

Aus dem Physiologischen Institute der k. k. Universität Wien.)

Experimentelle Studien über die Schalleitung im Schädel.

Von

Dr. HUGO FREY,

Assistent der k. k. Universitätsklinik für Ohrenkranke
(Hofrath Prof. Dr. A. POLITZER) in Wien.

(Mit einer Tafel.)

Einleitung und Fragestellung.

Bekanntlich betrachtet man diejenige Art der Schallzuleitung zum Labyrinth, bei der die Schallwellen durch die Luft des Gehörganges und den Schalleitungsapparat im engeren Sinne gehen, als die gewöhnliche und bezeichnet sie mit dem Namen der „Luftleitung“. Im Gegensatze dazu wird mit dem Worte „Kopfknochenleitung“ der Vorgang bezeichnet, bei dem die Schallwellen, ohne vorerst die Luft des Gehörganges zu passiren, direct auf die Knochen des Schädelskelettes auftreffen und von da aus auf irgend einem Wege das Labyrinth erreichen.

Die Frage, welches dieser Weg sei, ist heute noch eine umstrittene, wiewohl sie bereits seit sehr langer Zeit zur Discussion steht. Dieser Umstand beleuchtet am besten die Verworrenheit, in der das ganze Problem der Kopfknochenleitung mit den sich anschließenden Fragecomplexen physiologischer und pathologischer Natur sich befindet.

Dafs es für die Knochenleitung nur einen quantitativen Unterschied ausmachen könne, ob die Wellen durch feste Körper auf den Knochen direct übertragen werden (z. B. durch eine aufgesetzte Stimmgabel), oder ob sie durch das Medium der Luft ihm mitgetheilt werden, ist klar, und es wäre auch noch festzu-

stellen, inwieweit bei der gewöhnlichen Art des Hörens in der Luft die Knochenleitung mitconcurrirt, d. h. ein wie grosser Antheil von den in der Luft sich ausbreitenden Schallwellen einerseits den Gehörgang passirend und ein wie grosser andererseits direct, die Schädeloberfläche treffend, dem Endorgane des N. Acusticus zugeführt wird.

So reich nun die bisherige Literatur an Untersuchungen über die Knochenleitung und über ihre pathologischen Veränderungen ist, so gering ist in ihr das eigentliche experimentelle Moment vertreten; ihr theoretisches Ergebniss muss ein recht bescheidenes genannt werden. Der Grund dafür liegt wohl darin, dass wir es hier mit höchst complicirten Vorgängen zu thun haben und dass die meisten der bisherigen Untersuchungen, insofern sie sich nicht auf rein speculativer Basis bewegen, unter ungünstigen Umständen am Lebenden vorgenommen wurden oder — wenn am Präparat — doch sofort die verwickelteren Theilfragen des Problems in Betracht zogen.

Es scheint, dass die Untersuchung am Lebenden schon deshalb grossen Schwierigkeiten begegnet, weil für die Verwerthung ihrer Resultate sowohl die objective als die subjective Zuverlässigkeit des Untersuchten entscheidend wird und uns nur Anfang und Ende einer Reihe bekannt werden, deren Mittelglieder für die unmittelbare Anschauung ganz verloren gehen — gerade sie sind es aber, die uns besonders interessiren.

Die zweite Möglichkeit, durch Untersuchungen am Präparate Klarheit zu gewinnen, wurde bisher so verstanden, dass man sich das irgendwie präparirte Gehörorgan als solches zum Object des Experimentes wählte, wobei aber bereits die verwickelteren Verhältnisse des sogenannten Schalleitungsapparates complicirend auftreten.

Die Erklärung der Versuchsergebnisse erfordert es, mit einer Reihe von Begriffen zu operiren, die bisher durchaus nicht genügend definirt worden sind, und sich auf Vorgänge beziehen, deren rein physikalische Wesenheit überhaupt noch nicht ersichtlich ist.

Ich setzte es mir daher als Aufgabe, vorerst die Bedingungen zu studiren, welche für die Schalleitung im Knochen überhaupt maassgebend sind und konnte hoffen, neben Resultaten, welche an und für sich interessant zu sein versprochen, auch solche zu erzielen, die als eine Grundlage für höher geordnete Probleme

dieser Art dienen konnten. Um möglichst gründlich zu verfahren, wählte ich vorläufig folgende Fragen:

1. In welcher Weise wird der Schall überhaupt im menschlichen Knochen fortgeleitet, und welchen Einfluß nimmt die Structur des Knochengewebes auf den Leitungsvorgang?

2. Wie verhält sich in dieser Beziehung der macerirte Knochen zum frischen?

3. In welcher Weise werden den Schädelknochen zugeführte Schallwellen in diesen fortgeleitet; in welchem Ausmaasse geschieht dies und auf welchem Wege?

4. Wie verhält es sich diesbezüglich a) beim macerirten Schädel, b) beim nicht macerirten Kopfe?

Bisheriger Stand der Frage.

Früheren Autoren¹ erschien es vielfach zweifelhaft, ob überhaupt der Schallzuleitung durch die Kopfknochen irgend ein in Betracht kommender Werth zuzuschreiben sei. Es war zwar bereits von INGRASSIA² bemerkt worden, daß Schallwellen durch die festen Theile des Schädels fortgeleitet und percipirt werden können, und im 18. Jahrhundert zeigte PEROLLE³, daß die harten Theile des Kopfes sehr geeignet wären, die Töne zum Gehörnerven fortzupflanzen, während diejenigen Theile, welche mit Weichgebilden bedeckt wären, diese Eigenschaft in einem geringeren Grade besäßen. Auch bestimmte er die vortheilhaftesten Stellen am Kopfe, von welchen aus sonst Tauben noch manche Töne wahrnehmbar zu machen wären. Er hielt eine Taschenuhr bei verstopften Ohren an alle Punkte der Oberfläche des Kopfes und bestätigte die Erfahrung BÜCHNER's, daß überhaupt die Theile, welche mit viel „Fleisch“ bedeckt sind, weniger empfindlich sind für den Schall als solche, bei denen die Knochen nicht so tief liegen. Am besten pflanzten die Zähne den Schall fort, nächst diesen der vordere und untere Winkel des Vorderhauptbeines.

¹ L. H. bei Literaturangaben bedeutet: citirt nach LINCKE's Handbuch der Ohrenheilkunde, Leipzig 1837.

² INGRASSIA. Commentarii in Galeni librum de ossibus. Panormi 1603. L. H.

³ PEROLLE nach *Lichtenberg's Magazin für das Neueste aus der Physik und Naturgeschichte* 2, 3. L. H.

JORISSEN¹ und WINKLER² sowie auch BAUMER³ machen ebenfalls einige Anmerkungen in dieser Beziehung.

CHLADNI⁴ fand, daß eine Uhr, die er auf den Hinterkopf brachte, um so deutlicher gehört werde, je mehr er sie derjenigen Stelle näherte, an der das Hinterhauptbein mit dem Felsenbein verbunden ist. Diesbezügliche Beobachtungen sind auch von ARNOLD⁵ mitgeteilt.

Während derart das Phänomen der directen Kopfknochenleitung, beobachtet bei unmittelbarer Berührung der schwingenden festen Körper mit dem Knochen, als etwas auch schon in älterer Zeit Bekanntes erscheint, finden wir ebenso bereits sehr früh die Erfahrung mitgeteilt, daß durch die Luft fortgeleitete Schwingungen, indem sie auf den Schädel auftreffen, zu dem eigentlichen Gehörorgan geleitet werden können.

So erzählen PIETRO DE CASTRO⁶, PANAROLUS⁷, DE LANIS⁸ und LENTIN⁹ von hierher gehörigen Fällen.

Diese Thatsache wurde allerdings von TREVIRANUS¹⁰ bezweifelt, aber Versuche, welche PERIER und SAVART¹¹ anstellten, ergaben sichere Beweise für die Möglichkeit der Schallzuleitung auf diesem Wege.

In der bekannten Abhandlung über das Hören von HARLESS¹² finden wir diese beiden Arten der Zuleitung des Schalles als bekannte Thatsachen dargestellt, und es ist sogar hier bereits eine Anzahl von Versuchen mitgeteilt, welche über die Art der Schallfortpflanzung in festen und flüssigen Körpern einige Aufklärung bringen. Jedoch sind dieselben derart ausgeführt, daß

¹ JORISSEN. Diss. inaug. sistens novae methodi surdos reddendi audientes rationes. Halae Magdeb. 1757. L. H.

² WINKLER. De ratione audiendi per dentes programma. Lipsiae 1759. L. H.

³ BAUMER. Prodromus methodi surdos a nativitate faciendi audientes et loquentes. Erfordi 1749. L. H.

⁴ CHLADNI. Die Akustik. Leipzig 1802. § 224 u. ff.

⁵ ARNOLD. *Zeitschr. f. Physiologie* v. TIEDEMANN u. TREVIRANUS 2, 153. L. H.

⁶ PIETRO DE CASTRO. Tractatus de Colostro. Caput III. L. H.

⁷ PANAROLUS. Pentecost. IV. Obs. 17. L. H.

⁸ DE LANIS. Magisterium naturae et artis. L. H.

⁹ LENTIN. *Beiträge zur praktischen Arzneiwissenschaft* 2, 117. L. H.

¹⁰ TREVIRANUS. Biologie. Bd. VI. L. H.

¹¹ PERIER und SAVART. *Froriep's Notizen* 41 (14). L. H.

¹² HARLESS. WAGNER's Handwbt. der Physiologie, 1853, Bd. IV.

sie nur mittelbare Schlüsse auf den Lebenden zulassen. Ueberdies bringen sie keine directen Hinweise auf die Wege der Schalleitung im Knochen.

JOHANNES MÜLLER¹ hält die Knochenleitung für wenig werthvoll bei den Luftthieren; aber er giebt zu, daß sie sehr geeignet sei, Schwingungen fester Körper im Gegensatz zu Luftschwingungen dem Labyrinth zuzuführen; jedenfalls widmet er ihr aber ausführlichere Betrachtungen als irgend einer der früheren Autoren.

PURKINJE² bestritt, daß die Schalleitung durch die Kopfknochen praktisch für das Hören des Menschen in Betracht käme, ja, die Möglichkeit der Schallübertragung aus der Luft auf den Knochen wollte er fast gänzlich leugnen.

