschließen. Doch ge-

1) Rhythmische Intermissionen schwächster Empfindungen vermag freilich auch der Puls hervorzubringen; doch ist dieser Rhythmus immer leicht von jedem anderen zu unterscheiden.

2) Ztschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane. Bd. 28. S. 9 (1902).

nügt dies gerade, um jenen Nachweis der physikalisch ohnehin selbstverständlichen Ueberleitung für unsere Frage belanglos zu machen. Ganz interessant ist für dieselbe jedoch die Feststellung, nach welcher die gegenseitige Lagerung der Gehörorgane im Schädel als eine für die Schallüberleitung von Ohr zu Ohr besonders günstige erscheint, derart, dass die einerseits auf die Kopfknochen übertragene Erregung in nur wenig geringerer Stärke das gegenüberliegende Ohr erreicht. Die Annahme freilich, dass die an verschiedenen Schädelpunkten beobachteten Erregungsintensitäten ihren Werthen nach durch Interferenzen bestimmt werden, kann ich keineswegs als einen »folgeschweren Irrthum« bezeichnen. Ich möchte vielmehr dagegen fragen: Wenn nicht durch Interferenz, wodurch soll denn die Verstärkung zu Stande kommen? Sie haftet doch nicht an der Substanz, wie der Verfasser zu denken scheint. Selbst die Pyramiden könnten doch, wenn von Interferenzen abgesehen wird, im günstigsten Falle nur eine Erregung aufweisen, die gleich derjenigen ist, welche ihnen nach Abzug aller Verluste durch die Ueberleitung von der anderen Seite her zufließt; und alle Punkte auf dem Wege der Ueberleitung müssten in abnehmendem Maße eine größere Erregungsstärke zeigen als der Endpunkt, was doch kaum der Fall sein dürfte. Spielt überhaupt hinsichtlich der Ueberleitung die Schädelbasis keine wesentlich andere Rolle als die Schädelwölbung, auf der ja auch allenthalben die Wirkung der Gabel zu Tage tritt, so werden sich im Gegentheil auch hier vielleicht Punkte schwächerer Erregung finden lassen. Wie dem aber auch sei, jedenfalls bleibt dann nichts anderes übrig, als die relative Verstärkung oder Schwächung von Punkt zu Punkt durch Interferenzen zu erklären. Im Einzelnen lässt sich freilich die Wirkung derselben nicht übersehen; hängt sie doch von gar zu vielen Factoren ab, von Amplitude, Phase und Anzahl der zusammenfließenden Wellenzüge, die wieder ihrerseits durch die Leitfähigkeit der Substanz in ihren verschiedenen Schichten, durch Länge und Querschnitt der passirten Wege und andere Momente bestimmt werden. Das Höchste, was wir in dieser Richtung erreichen können, ist ein schematisches, hie und da durch Versuchsergebnisse bestätigtes Bild.

Nun soll aber die Annahme, dass die von einem Gehörorgane ausgehenden Schallwellen sich im anderen gleichsam wieder concen-

tiren und so durch Interferenz verstärken, dadurch direct widerlegt sein, dass bei Zuführung eines etwas höheren Tones diese Verstärkung nicht ausbleibt, ja nicht einmal merklich geringer ist, sondern in gleicher Weise wie zuvor auftritt. Acceptiren wir jedoch die angegebene Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Knochen mit 3000 m. p. s., so dass die beiden verwendeten Töne ungefähr eine Wellenlänge von 12 bzw. 10 m. haben, und beachten wir ferner, dass die Wegedifferenz der allseitig übergeleiteten Schwingungen kaum mehr als 10 cm, ihre Phasendifferenz am Interferenzort mithin für den tieferen Ton höchstens  $3^\circ$ , für den höheren  $3,6^\circ$  betragen kann, so ergibt sich im Maximum zwischen beiden Fällen ein Unterschied von nicht mehr als 0,0003 der Gesamtintensität, — ein Unterschied, der nie, auch nicht durch die Versuchsanordnung des Herrn Frey zur Wahrnehmung gebracht werden kann. Der obige Versuch vermag daher über die Frage der Interferenz nicht im mindesten zu entscheiden. Hier versagt selbst unser durch die Localisation gegebenes Kriterium für Unterschiede der beiderseitigen Erregungsstärken, welches unbestreitbar weitaus empfindlicher ist, als das auf die Hörbarkeitsdauer des Mikrophontones gegründete in den Frey'schen Versuchen.

Ist nun hier der Einfluss der Interferenz ein unwesentlicher, so scheint das Umgekehrte in einem anderen Versuche der Fall zu sein. Es ist bekannt, dass der Ton einer wenig oberhalb des einen Ohres aufgesetzten Gabel gewöhnlich im anderen gehört wird. Ohne Zuhilfenahme der Interferenz wird man es kaum plausibel machen können, dass der Ton das nächstliegende Ohr mit geringerer Stärke erreicht als das gegenüberliegende. Nach unserer Annahme dagegen müssen hier die einzelnen um den Kopf herum fließenden Portionen infolge der allseitig wenig verschiedenen Weglänge mit nahezu gleicher Phase im gegenüberliegenden Ohre eintreffen und können sich darum dort beträchtlich verstärken, während die entsprechenden Portionen im nächstliegenden Ohre bei 300 Schwingungen p. s. mit ca.  $15^\circ$  Phasendifferenz zur Interferenz gelangen, — genügend, um selbst bei relativ großem Intensitätsunterschiede der letzteren Componenten noch unsere Erklärung als zutreffend erscheinen zu lassen.