So gab auch RINNE³ der Meinung Ausdruck, daß die Schalleitung durch die Kopfknochen „nur als ein unbeabsichtigtes Accidens“, das bei der Elasticität aller Körper nicht ganz vermieden werden konnte, zu bezeichnen und für die Luftthiere nicht in Betracht zu ziehen sei. Dennoch hat sich im Laufe der Jahre die Erkenntniß Eingang verschafft, daß die Schalleitung durch die Kopfknochen eine höchst bedeutsame Rolle in der Physiologie des Hörens spiele. In den derzeit vorliegenden Hand- und Lehrbüchern der Physiologie findet man sie auch überall schon als Parallelphänomen der Luftleitung vorgetragen.

Insbesondere waren es die Beobachtungen am Kranken, welche die Otiater veranlaßten, sich mit diesem Thema zu beschäftigen und so besteht denn auch die Literatur über die Physiologie der Kopfknochenleitung zum großen Theile aus Arbeiten, welche von den Beobachtungen und den Bedürfnissen der Klinik ausgehend der Untersuchung und der Klärung ihrer pathologischen Veränderungen dienen; die Frage nach den normalen Verhältnissen wird in diesen Arbeiten meistens nur gestreift, jedenfalls wird ihr nicht experimentell näher getreten.

In der lehrreichen Arbeit POLITZER'S⁴ über Schallfortpflanzung und Schalleitung im Gehörorgan finden wir das erste Mal exacte

¹ JOHANNES MÜLLER. Handbuch der Physiologie, 1840, Bd. II, S. 455 ff.

² PURKINJE. Referat in d. *Prager Vierteljahrsschrift*, 1860, XVII. Jahrg., 91. Annalen.

³ RINNE. Beiträge zur Physiologie des menschlichen Ohres. *Ebenda*, 1855, XII. Jahrg., 1, 72.

⁴ POLITZER. *Archiv für Ohrenheilkunde*, 1860, 1.

Registrirmethoden zur Aufklärung von Fragen aus diesem Kapitel verwendet. MACH¹ giebt ebenfalls einige Andeutungen über diese Punkte. Diese Arbeiten befassen sich jedoch durchwegs mit der Frage über das Schicksal der durch die Kopfknochen zugeleiteten Schallwellen im Gehörorgane selbst. Das eingangs erwähnte Grundproblem wurde hierbei nicht in ausführlichere Erwägung gezogen.

Es müßte auffallend erscheinen, daß ein so wichtiges Kapitel in derartiger Weise vernachlässigt wurde, wenn nicht die Ursache dafür so klar zu Tage läge. Es fehlte an geeigneten Untersuchungsmethoden, um einem bereits so allgemein bekannten Phänomen näherzutreten.

Die von EXNER² ersonnene Methode der mikrophonischen Untersuchung hierher gehöriger Vorgänge wurde von MADER³ im physiologischen Institut der Wiener Universität weiter ausgearbeitet, und es gelang ihm, mit derselben mehrere Probleme aus der Physiologie der Schalleitung erfolgreich zu studiren.

In der letztcitirten Abhandlung finden wir auch einige Aufklärungen über uns speciell interessirende Fragen. Dieselben werden weiter unten an den betreffenden Stellen noch herangezogen werden.

Methoden der Untersuchung.

Den wesentlichsten Theil des Untersuchungsapparates bildete ein Mikrophon Fig. 1 (*M*). Dasselbe war ein Exemplar derjenigen, welche die Firma SIEMENS & HALSKE für ihre Telephonstationen verwendet, und wurde mir von der Firma in freundlichster Weise zur Verfügung gestellt. Dieses Mikrophon besteht aus einem Seidensäckchen (*S*), das an der Basis eine Kohlenplatte (K_1) trägt und mit dieser auf eine Metallplatte aufgekittet wurde. Auf der entgegengesetzten Fläche befindet sich eine etwas kleinere Kohlenplatte (K_2), die central eine kleine Oeffnung trägt, in welche ein Hartgummistift (*St*) eingeführt ist. Die beiden Kohlenplatten stehen mit dem Inhalt des Seidensäckchens (feines Kohlenpulver) in directer leitender Verbindung. Mittels eines

¹ MACH. *Sitzungsber. der kais. Akad. d. Wiss. Wien*, II. Abth., 1863, 283 und 1864, 342.

² EXNER. *Wiener klinische Wochenschrift*, 1900, 534.

³ MADER. *Sitzungsber. der kais. Akademie d. Wiss. in Wien, Math.-naturw. Classe*, 109, III. Abth.

zwischen Stift und Kohlenplatte angebrachten Metallplättchens und eines daran sich anschließenden sehr feinen und nachgiebigen Drahtes einerseits und durch die an der Basis des Säckchens befindliche Metallplatte andererseits konnte das Mikrophon in einen Stromkreis $x_1 x_1$ eingeschaltet werden. Die letzterwähnte Platte war nämlich an einem Stativ befestigt, welches eine Verschiebung des Mikrophons in allen drei Raumrichtungen gestattete. Das Stativ stand durch seine Metalltheile mit dem Mikrophon bei K_1 in leitender Verbindung und war von seiner Fußplatte, einer schweren Bleischeibe, isolirt. Von dem leitenden Theile des Stativs ging nun ein Leitungsdraht bis zu dem einen Pol eines Elementes (E_1), der andere Pol war mit der Kopfplatte des Mikrophons verbunden. Dadurch war der Stromkreis $x_1 x_1$ geschlossen.

Wenn man in diesen einfachen Stromkreis an irgend einer Stelle eine Drahtspirale (Pr) (als primäre) einschaltet und hierauf über dieselbe eine secundäre (Sc) Spirale stülpt, deren Enden unmittelbar zu einem Telephon (T_1) gehen, so wird dieser einfache Apparat geeignet sein, Schallschwingungen, welche dem erwähnten Mikrophonstifte zugeführt werden, im Telephon wieder hörbar werden zu lassen. Das Kohlenpulver setzt nämlich dem constant durchfließenden Strome einen bestimmten Widerstand entgegen. Wird nun durch die Schallschwingungen das Kohlenpulver in eine entsprechende Erschütterung gebracht und dadurch die gegenseitige Lage der Kohlentheilchen in bestimmter Weise geändert, so entsteht auch eine entsprechende Abänderung in dem den Magneten des Telephons umkreisenden Strom. Auf diese Weise werden im Telephon dieselben oder vielmehr gleichwerthige Schwingungen erzeugt, wie sie dem Mikrophon zugeführt werden.

Es ist dadurch möglich, in der Nähe des Mikrophons gesprochene Worte, musikalische Töne etc. im Telephon wieder zu hören, und zwar um so genauer, je näher das Mikrophon dem schallerzeugenden Körper sich befindet. Liegt er demselben direct an, so wird der entsprechende Schall am lautesten gehört. Es ergibt sich daher die Möglichkeit, die Schallschwingungen irgend eines festen Körpers und zwar eines jeden zugänglichen Punktes desselben, im Telephon hörbar zu machen. Da ausserdem im Telephon derartige Töne oder Geräusche bedeutend intensiver gehört werden als sie selbst in der nächsten Um-

gebung des tönenden Körpers vernommen werden können, ist es mittels der angegebenen Vorrichtung möglich, sich genauer über die Schwingungsverhältnisse eines festen Körpers zu informiren, als es selbst bei unmittelbarer Beobachtung mit dem Ohre geschehen könnte.

Bei meinen Versuchen kam es wesentlich darauf an, die Intensität des Schalles an verschiedenen Punkten zu messen. Dies wurde dadurch erreicht, daß ich als Schallquelle eine abklingende Stimmgabel benützte und mittels einer Stopuhr die Zeit in Secunden maafs, die vom Hörbarwerden des Tones im Telephon bis zu seinem vollständigen Erlöschen verstrich. Bei gleich kräftigem Anschlagen der Stimmgabel und guter Leitung wird der Ton länger gehört werden als bei schlechter Leitung; daher darf man *ceteris paribus* aus der Hördauer eines Tones im Telephon unmittelbar auf die Stärke des Bewegungsimpulses (Intensität der Schallschwingung, die dem Mikrophon übermittelt wird) schliessen.

Dabei muß allerdings vorausgesetzt werden, daß der Mikrophonapparat stets gleichmäfsig functionire und daß die Uebertragung von den schwingenden Theilen auf das Telephon stets in gleicher Weise vor sich gehe. Nur dann können die gewonnenen Zahlen als untereinander vergleichbare Maafse für die Schalleitungsfähigkeit der untersuchten Theile angesehen werden. Bezüglich des ersten Punktes gebrauchte ich (s. u.) bestimmte Vorsichten in der Versuchsanordnung; der gleichmäfsige Ausfall und die Uebereinstimmung zahlreicher Controlversuche erlauben mit grofser Sicherheit anzunehmen, daß auch der zweiten Forderung Genüge geleistet wurde.

Wenn also im Folgenden die bei den Versuchen ermittelten Zahlen für die Hördauer direct als Ausdruck der Schalleitungsfähigkeit der jeweilig untersuchten Theile benutzt werden, so ist dabei stillschweigend von der hier begründeten Annahme Gebrauch gemacht.

Es kann jedoch nur dann erlaubt sein, die an verschiedenen Punkten gewonnenen Resultate mit einander zu vergleichen, wenn jedesmal der Anfangswiderstand im Mikrophon ein gleicher ist; es war somit eine Anordnung zu treffen, durch welche dieser Widerstand stets gleich gemacht werden konnte.

Derselbe setzt sich offenbar aus zwei Componenten zusammen. (Wir sprechen im Folgenden nur von derjenigen

Versuchsordnung, bei welcher der Stift des Mikrophons direct auf den schwingenden Körper aufgesetzt wird.) Die eine Componente ist der Widerstand, den das Kohlenpulver als solches in seiner Ruhelage bietet, die andere die Widerstandsänderung, welche durch das Andrücken des Stiftes an den festen Körper und durch die Uebertragung dieses Druckes auf das Kohlenpulver gesetzt wird. Im Allgemeinen ist diese Aenderung als ein negativer Werth anzusehen.