Wie dieser, so enthalten auch unsere eigenen Versuche bestimmte Hinweise darauf, dass die beobachteten Erscheinungen aus Inter-

ferenzen hervorgehen. Dass die Ueberleitung ohne Phasenverschiebung vor sich gehe, wird natürlich Niemand behaupten, der einmal die Kopfknochenleitung anerkennt. Ja sie kann auch nicht nahezu gleich Null sein, da sonst die beiderseitigen Schwebungen als synchron erkannt würden, und die Localisationswanderung ein Räthsel bliebe. Beim Aufsetzen der Gabeln auf verschiedene Punkte des Kopfes muss sich dann freilich auch die Phasendifferenz zwischen den Schwingungen in den beiden Gehörorganen ändern. Aber auch die Stärke, in der sie zu diesen gelangen, wird im Allgemeinen dabei eine Modification erfahren; und das allein würde freilich, wie unsere Formeln und Curven zeigen, auch schon genügen, um die beim fünften Versuche beobachtete Einschränkung der Localisationswanderung, ja unter Umständen, wenn das Intensitätsverhältniss der von jeder Gabel zu beiden Ohren geleiteten Reize zu sehr vom Werthe 1 abweicht, auch noch das völlige Verschwinden dieser Wanderung zu erklären. Aber hier schon stellt sich dieser Erklärung eine andere Schwierigkeit entgegen: Die Schwebungen müssten ja gleichzeitig verschwinden, was nicht im mindesten zutrifft. Und wie sollte gar die Umkehrung der Localisationswanderung mit jener Auffassung in Einklang gebracht werden! — Was nun die bloße Aenderung des Verhältnisses  $a_1 : a$  nicht zu erklären vermag, findet durch die Aenderung von  $d$  spielend seine Erklärung: Auch für  $d = 0$  wird  $V_i = 1$ , hört die Localisationswanderung auf, ohne dass dabei die von den Werthen  $a$  und  $a_1$  abhängigen Schwebungen gleichzeitig zu verschwinden brauchten; und für negatives  $d$  hat man nur die Curven der Fig. 5 um die Abscissenaxe zu drehen, so dass jeder oberhalb letzterer gelegene Curventheil unterhalb der Axe zu liegen kommt, und umgekehrt; das bedeutet aber nichts Anderes als eine Umkehrung der Localisationswanderung. Bei Vertheilung der Gabeln auf bestimmte Punkte des Kopfes verschwindet nun thatsächlich die Localisationswanderung, während die Schwebungen bestehen bleiben; für diese muss also  $d = 0$  werden. Beim Aufsetzen der Gabeln auf andere Punkte vollzieht sich die Localisationswanderung bald in der einen, bald in der anderen, entgegengesetzten Richtung, muss also  $d$  das eine Mal positiv, das andere Mal negativ sein. Diese mannigfaltigen Aenderungen von  $d$  sind aber nur verständlich, wenn sich die Schwingungen von der Ansatzstelle der Gabeln über den ganzen Kopf

verbreiten, um sich dann in den Gehörorganen wieder mehr oder weniger zu concentriren. — Mit diesen Andeutungen will ich hier die Erörterung, die eigentlich überhaupt einer späteren Arbeit vorbehalten bleiben sollte, abbrechen, da durch eine eingehendere Begründung derselben unser Nachtrag zu einer besonderen Abhandlung anwachsen würde.

Zudem möchten wir hier noch kurz auf eine zweite Untersuchung eingehen, deren Resultate sich mehrfach mit den unsrigen berühren, nämlich auf die »Researches on Acoustic Space« von M. Matsumoto<sup>1)</sup>. Uns muss aus derselben natürlich vorwiegend das über die Richtungslocalisation in der Dimension »Rechts-Links« Mitgetheilte interessiren. Mit der schon von v. Kries, Preyer, Münsterberg und Anderen geübten Methode der Untersuchung kann ich mich freilich keineswegs einverstanden erklären; denn da es sich hier um die Feststellung, ja sogar um eine quantitative Bestimmung der Abhängigkeit der Localisation von gewissen Factoren handelt, so wäre es doch das Haupterforderniss, dass die Versuchsanordnung die fraglichen Factoren völlig unabhängig von einander zu variiren gestattet. Dieses ist aber nicht erfüllt; die Telephone werden schwerlich völlig gleiche Klangfarbe besessen und durchaus identische und synchrone Schwingungen ausgeführt haben; namentlich aber muss ihre Ortsveränderung, durch welche ein successiver Wechsel im Intensitätsverhältniss der beiderseitigen Erregungen eingeführt werden sollte, stets auch von einer Aenderung der Phasendifferenz der letzteren begleitet gewesen sein. Da nun, wie wir aus unserem dritten Versuche wissen, die Aenderung der Phasendifferenz auch schon allein im Stande ist, eine (bereits bei ca. 1 cm Differenz der Schallwege merkliche) Localisationsverschiebung in gleichem Sinne zu veranlassen, so kann mithin die in Herrn Matsumoto's Versuchen beobachtete Localisationsänderung auch nicht lediglich auf Rechnung der Variation gesetzt werden, welche das Intensitätsverhältniss der von beiden Telephonen zugeführten Schwingungen durch die Verschiebungen der Apparate erleidet. Der Antheil, welchen dort die Aenderung des Intensitätsverhältnisses und diejenige der Phasendifferenz an dem Localisationswechsel haben, wäre erst durch besondere Versuche festzustellen.