Es wurde nun folgende Versuchsordnung angewendet, um stets gleiche Versuchsbedingungen einzuhalten:

Durch eine POHL'sche Wippe ohne Kreuz (W), die in den primären Stromkreis eingeschaltet wurde, konnte das Mikrophon aus der Verbindung mit der primären Spirale ausgeschaltet und in einen anderen Stromkreis eingeschaltet werden, der folgendermaassen hergestellt war:

Ein zweites Element (E_2) schickte seinen Strom direct durch eine Leitung ($Y Y$), die sich an einer Stelle (B) gabelförmig theilte. Die Arme dieser Gabel vereinigten sich dann wieder (bei A) und führten zum Element zurück. In den einen waren ein Flüssigkeitsrheostat (Rh) und das Mikrophon eingeschaltet, in den anderen ein Mefsdraht (AB) (auf einem Stab mit empirischer Theilung montirt), an welchem eine Metallbrücke (Br) verschiebbar angebracht war; von derselben ging ein Kabel zu einem Galvanometer (G), das andererseits mit einem Punkte des anderen Armes der Stromleitung verbunden war. Die Anordnung ergiebt sich aus der Figur 1.

Es ist ersichtlich, dafs in dem zweiten Stromkreise ($Y Y$) das Princip der WHEATSTONE'schen Brücke durchgeführt ist.

Wenn ich nun das Mikrophon in den zweiten Stromkreis einschalte, so kann ich durch eine entsprechende Einstellung der Flüssigkeitsrheostaten einerseits und der Mefsdrahtbrücke andererseits das Verhältnifs der Widerstände im ganzen System derart gestalten, dafs es der Gleichgewichtsformel der WHEATSTONE'schen Brücke genügt und die Nadel des Galvanometers auf dem Nullpunkte steht. Dabei geschieht die grobe Einstellung durch den Flüssigkeitsrheostaten, die feinere am Mefsdraht. In diesem Zustande wird das Galvanometer von keinem activen Strome umkreist.

Aendert sich nun neuerdings der Widerstand auf der einen Seite der Brücke (im Mikrophon), so macht die Nadel des

Galvanometers einen Ausschlag, dessen Gröfse mit der Widerstandsänderung wächst. Es kann demnach durch Ablesung des Ausschlagswinkels direct ein Maafs für die Widerstandsänderung gefunden werden.

Das Anlegen des Mikrophons an einen festen Körper ist, wie schon erwähnt, mit einem gewissen Drucke und daher auch mit einer Widerstandsänderung im Mikrophon selbst verbunden. Erhält man nun bei einem Versuche einen gewissen Ausschlag und drücke ich bei einem folgenden Versuche das Mikrophon wieder gerade so stark an, dafs ich denselben Ausschlagswinkel erhalte, so weifs ich, dafs der Mikrophonstift genau so stark angedrückt wird wie im vorigen Versuche, und ich kann auf diese Weise die ganze Versuchsreihe unter identischen Umständen durchführen. Die feine Einstellung des Mikrophonstiftes (beim Andrücken) geschieht wiederum durch die Mikrometerschraube des Statives.

Im concreten Falle wurde der Versuch in folgender Weise ausgeführt:—

Das Mikrophon wurde mit seinem Stifte dem irgendwie fixirten, zu untersuchenden Körper möglichst nahe gebracht, und zwar so, dafs der Stift perpendicularär auf dessen Oberfläche gerichtet war. Nun wurde das Mikrophon in den Stromkreis YY eingeschaltet und durch Einstellung des Rheostaten und der Mefsbrücke zuerst der Nullpunkt gesucht. War dies geschehen, so wurde durch Drehen an der Mikrometerschraube der Mikrophonstift dem Objecte bis zur erfolgten Berührung genähert. Nun erhielt ich am Galvanometer einen gewissen Ausschlag, den ich durch weiteres Andrücken oder Nachlassen auf die gewünschte Gröfse bringen konnte. War auf diese Weise das entsprechende Anliegen des Stiftes gesichert, so wurde mittels Umlagen der Wippe das Mikrophon in den Stromkreis $x_1 x_1$ eingeschaltet, welcher mit dem Telephon T_1 in Verbindung stand, und nun konnte die Beobachtung beginnen.

Es sei bemerkt, dafs das Telephon T_1 , vom Versuchsraum durch eine dicke Wand ZZ getrennt, in einem anderen Zimmer sich befand und dafs ein zweites Telephon (T_2) mittels Nebenschliessung im Versuchszimmer angebracht war. Dadurch war es ermöglicht, dafs der Experimentator die Correctheit der Anordnung im Versuchszimmer prüfen, den Gang des Versuches controlliren und sich telephonisch mit dem im Nebenzimmer befindlichen Gehülfen

verständigen konnte. Eine weitere Communication zwischen beiden Personen war durch ein Läutwerk gegeben. Später ersetzte ich das Läutwerk durch ein aus mehrfachen Gründen vortheilhafteres Lichtsignal. In den Stromkreis war ferner noch ein Kohlenrheostat (*Krh*) eingeschaltet, mittels dessen empirisch die günstigsten Widerstandsverhältnisse ein für allemal festgelegt wurden. DUBOIS'sche Schlüssel waren an entsprechenden Stellen in Verwendung. Als Elemente wurden Trockenelemente von SIEMENS & HALSKE gebraucht. Außerdem sei bemerkt, daß behufs Vermeidung jeder störenden Erschütterung das Galvanometer, das Mikrophon und das Object auf einem von Grund auf gemauerten Bussolentisch aufgestellt waren.

Diese Versuchsanordnung unterscheidet sich von der MADER's wesentlich dadurch, daß erstens MADER das Object verstellbar hatte, während das Mikrophon fix war (diese Anordnung mußte ich wegen der Größe meiner Objecte umkehren), und zweitens, daß MADER einen Compensationsstrom zur Messung verwendete und dazu im Ganzen drei Elemente benötigte, während ich durch Verwendung der WHEATSTONE'schen Brücke mit einem Elemente das Auslangen fand, was die Manipulation vereinfachte.

Darstellung der Versuche.

I. Vorversuche.

Entsprechend der Eingangs aufgeführten Fragestellung suchte ich vor Allem Daten über die Schalleitungsverhältnisse im Knochengewebe überhaupt zu gewinnen. Als Object diente zunächst ein macerirter und getrockneter Oberschenkelknochen eines Erwachsenen; seine Länge betrug 46,5 cm; er wurde in horizontaler Richtung in einen Schraubstock eingespannt, und zwar so, daß nur der Kopf des Femur von ihm umfaßt wurde und der große Trochanter nach oben zu liegen kam. In den Stiel einer Stimmgabel von 242 Schwingungen wurde ein Doppelschraubengewinde eingeschnitten. Sie wurde in der Fossa trochanterica so eingeschraubt, daß sich ihr Stiel in der Verlängerung einer Axe befand, die man sich von der Fossa trochanterica bis zur Fossa intercondyloidea gezogen denken kann. Die Stimmgabelbranchen standen vertical über einander. Aus einem kleinen Gefäße, das an einem Stativ vertical verschiebbar und genau über der Stimmgabel angebracht war, konnte man durch

Oeffnen der Bodenklappe ein Schrotkorn herabfallen lassen, durch welches die Stimmgabel angeschlagen wurde. Diese Methode, gleich starke Schwingungen zu erzeugen, hatte schon MADER angewendet. Es wurde stets dasselbe Schrotkorn verwendet, welches ein Gewicht von 0,499 gr hatte. Das Optimum der Fallhöhe (von 23,5 cm) war empirisch ermittelt worden und wurde durch ein Fadenloth stets wieder gefunden. Es wurde während der ganzen Versuchsreihe genau festgehalten.

Zuerst hatte ich mich über die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der ganzen Versuchsanordnung zu orientiren. Zu diesem Zwecke wurde die Stimmgabel auf die erwähnte Weise zum Tönen gebracht und das mit einem bestimmten Drucke an den Knochen angesetzte Mikrophon an das Beobachtungstelephon angeschlossen. Es ergab sich unmittelbar Folgendes:

Der Beobachter am Telephon konnte deutlich das Auffallen des Kügelchens und unmittelbar darauf das Erklingen eines seiner Höhe nach für ihn genau erkennbaren Tones hören, der sehr langsam an Intensität abnahm, bis er verlösch. Die Constatirung dieses Verlöschens bot keine Schwierigkeiten, da dem beobachtenden Ohre dieser Moment stets durch ein scheinbares, plötzliches Anschwellen der im Telephon stets vorhandenen Nebengeräusche erkennbar wurde. Da die Möglichkeit von subjectiven Täuschungen des Beobachters, wie Nachempfindungen u. dgl. nicht ausgeschlossen war, wurde eine Reihe von Versuchen angestellt, um diesbezügliche Angaben zu erhalten. Die Zeit von dem Auffallen des Kügelchens bis zum Erlöschen des Stimmgabeltones wurde mit Hülfe der Stopuhr direct gemessen und notirt.

Es ergab sich, dafs bei den ersten Beobachtungen die gewonnenen Zahlen für die Hördauer allerdings sehr variirten, doch war dies bereits bei der darauffolgenden Beobachtung eines nächsten Punktes bedeutend weniger der Fall, so dafs bei noch weiter folgenden Beobachtungen schon eine hochgradige Näherung der einzelnen Werthe an einander stattfand. Da diese Versuchsergebnisse ein gewisses Interesse darbieten, insofern, als sie die rasch eintretende Uebung bei Beobachtung einer bestimmten Erscheinung zeigen und im Allgemeinen über die Zuverlässigkeit der Versuche Aufschluss geben, so setze ich einige Zahlenreihen aus meinen Tabellen hierher. Bei den ersten Versuchen, bei denen ein beliebiger Punkt des Knochens vom Mikrophon be-

rührt wurde, ergaben sich folgende Zahlen: (Die Zahlen bedeuten die Zeit in Secunden zwischen Beginn und Erlöschen des Tones)

10 16 9 9 10 8 10 11 10 11 12 12.

Man sieht schon an dieser Reihe, wie gegen das Ende zu die Gleichmäßigkeit sich steigert.

Bei einer späteren Reihe finden sich folgende Zahlen:

11 12 13 12 12 12 12 12 12 11 12 11.

Die kleinen, jederzeit vorkommenden Schwankungen wurden dadurch ihres Einflusses beraubt, daß von jedem untersuchten Punkte zwölf aufeinander folgende Zahlen notirt wurden und das Durchschnittsresultat für die Aufstellung verwerthet wurde.

Bei der Ausführung der im Nachfolgenden dargestellten Versuche wurde ich durch die Herren Dr. D. HECHT, sz. Aspirant der Universitätsohrenklinik, und Dr. V. PICK, sz. Assistent des otiatrischen Ambulatoriums im allgemeinen Krankenhaus in freundlichster Weise unterstützt. Ihre gewissenhafte Beobachtung und die von ihnen vorgenommene Registrirung der Versuchszahlen trug wesentlich zum Gelingen der Experimente bei und ich erlaube mir an dieser Stelle, ihnen dafür meinen besten Dank auszusprechen.

I. Die Fortpflanzung des Schalles im Knochengewebe im Allgemeinen.

1. Versuchsreihe.

Die erste Versuchsreihe beschäftigte sich mit der Feststellung der Schalleitungsverhältnisse im Röhrenknochen mit Rücksicht auf seine Structur. Außer in der MADER'schen Arbeit wird über diese Angelegenheit nirgends gesprochen.

MADER versuchte, sich über den Unterschied in den Schalleitungsverhältnissen der Corticalis und Spongiosa des Knochens an einem Querschnitte desselben zu orientiren, und erhielt, indem er an dieser einen Querschnittsfläche experimentirte, das Ergebniss, daß die Corticalis des Knochens in ihrer mikrophonischen Wirkung¹ die Spongiosa bedeutend übertreffe. Dieses Er-

¹ Mit diesem Ausdruck ist hier und im Folgenden das Ergebniss der mikrophonischen Untersuchung eines Punktes gemeint, ausgedrückt in Secunden der Hördauer. Ueber die Beziehung dieser zur Schalleitungsfähigkeit der betreffenden Theile siehe S. 16.

gebnis drückt er in dem Satze aus, daß „die dem Knochen durch die Schallwellen mitgetheilten lebendigen Kräfte an verschiedenen Punkten verschieden zur Geltung kommen, so zwar, daß der maafsgebende Einfluß der Structur unverkennbar und die Kraftübertragung umso bedeutender ist, je compacter die Knochenmasse gebaut ist“.

Diese an einem Querschnitte gewonnenen Resultate müssen jedoch nicht unbedingt für sämtliche möglichen Querschnitte des Knochens Geltung haben, insbesondere deshalb nicht, weil wir wissen, daß das gegenseitige Verhältniß von Spongiosa und Compacta in ihrer Vertheilung ein außerordentlich variables ist.

Wenn nach den neueren Anschauungen die Detailstructur des Knochens kein Product des Zufalls, sondern der Ausfluß bestimmter mechanischer Factoren ist, so muß auch die Leitungsfähigkeit des Knochens für den Schall sich auf gewisse bestimmte Grundsätze zurückführen lassen, vorausgesetzt, daß zwischen ihr und der Structur des Knochens eine directe Beziehung besteht. Es lag mir daher vor Allem ob, an einem solchen Knochen das Verhältniß der mikrophonischen Wirkung der Corticalis zu der der Spongiosa zu erforschen und zwar sowohl auf ein und demselben Querschnitte, wie auch in verschiedenen Abständen von dem in Schwingung versetzten Ende. Zu diesem Zwecke arbeitete ich nach der bereits oben beschriebenen Versuchsanordnung. Gestützt auf eine Reihe von 38 Versuchen, deren jeder 12 Einzelbeobachtungen umfaßt, also bei einer Anzahl von 456 Einzelbeobachtungen, darf man annehmen, daß sich im Gesamtergebnisse einzelne Versuchsfehler gegenseitig compensiren; gleichlautende Resultate werden umso beweisender sein.

Es wurden im Ganzen an dem Knochen durch queres Absägen von Scheiben 11 Querschnitte angelegt, gleichzeitig aber wurden auch entsprechende Punkte des natürlichen Längsschnittes untersucht. Die Vertheilung der Querschnitte ist aus der Figur 2 ersichtlich. Die ersten 12 Versuche leiden, da ich zu dieser Zeit mich erst in die Methodik genauer einzuarbeiten hatte, an verschiedenen Fehlern, insbesondere daran, daß ich bei denselben den Druck des Mikrophonstiftes zu gering, also den Ausschlag des Galvanometers zu schwach wählte. Bei den folgenden Versuchen wurde durchwegs ein stärkerer Druck gewählt (17 Theilstriche der Galvanometerskala), und diese Ein-

stellung durch die ganze Versuchsreihe festgehalten. Auf die Querschnittsflächen der Compacta konnte der Stift ohneweiters aufgesetzt werden. Da die Spongiosabälkchen zu schwach waren, um den Druck des Stiftes ohne Weiteres auszuhalten, wurde auf dieselben ein sehr kleiner Siegelacktropfen gebracht, welcher an der Oberfläche so lange abgefeilt wurde, bis er ein ganz dünnes Plättchen darstellte, und daran der Stift angesetzt.

Was nun vor Allem das Verhältniß der Schalleitung in der Längsrichtung zu der in der Querrichtung betrifft, so ergibt sich Folgendes:

Die mikrophonische Wirkung von Punkten der Querschnittsfläche (compacte Substanz) ist, wie die nachfolgende Tabelle zeigt, durchwegs höher als die der Punkte des natürlichen Längsschnittes in gleicher Höhe. Die Ebenen sind vom distalen zum proximalen Ende gezählt.

Siehe Fig. 2.		Querschnittsfläche (Compacta)			Natürlicher Längsschnitt (Compacta)			Galvanometerausschlag
Ebene	Abstand d. Ebene vom proximalen Ende des Knochens (in cm)	Punkt Nr.	Beobachtung Nr.	Resultat (Hördauer in Sec.)	Punkt Nr.	Beobachtung Nr.	Resultat (Hördauer in Sec.)	
5	26,5	16	25	39	10	14	25	17
6	22,5	17	27	38,7	7	10	22,6	17
7	21	19	29	35	6	9	24,8	17
8	18	21	31	33,7	10	30	22,4	17
9	16	23	33	43,4	24	34	36,9	17
10	14	25	35	31,5	26	36	29,3	17

Daraus ergibt sich, daß bei der getroffenen Anordnung die Intensität des Schalles sich in der Längsrichtung des Knochens bedeutend leichter fortpflanzt als in der queren, d. h. daß als Leitungsrichtung für den Schall an unseren Knochen vorzugsweise die natürliche Längsaxe desselben in Betracht kommt. Die Erklärung dieser Erscheinung kann durch folgende Ueberlegung ermittelt werden:

Die Knochenelemente halten im Allgemeinen am Röhrenknochen eine Längsanordnung ein, und ihre Massentheilchen

werden auch der Länge nach schwingen, da sie durch die Stimmgabelstöße in dieser Längsrichtung verlaufende Impulse erhalten. Allerdings würde sich in einer homogenen Masse der Schall nach allen Richtungen gleichmäÙig verbreiten, und zwar nach dem HUYGHEN'S Gesetz in Form von Kugelschalen. Bei dem complicirten Bau des Knochens jedoch wird man nicht erwarten können, daß die Schallwellenoberfläche eine Kugeloberfläche darstellt, sondern sie wird die Gestalt eines anderen sphärischen Körpers haben, von dem wir nach dem Gesagten wohl annehmen können, daß er eine längste Axe parallel mit der Längsaxe des Knochens und eine kürzeste in der darauf senkrechten Richtung besitzen wird. Dadurch wird die Uebereinstimmung unter den Zahlen der vorstehenden Tabelle erklärt. Diese Uebereinstimmung bezüglich der erheblichen Differenz zwischen Quer- und Längsleitung erscheint jedoch nicht mehr in der 10. Querschnittsfläche, da hier die beiden Zahlen nur minimal von einander abweichen. Auch dieses Verhalten ist aus der Structur des Knochens erklärlich.

Wir sehen, daß in dem zwischen Querschnittsfläche 10 und proximalen Ende gelegenen Knochenstück die eben erwähnte Längsanordnung der Elemente nicht aufrecht erhalten ist, vielmehr ziehen die Bälkchen der Spongiosa, unter verschiedenen Winkeln sich durchkreuzend in mannigfaltigen Richtungen durch den Innenraum des Knochens. Damit entfällt die wesentlichste Ursache für das Vorwiegen der Längsleitung und je mehr sich die Structur des Knochens der Homogenität nähert, desto ähnlicher werden auch die Bedingungen für die Schalleitung in den verschiedenen Richtungen; diese Aehnlichkeit kommt eben in der Annäherung der Zahlen in der letzten Querreihe unserer Tabelle zum Ausdruck.

II. Das Verhältniß der compacten zur spongiösen Substanz in Bezug auf die Schalleitung.

Nach dem oben angeführten Satze von MADER würde man a priori anzunehmen haben, daß durchwegs die Corticalis derjenige Theil sei, welcher den Schall besser leite. Daß dies nicht geschieht, und zwar gerade in Folge der eigenthümlichen Structurverhältnisse des Knochens, ergibt sich aus folgender Zusammenstellung:

Siehe Fig. 2.		Querschnittflächen der						Galvanometer- ausschlag
Ebene Nr.	Abstand d. Ebene vom proximalen Ende (in cm)	Compacta			Spongiosa			
		Punkt Nr.	Beob- achtung Nr.	Resultat	Punkt Nr.	Beob- achtung Nr.	Resultat	
1	44,5	—	—	—	9	13	31,7	17
2	41	12	16	20,9	11	15	30,8	17
3	34	14	20	30,7	13	19	27,0	17
11	9	27	37	24,1	28	38	32,0	17

Gehen wir nun daran, diese Resultate auf die Structurverhältnisse zu beziehen, die an den betreffenden Querschnitten ersichtlich sind, so zeigt sich Folgendes:

Auf dem Querschnitte Nr. 1 bildet die Spongiosa ein dichtes und sehr festes Balkenwerk, welches durchaus den Eindruck einer, wenn auch unterbrochenen, so doch gleichmäfsig dichten Platte macht. Hier ist die Compacta nur als eine dünne Schale vorhanden, und zwar als eine so dünne, dafs sich nicht einmal der Stift des Mikrophons an ihr ansetzen läfst.