---

1) Studies from the Yale Psychological Laboratory. Vol. V. 1897.

Wenn nun aber auch hiernach die bezüglichlichen Einzelwerthe in den Tabellen jener Arbeit einer erheblichen Correctur bedürfen, so könnte doch trotzdem die Folgerung, dass die Localisationsverschiebung von der Medianebene aus in ihrer Abhängigkeit von dem Intensitätsverhältniss der beiderseitigen Erregungen dem Weber'schen Gesetze gehorcht, innerhalb gewisser Grenzen ihre Gültigkeit behalten, weil ja die Phasenverschiebung nach unserer Erklärung auch nichts anderes als eine Aenderung dieses Intensitätsverhältnisses zur Folge hat. Der Abstand des jeweiligen Verhältnisses  $V_i = \frac{J_r}{J_l}$  von dem Werthe 1 würde dabei der Reizintensität, die zugehörige Abweichung der Localisation von der Richtung »vorn« der Empfindungsintensität entsprechen. Unsere Curve vermag natürlich an sich keinen Aufschluss über diese Beziehung zu geben. Doch ließen sich leicht mit Hülfe der bekannten logarithmischen Curve auf der Ordinatenaxe diejenigen Werthe von  $V_i$  bestimmen, welche den auf der Abscissenaxe zu markirenden gleich merklichen Localisationsverschiebungen entsprechen. Die Curve müsste etwa zufolge den Angaben von Lord Rayleigh und Anderen unsere Ordinatenaxe bei dem Werthe  $V_i = 1,01$  schneiden, — übrigens ein Werth, welcher zeigt, dass unsere aus ganz anderen Ueberlegungen hervorgegangenen Curven, obwohl sie die Localisationswanderung auf äußerst geringe Aenderungen des Werthes  $V_i$  gründen, sich doch darin durchaus im Rahmen der bisherigen Ermittlungen halten. — Für die weitere Eintragung jener, gleich merklichen Localisationsverschiebungen entsprechenden Werthe  $V_i$  müssten wir die Größe der Constanten in der Curvenformel kennen. Bei geeigneter Wahl derselben kann die Eintheilung in ihren ersten Punkten vom Coordinatenanfang aus derart ausfallen, dass die Zeitpunkte auf der Abscissenaxe in Fig. 5, welche dieser Eintheilung für eine unserer Curven entsprechen, nahezu gleiche Abstände haben; m. a. W. die logarithmische Curve kann unter Umständen in ihrem ersten Theile eine Gestalt annehmen, welche derjenigen unserer Curven außerordentlich ähnlich ist.

Wenn es hier nun freilich auch noch allenthalben an genaueren Daten fehlt, so verdient doch hervorgehoben zu werden, dass eben jene Uebereinstimmung beider Curven eine weitere interessante Bestätigung für unsere Auffassung einschließt. Nämlich die Locali-

sationsverschiebung vollzieht sich bei den binauralen Schwebungen, wie bemerkt, bis zu etwa  $45^\circ$  Abstand beiderseits der Medianebene mit nahezu constanter Winkelgeschwindigkeit. Das würde heißen: Die Localisation verschiebt sich innerhalb dieser Zone in gleichen Zeiten um gleich merkliche Beträge. Kommt nun aber hiernach einer Reihe von Abscissentheilen in Fig. 5 die doppelte Bedeutung von Zeitstrecken und eben merklichen Localisationsverschiebungen zu, so muss der zugehörige Curvenabschnitt, wenn überhaupt das Weber'sche Gesetz hier Gültigkeit besitzt, einen der logarithmischen Curve sehr ähnlichen Verlauf nehmen. Dies scheint auch in der That, zumal bei den größeren Curven für  $a_1 : a = 1 : \sqrt{2}$  der Fall zu sein. Doch wäre es voreilig, schon jetzt ohne weitere bezügliche Untersuchungen Schlüsse zu ziehen. Wohl aber dürfte durch obige Ueberlegung ein Weg angedeutet sein, um diejenige Curve ausfindig zu machen, welche der Localisationswanderung bei den Schwebungen am genauesten entspricht.

---