In der Ebene Nr. 2 zeigt sich die Spongiosa bereits stark aufgelockert; die Compacta stellt einen dickeren Ring dar, dessen Durchmesser etwa 2 mm beträgt. Hier erhalten wir für die spongiöse Substanz eine ungleich gröfsere Zahl wie für die Compacta.

Auf dem nächsten Querschnitte Nr. 3 hat sich dieses Verhältnifs zu Gunsten der compacten Substanz umgekehrt. Diese bildet hier einen Hohlcyylinder, dessen Manteldicke durchschnittlich 3 mm beträgt, die Spongiosa liegt als ein dünnes und leichtes Maschenwerk in dem Hohlraum dieses Cylinders.

Hier haben wir bereits ein unverkennbares Ueberwiegen der an der Compacta gewonnenen Zahlen über die an der Spongiosa erhaltenen, also das Entgegengesetzte von dem früher Gefundenen.

Auf den folgenden Querschnitten gewinnen wir keine Zahlen an der spongiösen Substanz, da sie theils zu locker geworden ist, theils auch schon vollständig fehlt. Erst an dem Querschnitte Nr. 11 stellt die Spongiosa wieder ein festes, resistentes Blätterwerk dar, ähnlich dem am ersten Querschnitte, und hier finden wir wieder in der Spongiosa eine vergleichsweise

höhere Zahl, nämlich 32, gegenüber der relativ niedrigen Zahl von 24,1 am compacten Knochen.

Es ergibt sich also aus dem Anblicke der Zahlreihen, daß zu allererst die spongiöse Substanz sich als besser schalleitend erweist gegenüber der compacten, daß sich weiterhin dieses Verhältniß vollständig umkehrt und am Schlusse durch eine neuerliche Inversion wieder dem am Anfangsquerschnitte entspricht. Gleichzeitig bemerken wir, daß diese Veränderungen in den Zahlen mit wesentlichen Veränderungen der gegenseitigen Strukturverhältnisse einhergehen, d. h., wir sehen einen auffallenden Wechsel sowohl in der Vertheilung als auch in den Dimensionen der beiden in Betracht kommenden Querschnittspartien.

Suchen wir die gegenseitige Beziehung aus der Tabelle zu ergründen, so ergibt sich, daß dort, wo die Spongiosa eine feste Consistenz, hingegen die Compacta nur einen außerordentlich kleinen Querschnitt besitzt, von der Ersteren mehr Kraft auf das Mikrophon übertragen wird, also in dem auf Seite 16 erörterten Sinne auch ein besseres Schalleitungsvermögen vorausgesetzt werden darf als an der Compacta. Wo sich jedoch die Spongiosa auflockert und die Compacta an Mächtigkeit gewinnt, übernimmt diese die Rolle des besseren Schalleiters.

Da gar keine anderen einflussnehmenden Momente aufzufinden sind, welche diese Veränderung in der Schalleitung involviren könnten, so dürfen wir auch, wenn rein physikalische Ueberlegungen uns nicht schon von vorneherein diese Erklärung nahelegen würden, sagen, daß das wesentlichste Moment für die Schalleitungsfähigkeit eines Knochens, die mehr minder grofse Dichte in der Aneinanderlagerung seiner Theilchen ist.

Was noch interessiren könnte, wäre, die Ursache der Verschiedenheit aufzufinden, welche sich in den einzelnen Zahlen des Querschnittes ergibt und die sich in relativ grofsen Grenzen bewegt, da man im Allgemeinen erwarten könnte, daß sich dort, wo die Spongiosa vollständig fehlt, an allen Querschnitten annähernd gleiche Zahlen gewinnen lassen müfsten. Nun zeigt sich aber, daß gerade dort die Zahlen in der Compacta ansteigen, wo dieselbe an Dicke abnimmt, während sie dort geringer werden, wo der Ring der Compacta sich verbreitert.

Dieses Verhältniß zeigt sich rein dort, wo wir es nur mit Compacta zu thun haben; wo die Spongiosa dazutritt, wird es allerdings etwas alterirt, bleibt aber immer noch erkennbar.

Man könnte diese Erscheinung zu erklären versuchen durch die Annahme, daß die lebende Kraft auf allen Querschnitten die gleiche sei; wo der Querschnitt an Ausdehnung abnimmt, erhöht sich die Summe der an jedem Punkt desselben wirkenden Einheiten der lebenden Kraft, wodurch derselbe als mikrophonisch wirksamer sich darstellt. Es läßt sich dieses Verhalten anschaulich machen durch den Vergleich mit einem gewöhnlichen Hörrohr. Auch hier werden die an dem weiten Ende eintretenden Schallwellen gegen das enge hin verdichtet, und es findet sich auf dem kleinern Querschnitt eine bedeutende Verstärkung des Schalles.

Sicherlich wäre es von Interesse, mit Bezug auf die bisherigen sowie auch auf die folgenden Versuchsergebnisse eine genauere Kenntniß der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Knochen zu besitzen. Die derzeit zur Verfügung stehenden Daten sind zu spärlich und durchaus nicht vollkommen zuverlässig. Wir haben übrigens Grund, dieselbe nach den Angaben von LUCAE¹ und CICCONE und CAMPANILE² mit ca. 3000 m pro Secunde anzusetzen.

Dies sind die wesentlichsten Ergebnisse der Untersuchung am macerirten Röhrenknochen.

Die nächste Aufgabe mußte sein, die in Rede stehenden Verhältnisse am frischen Knochen zu studiren. Diesem Zwecke diente die zweite Versuchsreihe.

2. Versuchsreihe.

Es wurde ein frischer, 47 cm langer, von den Weichtheilen befreiter Oberschenkelknochen eines Erwachsenen benützt. Der Knochen enthielt also noch das Mark und alle Gewebsflüssigkeiten in seinen Interstitien. Zur Conservirung wurde der Knochen in 50 % Alkohol eingelegt, bei welchem Verfahren sich kaum irgendwelche für die Versuche in Betracht kommende Veränderungen einstellen dürften. In dieser Flüssigkeit verblieb

¹ LUCAE. Die Schalleitung durch die Kopfknochen. Würzburg 1870.

² CICCONE und CAMPANILE. *Rend. di Napoli* (2), 5, 187; 1891. Cit. nach LANDOLT und BÖRNSTEIN, Phys.-chem. Tabellen, Berlin 1894.

der Knochen während der ganzen Dauer der Versuche und wurde nur zu diesen selbst aus ihr herausgenommen. Die sonstige Anordnung war identisch mit der in der I. Versuchsreihe beschriebenen, bloß mit dem Unterschiede, daß wegen des feuchten Zustandes der Schnittflächen das Anbringen der Siegellacktröpfchen nicht gelang. Deshalb stellte ich mir durch Zufeilen kleine konische Elfenbeinnägel von etwa $2\frac{1}{2}$ mm Länge und 1 mm Durchmesser her. Diese wurden fest in die Spongiosa eingedrückt und auf ihrer freien Oberfläche der Mikrophonstift angesetzt.

Es wurden im Ganzen 22 Punkte untersucht, und von jedem wieder 12 Zahlen gewonnen, so daß in toto 264 Zahlen mir zur Verfügung stehen. Die Lage der Querschnitte im Knochen ist aus Figur 3 zu ersehen. In derselben Anordnung wie in der vorigen Versuchsreihe ergibt die Zusammenstellung folgendes Resultat:

Siehe Fig. 3.		Querschnittsfläche (Compacta)			Natürlicher Längsschnitt			Galvanometerausschlag
Ebene Nr.	Abstand d. Ebene vom proximalen Ende des Knochens (in cm)	Punkt Nr.	Beob- achtung Nr.	Resultat (Hörzeit in Se- cunden)	Punkt Nr.	Beob- achtung Nr.	Resultat (Hörzeit in Se- cunden)	
4	29,5	17	17	29,5	3	3	11,8	17
5	23	18	18	34,2	4	4	15,0	17
6	15,5	19	19	29,4	5	5	15,4	17
7	10	20	20	32,5	6	6	20,5	17
8	6	21	21	27,3	7	7	21,5	17

Daraus erhellt, daß die Leitungsverhältnisse am frischen Knochen sich denen des macerirten analog verhalten, mit der Ausnahme, daß die Differenzen nach beiden Richtungen etwas größer sind.

Die Ergebnisse der Untersuchung an den einzelnen Querschnitten zeigt die nachstehende Tabelle:

Siehe Fig. 3.		Querschnittsflächen der						Galvanometer- ausschlag
Ebene Nr.	Abstand d. Ebene v. proximalen Ende des Knochens (in cm)	Compacta			Spongiosa			
		Punkt Nr.	Beob- achtung Nr.	Resultat	Punkt Nr.	Beob- achtung Nr.	Resultat	
0	47	1	1	28,4	—	—	—	17
1	44	11	11	19,1	9	9	21,6	17
2	39,5	14	14	23,1	12 13	12 13	26,1 22,6	17
3	37	16	16	26,1	15	15	22,2	17
8	6	21	21	27,3	22	22	27,3	17

Beziehen wir wieder diese Zahlen auf die Strukturverhältnisse der betreffenden Querschnitte, so zeigt sich Folgendes:

In der Ebene 0, das ist in der natürlichen distalen Gelenkfläche des Oberschenkels erhalten wir relativ hohe Zahlen.

Auf dem ersten Querschnitte überwiegt wiederum das Leitungsvermögen der Spongiosa dasjenige der Compacta evident, wobei gleichzeitig zu bemerken ist, daß hier die Spongiosa ein dichtes, festes Gewebe ist, das von einer ganz dünnen Schale der Compacta umgeben wird.

Auf dem zweiten Querschnitte, auf dem die Spongiosa bereits gelockert ist, aber die Compacta, wenn auch noch ziemlich dünn, denn doch schon einen bedeutenderen Durchmesser besitzt, haben wir ein zwiespältiges Resultat insofern, als wir einen Punkt der Spongiosa vorfinden, der schlechter, und einen anderen, der besser leitet als der untersuchte Punkt in der compacten Substanz.

Auf dem dritten Querschnitte, wo wir eine schon sehr weiche und lockere Spongiosa vor uns haben, während die Compacta die ansehnliche Dicke von 4 mm besitzt, ist bereits das Ueberwiegen der Compacta in Bezug auf die Hördauer deutlich ausgesprochen.

Auf dem achten Querschnitte endlich, wo Compacta und Spongiosa dieselben Zahlen ergeben, finden wir eine dichte und feste Spongiosa umgeben von einem mächtig starken Ringe der Compacta.

Es ist daraus ohne Weiteres ersichtlich, daß die an dem mace-

rirten Knochen constatirten Verhältnisse auch an dem nach von seinen Weichtheilen erfüllten Knochen bestehen. Daraus ist zu folgern, daß bei der Schalleitung im Knochen wesentlich die Knochensubstanz und zwar Compacta und Spongiosa in Betracht kommen und daß die in und zwischen dieselben eingeschalteten Weichtheile eine untergeordnete Rolle spielen.

Wir sind daher wohl auch zur Annahme berechtigt, daß am lebenden Knochen, der der directen mikrophonischen Untersuchung nicht zugänglich ist, Analoges sich findet.

Besonders interessant für uns sind die Querschnitte Nr. 2 und Nr. 8. Da wir nach dem bisher Gefundenen sowohl an dem macerirten als auch an dem frischen Knochen dieselben Gesetze in Geltung finden, so dürfen wir auch die Resultate des einen zur Erklärung der Resultate des anderen heranziehen. Nun haben wir in der Ebene Nr. 8 der II. Versuchsreihe gerade eine solche Ebene getroffen, in welcher das Leitungsvermögen der compacten und der spongiösen Substanz einander die Wage halten, in der Ebene Nr. 2 der II. Versuchsreihe jedoch zeigt sich in überzeugender Weise der Umschlag der Leitungsverhältnisse, indem an zwei verschiedenen Punkten Differenzen in entgegengesetztem Sinne auftreten. Wir können deshalb zusammenfassend Folgendes sagen:

I. Der Femur leitet einen auf ihn direct übertragenen und in der Längsrichtung eintretenden Schallwellenzug hauptsächlich in der compacten Substanz fort; diese Fortleitung geschieht vorwiegend in der ursprünglichen Richtung, demnach bei den gegebenen Bedingungen in der Längsaxe des Knochens.

II. Die Schallübertragung auf das Mikrophon als Maafs für die in Betracht kommende lebende Kraft genommen, geschieht je nach der wechselnden Structur des Knochens bald besser von der Compacta, bald von der Spongiosa. Sie ist in der Compacta gegenüber der Spongiosa um so besser, je mächtiger jene dieser gegenüber entwickelt ist.

III. Dieser Satz gilt gleichmäfsig für den macerirten, trockenen, wie für den die Weichtheile enthaltenden feuchten Knochen; er wird voraussichtlich auch für den lebenden Knochen zutreffen.

Hatte ich in den bisherigen Versuchen die Frage nach den Fundamentalerscheinungen der Schallleitung im Knochen studirt und zu einem wenigstens für unsere Zwecke befriedigenden Abschlusse gebracht, so konnte ich mich nunmehr der ungleich interessanteren Frage nach der Art der Schallleitung im Schädel selbst zuwenden. Diesem Probleme als einem sehr ausgedehnten konnte bei exacter Versuchsanordnung jedoch nur gradatim näher getreten werden und aus der grossen Anzahl von möglichen Versuchen nur solche ausgewählt werden, welche für sich wenigstens wieder zu grundlegenden Schlüssen zu führen versprochen.

III. Die Fortpflanzung des Schalles im Kopfe.

3. Versuchsreihe.

Die im Folgenden zu beschreibenden Versuche setzten es sich zum Zweck, die Art und Weise zu studiren, in welcher Schallwellen im Schädel und zwar vorerst nur im knöchernen Schädel fortgeleitet werden, wenn sich das Centrum der Schallerregung in dem Gehörgang der einen Seite befindet. Es ist dies letztere sicherlich eine Anordnung, wie sie ganz ähnlich beim physiologischen Höract besteht, indem die in den Gehörgang eindringenden Schallwellen von hier aus auch auf den Knochen übergehen, wofür der Nachweis bereits MADER (l. c.) gelungen ist.

Absichtlich wollte ich es vermeiden, schon in diesem Stadium der Versuche den ganzen complicirten Apparat der sog. Schallleitungskette mit in Betracht zu ziehen, da es mir vor Allem um die Verhältnisse im knöchernen Schädel zu thun war. Zu erforschen, welcher Art die Beeinflussung des Vorganges durch die beiderseits vorhandenen „Schallleitungsapparate“ sei, und in welcher Weise das Versuchsergebnis dadurch alterirt würde, behielt ich mir als Object für spätere Versuche vor.

Es können also die nunmehr folgenden Versuche über nichts Anderes Aufschluß geben als darüber, wie sich der Schall im knöchernen Schädel, abgesehen von allen Accidentien fortpflanzt und verbreitet. Wenn damit auch noch nichts Definitives über die sonst bei der Discussion der Kopfknochenleitung in den Vordergrund tretenden Fragen der craniellen und craniotympanalen Leitung gesagt werden wird, ja diese sogar gefliessentlich außer Acht gelassen werden, so muß doch gerade das hier Gefundene

als das stets vorhandene und einseitig bestimmte Substrat des gesammten Vorganges betrachtet werden.

Object der Versuche war ein macerirter Schädel ohne Unterkiefer, dessen obere Zahnreihe vollständig erhalten war. Die Frage der Fixation, welche bei den in den vorhergehenden Versuchsreihen benutzten Objecten in einfacher Weise zu lösen war, bot hier Anfangs einige Schwierigkeiten, da die Gefahr nahe lag, daß durch die Einklemmung des Schädels an irgend einer Stelle seine Schwingungs- und Schalleitungsverhältnisse wesentlich geändert werden könnten. Als das Einfachste ergab sich, diese Fixation so ähnlich als möglich der natürlichen zu gestalten.

Dadurch, daß der Schädel mit den Condylen des Hinterhauptes auf den Gelenksflächen des Atlas aufliegt, ist ihm die Möglichkeit gegeben, in einer großen Anzahl verschiedener Stellungen durch Muskelaction sich zu fixiren; er ist also nicht fest mit einer Unterlage verbunden, sondern innerhalb gewisser Grenzen beweglich aufgehängt. Dies ahmte ich in folgender Weise nach: Ein tiefer hölzerner Hohlcyylinder wurde mit Watte ausgefüllt und der Schädel derartig auf denselben gelegt, daß der Gesichtstheil durch einen entsprechend angebrachten Ausschnitt des Cylinders freiblieb. Dies genügte, um den Schädel durch sein eigenes Gewicht in seiner Lage zu erhalten, und zwar sicher genug, um auch dem andrückenden Mikrophonstift nicht nachzugeben. Dabei war ihm die Möglichkeit belassen, im Ganzen möglichst frei zu schwingen. Das Auftreffen der Schallwellen in senkrechter Richtung auf das Labyrinth der einen Seite wurde dadurch erreicht, daß eine Stimmgabel, die genau so beschaffen war wie die in den früheren Versuchen verwendete, direct durch den Gehörgang in die Promontorialwand der Trommelhöhle eingeschraubt wurde. Sie durchbohrte dieselbe in der Richtung von aussen nach innen und würde in der Verlängerung etwas nach vorne und oben von der Tuba Eustachii durchgedrungen sein, d. h. also, die longitudinalen Schwingungen des Stieles liefen in einer Richtung ab, die einer gedachten Verlängerung der Pyramidenaxe entsprach. Die übrige Anordnung war dieselbe wie in den früheren Versuchsreihen. Kleinere Verbesserungen der Versuchsanordnung, die sich als nothwendig ergaben, übergehe ich. Da durch die Neuadjustirung der Anordnung die elektrischen Widerstände sich einigermaßen änder-

ten, war die günstigste Leistung des Telephons bei dem Theilstriche 15 des Galvanometers zu erzielen, im Gegensatze zu dem früher benützten 17.

Um nun verschiedene Punkte des Schädels mikrophonisch untersuchen zu können, zog ich auf demselben eine Anzahl von Linien, welche stets fixirbare Punkte verbanden (Fig. 4 und 5). Es waren folgende:

1. Eine Linie von der Spina supra meatum der einen Seite bis zu einem Punkte in der Mitte zwischen beiden Tubera frontalia und von da zur Spina supra meatum der anderen Seite I
2. Eine Linie von der Spina supra meatum der einen Seite bis zum Bregma und von da zur Spina supra meatum der anderen Seite II
3. Eine Linie von der Spina supra meatum der einen Seite bis zum Zusammentritte der Schenkel der Lambdanaht und von da zur Spina supra meatum der anderen Seite III

Diese frontalen Linien werden folgendermaassen getheilt:

Ich markire den Halbierungspunkt zwischen medianer Sagittalebene des Schädels und der Spina. Die Distanz dieser Halbierungspunkte und der Spina wird noch einmal halbirt. Die Punkte werden folgendermaassen bezeichnet: Die Spina supra meatum mit 0, die nächst höheren Punkte von vorne nach hinten mit 1, 2 und 3, die noch höheren mit 4, 5 und 6. Die Punkte auf der Seite der eingeschraubten Stimmgabel werden mit einem Komma versehen.

Diese Eintheilung ist in dem beifolgenden Schema dargestellt (Fig. 4 u. 5).

Es wurden im Ganzen 16 Beobachtungsreihen mit je 12 Einzelbeobachtungen aufgenommen. Dabei wurden 13 Punkte berücksichtigt, da der Punkt 0 an derjenigen Seite, an der sich die Stimmgabel befand, wegen dieser für das Mikrophon nicht zugänglich war.

Bei den complicirten Verhältnissen dieser Versuchsreihe ist die Tabellenform zur Darstellung nicht geeignet, es wurde daher die graphische Wiedergabe der Versuchsergebnisse durch Eintragung derselben in ein Schema gewählt. In den beiliegenden Skizzen über die III. Versuchsreihe Fig. 6, 7, 8, 9 und 10 bedeuten die Zahlen die an den betreffenden Punkten erzielte

Hördauer in Secunden. Fig. 7 und 8 zeigen die Zahlen an den entsprechenden Punkten des Schädels eingetragen, Fig. 9 und 10 die Anordnung der Zahlen in der verticalen (sagittalen), Fig. 11 in der horizontalen Projection. Es ergibt sich daraus Folgendes :

Berücksichtigen wir vor Allem die Werthe, die wir auf der Stimmgabelseite erhalten, so finden wir, daß die größte Zahl an dem Punkte 3 erhalten wird, d. h. an demjenigen Punkte, der nach hinten oben zunächst der Gehörgangsöffnung liegt; die in derselben Querlinie nach vorne liegenden Punkte ergaben geringere Zahlen.

Weiterhin zeigt sich, daß die Zahlen mit der zunehmenden Entfernung vom Gehörgange nach oben hin an Größe abnehmen, mit Ausnahme zweier Punkte auf der Linie 1, bei denen dieses Verhältniß umgekehrt ist; hier läßt sich aber die auffallend geringe Zahl in der unteren Querreihe durch die Lage des Punktes knapp an der Naht zwischen Schläfenschuppe und Stirnbein erklären. Die Knochen schlossen an dieser Stelle nicht ganz fest aneinander, sondern waren etwas gegeneinander beweglich, so daß hier eine Unregelmäßigkeit der Schalleitung vorausgesetzt werden darf, da durch die in weiteren Amplituden erfolgenden Schwingungen ein größerer Verbrauch an lebendiger Kraft in der Zeiteinheit entstehen mußte.

Auf der anderen, der Stimmgabel abgewendeten Seite ergab sich dasselbe Verhältniß, d. h. auch hier stellte sich der Hörwerth eines Punktes um so höher, je näher derselbe dem Gehörgang, respective der Spina supra meatum gelegen war.

Wir finden dadurch, daß die Intensität der Schallschwingungen, die von der Gegend des rechten Hörapparates ausgegangen sind, in der Gegend des linken Hörapparates eine auffallend große ist, größer sogar als in gleichen Entfernungen vom Ausgangspunkt an anderen Stellen des Schädels, und daß ferner diese Intensität an der oberen Convexität des Schädels verhältnißmäßig gering ist. Da man kaum wird annehmen wollen, daß die Schallwellen, indem sie sich durch das Schädeldach fortpflanzen, sich im linken Gehörorgan gleichsam wieder concentriren, so ist die Erklärung der Erscheinungen wohl darin zu suchen, daß die Schallwellen in den compacten Massen der Felsenbeine einen besonders günstigen Leitungsweg vorfinden und somit, trotz dem die an der Basis zwischen

den Felsenbeinen gelegenen Theile voraussichtlich weniger zur Leitung geeignet sind, hauptsächlich auf diesem Wege zur anderen Seite hinüber gelangen. Die erwähnten Verhältnisse treten ganz besonders hervor, wenn man erwägt, daß eigentlich eine um so geringere Schallintensität zu erwarten wäre, je weiter der untersuchte Punkt von der Schallquelle entfernt ist. Indessen ergibt sich, daß z. B. der Punkt 0, der vom Punkt 0₁ sicher bedeutend weiter entfernt ist, als z. B. der Punkt 1₁, einen höheren Zahlenwerth hat als dieser.

4. Versuchsreihe.

Um die Frage zu beantworten, ob die in der früheren Versuchsreihe beobachteten Verhältnisse nicht etwa auf Interferenzerscheinungen zurückzuführen seien, ein Umstand, der zu folgenschweren Irrthümern Anlaß hätte geben können, nahm ich zur Controle die hier folgenden Versuche vor.

Obwohl die Schallwellen im Allgemeinen groß sein werden im Vergleich zu den Dimensionen des Schädels, so war doch zu erwarten, daß, falls die obige Erscheinung auf Interferenz beruhen sollte, Variationen an derselben auftreten müßten, wenn man Töne von bedeutend kürzerer Wellenlänge benutzt. Deshalb gebrauchte ich dieselbe Versuchsanordnung wie in der III. Versuchsreihe, änderte jedoch die gewählte Stimmgabel. Die nunmehr verwendete Stimmgabel war in Größe und Form der früher gebrauchten ganz ähnlich, hatte jedoch eine größere Schwingungszahl. Sie war nur eine Quart höher als die in der III. Versuchsreihe benützte Stimmgabel von 240 Schwingungen. Sonst wurden die Versuche in genau derselben Weise angestellt wie die vorhergehenden, ihre neuerliche Zusammenstellung ergibt sich wiederum aus dem beifolgenden Schema. (Fig. 11, 12, 13, 14, 15.) Wir entnehmen aus demselben Folgendes:

Betrachten wir wieder zuerst die Stimmgabelseite, so zeigt sich ein ähnliches Verhältniß wie in der vorhergegangenen Reihe. Auf dieser Seite finden wir ein Abnehmen und Verklingen des Tones von der Umgebung des Gehörganges resp. der Basis der Pyramide aus gegen die Umgebung. Auf der gegenüberliegenden Seite besteht ebenfalls wieder eine ziemlich beträchtliche Differenz zwischen den einzelnen Querreihen, indem auch hier von oben nach unten, das ist in der Richtung

gegen die Pyramide die Zahlen bedeutend höher werden. Dabei bemerke man weiterhin:

Es sind auf dieser Seite die Zahlen der untersten und der zweitnächsten Reihe sogar höher wie die entsprechenden der Stimmgabelseite; insbesondere wird an der Spina supra meatum der leeren Seite eine Zahl von 30,8 erreicht, welche die Zahlen der anderen Seite noch bedeutend übertrifft; allerdings kann aus den oben erwähnten Gründen der correspondirende Punkt der anderen Seite, der eine vielleicht noch höhere Zahl ergeben hätte, nicht untersucht werden. Hier tritt also die bereits oben betonte höhere Intensität des Schalles in der Umgebung der Pyramide der anderen Seite mindestens ebenso deutlich hervor, wie in der 3. Versuchsreihe. Aus dieser Uebereinstimmung ergibt sich, daß es sich nicht um Interferenzen handeln kann.

5. Versuchsreihe.

Ebenso wie gelegentlich der II. Versuchsreihe, die am macerirten Knochen vorgefundenen Verhältnisse durch den Vergleich mit den am frischen Knochen constatirten controllirt wurden, liefs ich mir es auch hier angelegen sein, die Ergebnisse der Untersuchung am macerirten Schädel durch die Untersuchung eines frisches Kopfes zu completiren. Ich verschaffe mir einen möglichst frischen Kopf aus dem anatomischen Institute, der noch keine Fäulniserscheinungen aufwies. Derselbe war in der Höhe des 2. Halswirbels abgetrennt und stammte von einem etwa 30jährigen Manne. Der Schädel zeigte keinerlei Difformitäten, die otoskopische Untersuchung ergab beiderseits normale Trommelfelle. Der Kopf, der in einer 4⁰/₁₀ Formollösung conservirt wurde, enthielt die äufseren Weichtheile unverletzt, auch war in der Schädelhöhle das Gehirn noch vorhanden.

Die Stimmgabel wurde in den rechten Gehörgang eingebohrt, so daß sie das Trommelfell im vorderen unteren Quadranten durchdrang und in das Promontorium eintrat. Sie blieb in dieser Position während der ganzen Dauer der Versuche; vor dem Einflusse des Formols wurde sie durch Umhüllung mit gefetteter Watte geschützt.

Selbstverständlich war die Weichtheildecke des Schädels nicht geeignet, als Ansatzpunkt des Mikrophonstiftes zu dienen, da sie viel zu nachgiebig war, als daß an ihr eine fixe Lage des Stiftes hätte erzielt werden können. Um jedoch nicht durch

die vollständige Entfernung von Haut und Muskulatur die Verhältnisse allzusehr zu verändern, wurden die Punkte in derselben Anordnung, wie sie an dem macerirten Schädel getroffen worden war, bezeichnet, und dann an diesen Stellen mit einem Locheisen von $\frac{1}{2}$ cm Durchmesser, wie es als Korkbohrer benützt wird, die Weichtheile durchtrennt und die dadurch abgegrenzte Gewebescheibe, die also Haut, Fascie, Muskel und Periost enthielt, abgetragen, so daß der nackte Knochen zu Tage lag. Durch das viel höhere Gewicht, das diesen Schädel vor dem früher gebrauchten skelettirten auszeichnete, war er auch in seiner Lage bedeutend leichter fixirbar. Die Lagerung war im Uebrigen die gleiche wie in der vorhergehenden Versuchsreihe.

Es wurden im Ganzen 14 Beobachtungsreihen mit wieder je 12 Einzelbeobachtungen aufgenommen. Die erhaltenen Zahlenwerthe ergeben sich aus der beiliegenden schematischen Tafel. Fig. 16, 17, 18, 19, 20. Dieselbe sagt uns Folgendes:

Die Zahlen sind, absolut genommen, geringer als die am macerirten Schädel, ein Ergebnifs, das uns nicht verwundern kann, weil die Dämpfung der Weichtheile einen immerhin bedeutenden Einfluß auf die Intensität des Schalles nehmen muß.

Was jedoch das Verhältniß der Punktwerte betrifft, so erblicken wir auch hier wiederum eine genügende Uebereinstimmung mit den Verhältnissen am macerirten Schädel. Auch hier zeigt sich, daß die Intensitäten in der Umgebung der Stimmgabel respective in der Umgebung des Gehörganges die bedeutendsten sind, und daß mit der Zunahme der Entfernung im Allgemeinen und die Intensität sich vermindert. Diese Erscheinung tritt dabei derart zu Tage, daß sich die Zahlen der einzelnen Punkte im Großen und Ganzen einander mehr nähern als am macerirten Schädel, ein Umstand, der vielleicht darauf zurückzuführen ist, daß eben durch den dämpfenden Einfluß der äusseren und inneren Weichtheile ein mehr gleichmäßiges Schwingen des Schädels bewirkt wird.

Insbesondere fällt auf der, der Stimmgabel gegenüber liegenden Seite der Umstand auf, daß die Abnahme der Hördauer von der 2. zur 3. Querreihe bei Weitem nicht so ausgesprochen ist wie in den vorigen Versuchsreihen; im Gegentheile finden wir, daß sogar in der obersten Querreihe stellenweise eine höhere Zahl vorkommt, wie in der mittleren.

Was aber auch hier als wichtigstes Ergebnifs festgestellt werden mufs, ist, dafs wir oberhalb der linken Spina supra meatum, also an der äusseren Projection der Pyramidenbasis eine Zahl gewinnen, die sowohl alle anderen Zahlen derselben Seite wie auch die meisten Zahlen der Stimmgabelseite übertrifft.

Wenn in diesem Falle im Gegensatze zu dem vorigen an der Spina supra meatum der freien Seite keine so hohe Zahl gewonnen wurde wie in der 2. Querreihe der Stimmgabelseite, so ist dies wohl dem Umstande zuzuschreiben, dafs hier die Freilegung dieser Spina technisch nicht leicht ausführbar war und erst ein Punkt, der etwas nach aussen und oben von ihr lag, zum Ansatz des Mikrophonstiftes verwendet werden konnte. Ich hätte wohl einen, den früher benützten homologen Punkt mit dem Mikrophonstift erreichen können, wenn ich die Ohrmuschel in einer entsprechenden Weise verkleinert oder ganz abgetragen hätte. Es ist anzunehmen, dafs dann auch der gefundene Zahlenwerth ein höherer gewesen wäre. Da ich aber die Verhältnisse des Schädels durch willkürliche Entfernung von gröfseren Weichtheilspartien nicht verändern wollte, so unterliefs ich dies, damit das Ergebnifs ein einwandfreies und eindeutiges sei.

Fasse ich nunmehr die Resultate meiner Untersuchungen am Schädel zusammen, so ergeben sich folgende Schlüsse:

1. Die Richtung, welche auf den Kopf übertragene Schallwellen in dem knöchernen Theile desselben einschlagen, ist wesentlich abhängig von der Vertheilung der Knochensubstanz in Bezug auf ihre Dichte.

2. Wenn daher von dem Gehörorgan der einen Seite Schallwellen ausgehen, so verbreiten sich dieselben wohl im ganzen Schädel, sie werden aber vorzugsweise nach den symmetrischen Punkten der anderen Schädelhälfte, also zur gegenüberliegenden Pyramide geleitet.

3. Es besteht demnach eine Schallübertragung von Ohr zu Ohr auf dem Wege der Knochenleitung. Diese wird durch den knöchernen Schädel allein vermittelt, ohne dafs die sogenannte Schalleitungskette hierbei eine wesentliche Rolle spielen müfste.

4. Diese Verhältnisse finden sich schon am macerirten Schädel, sie werden durch die Weich-

theile des frischen Schädels in ihrer Wesenheit nicht alterirt und bestehen voraussichtlich in gleicher Weise am lebenden Kopf.

Anschließend an diese Sätze, in denen ich die wichtigsten Ergebnisse meiner Experimente formulirt habe, möchte ich noch den Versuch machen, ihre Bedeutung für die Physiologie des Gehörorgans zu discutiren.

Vor Allem habe ich die Thatsache mit Sicherheit festgestellt, daß Schallwellen, die auf dem directesten Wege ein Gehörorgan treffen, auch das andere, und zwar in einer sehr ansehnlichen Intensität erreichen. Dabei waren die diesbezüglichen Versuche sicher einwandfrei, und die bei allen Experimenten nie ganz auszuschliessende Luftleitung konnte die Resultate hier nicht beeinflussen. Es ist mit der Constatirung dieser Thatsache allerdings noch nicht bewiesen, daß diese Art der Uebertragung auch beim physiologischen Höracte wirklich in Betracht kommt, insbesondere deshalb nicht, weil die Art, wie die Schallwellen das Gehörorgan erreichen — durch die eingeschraubte Stimmgabel — doch eine von der physiologischen Art der Schallzuleitung verschiedene ist. Allerdings hat MADER bewiesen, daß auch von den durch Luftleitung auf das Gehörorgan übertragenen Schallwellen ein ansehnlicher Theil in den Knochen übertritt, dieser Antheil ist nach ihm viel größer, als man gemeiniglich anzunehmen geneigt wäre. Demnach kann die Verschiedenheit zwischen natürlicher Schallzuleitung und der von mir gewählten höchstens einen quantitativen Unterschied begründen, und es wird sich noch feststellen lassen, welche Größe die Intensität des Schalles haben muß, um auf das zweite Ohr noch so stark wirken zu können, daß am Lebenden dadurch ein Gehöreindruck vermittelt wird.

Jedenfalls aber beweisen meine Versuche die physiologische Möglichkeit des binauralen Höractes bei monauraler Schallzuleitung. Da, wie wir sehen werden, das Bestehen des Letzteren auf Grund gewisser Ueberlegungen ein theoretisches Postulat ist, stimmt hier das theoretisch Formulirte und das experimentell Festgestellte überein.

Die Frage der Schwebungen ist es, welche das ganze eben erörterte Problem in sich schließt, und deren Entscheidung wegen der ungenügenden thatsächlichen Grundlage bis jetzt noch nicht vollständig geglückt ist. Ohne diese Frage hier aus-

führlich darstellen zu wollen, sei bloß darauf hingewiesen, daß eine Anzahl von Forschern (SCRIPTURE¹, WUNDT², EWALD³) das Zustandekommen diotischer Schwebungsempfindungen so erklären, daß die von 2 Gehörorganen dem Centralorgan zugeleiteten, in ihrer Qualität verschiedenen Nervenirregungen erst in diesem selbst als Empfindungen mit einander in Concurrenz traten, wonach also die Schwebungsempfindung ein Subjectives wäre, dem in der Aussenwelt kein Objectives entspräche. STUMPF⁴ und SCHAEFER⁵ haben gegen diese Ansicht schon seit längerer Zeit angekämpft und behauptet, daß die Knochenleitung allein zur Erklärung genüge, daß auf diesem Wege die Schallwellen, die dem einen Ohre zugeführt werden, ganz gut mit den auf das andere Ohr einwirkenden interferiren können, nachdem sie dieses auf dem Wege der Knochenleitung erreicht hätten. MADER⁶ versuchte bereits, diese Frage durch die mikrophonische Untersuchung zu lösen, gelangte jedoch nach seiner eigenen Erklärung nicht bis zu einem völlig beweiskräftigen Experiment.

Erst kürzlich hat SCHAEFER neuerdings einige Stimmgabelexperimente (am Lebenden) publicirt, aus denen er die Thatsache folgert, daß die Knochenleitung von Ohr zu Ohr normalerweise vorkommt. Er schlägt für diese den Terminus „natürliche Knochenleitung“ vor im Gegensatze zu der „künstlichen“, bei welcher der Stiel der Stimmgabel auf einen Punkt des Schädels aufgesetzt ist und von hier beiden Gehörorganen der Schall zugeführt wird. Allerdings glaubt er, daß diese „natürliche

¹ SCRIPTURE. Einige Beobachtungen über Schwebungen und Differenz-töne. *Wundt's Philosophische Studien* 7, 1892 und 8, 1893.

² WUNDT. Ist der Hörnerv direct durch Tonschwingungen erregbar? *Ibidem* 8, 1893.

³ EWALD. Die centrale Entstehung von Schwebungen zweier monotisch gehörter Töne. *Pflüger's Archiv* 57, 80.

⁴ STUMPF. Beobachtungen über subjective Töne und über Doppelt-hören. *Zeitschrift für Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane* 21, 100.

⁵ SCHAEFER. Beweise gegen WUNDT's Theorie von der Interferenz akustischer Erregungen im Centralorgan. *Pflüger's Archiv* 61.

Derselbe. Ist eine centrale Entstehung von Schwebungen möglich? *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnerorgane* 4, 1893.

Derselbe. *Ibidem* 2.

Derselbe. Ueber die intracranielle Fortpflanzung der Töne von Ohr zu Ohr. *Archiv für Ohrenheilkunde* 52, 1901.

⁶ MADER l. c. 28 u. ff.

Knochenleitung wesentlich durch die Anordnung des Mittelohrapparates bedingt werde, und er citirt FECHNER'S¹ gleichsinnige Aeußerung.

Wenn auch meine Versuche sich mit den Schwebungen selbst nicht befassen und die Anordnung so getroffen war, daß die Schallwellen nicht in der „natürlichen“ sondern in der „künstlichen“ Anordnung SCHAEFER'S auf den Schädel übertragen wurden, so ging doch andererseits aus ihnen hervor, daß Schallwellen, die einseitig einer Pyramide zugeleitet werden, ganz besonders gut der anderen Pyramide und viel schlechter den übrigen Theilen des Schädels zufließen, d. h., die gegenseitigen eigenthümlichen Beziehungen der Pyramiden spielen bei der „natürlichen“ wie bei der „künstlichen“ Anordnung die Hauptrolle. Die Erforschung dieser Beziehungen war ja die Aufgabe der letzten drei Versuchsreihen. Indem ich aber diese Erscheinungen bereits am knöchernen Schädel und ganz analog, ja noch mehr ausgesprochen am frischen Schädel vorfand, erbringe ich den Beweis, daß man nicht zu dem Mittelohrapparat Zuflucht zu nehmen braucht, um die Erscheinung zu erklären. Diese erklärt sich vielmehr ungezwungen aus der eigenthümlichen Anordnung der Knochensubstanz in der Umgebung beider Gehörorgane.

Hier ist es, wo meine ersten zwei Versuchsreihen zur Erklärung herangezogen werden müssen. Hatten diese ergeben, daß in einem Knochengewebe beliebiger Textur der Schall den festesten, resp. compactesten Theilen entlang sich fortzusetzen pflegt, so liegt die Nutzenanwendung dieses Satzes für die eben discutirte Frage der Schalleitung von Ohr zu Ohr auf der Hand. Der Umstand, daß gerade die Pyramiden es sind, welche die härtesten Knochenmassen aufweisen, die wir am Körper finden, zeigt, daß hier eine Vorrichtung geschaffen ist, welche die auf den Schädel irgendwie auftreffenden Schallwellen vor Allem zu den Gehörorganen leitet und diese selbst in eine zweckdienliche Verbindung unter einander setzt.

¹ FECHNER. Wissenschaftliche Briefe von FECHNER und PREYER. Hamburg und Leipzig 1890. S. 165.

(Eingegangen am 7. December 1901.)
