Zur physiologischen Akustik und deren Anwendung auf die Pathologie des Gehörorgans.

(Nach einem in der k. k. Gesellschaft der Aerzte am 1. April 1870 gehaltenen Vortrage.)

Von

Prof. Dr. Adam Politzer

in Wien.

Der wichtigste Angriffspunkt für die Fortpflanzung des Schalles zum Labyrinth ist das Trommelfell. Diese kleine Membran ist mit so ausserordentlichen Fähigkeiten für die Aufnahme und Fortleitung des Schalles ausgestattet, wie wir sie bei keiner physicalischen Membran beobachten.

Wenn wir nämlich eine physicalische Membran über einen Ring spannen, so wird dieselbe beim Anschlagen einen Ton geben, welcher nach dem Grade der Spannung verschieden sein wird und welchen man den Eigenton der Membran nennt. Eine solche Membran wird am stärksten in Schwingungen gerathen, wenn ein in ihrer Nähe angegebener Ton ihrem Eigentone entspricht; die Schwingungen werden noch lebhaft sein bei Tönen, welche in der Nähe des Eigentones der Membran liegen, sie werden aber um so geringer bei Tönen, welche in der Scala vom Eigentone der Membran sich entfernen.

Unser Trommelfell hingegen besitzt die Eigenschaft, Töne von der verschiedenartigsten Schwingungsdauer nicht nur nach einander, sondern auch gleichzeitig durchzulassen. Wir sind bei-

spielsweise in einer Opernvorstellung im Stande, die Töne der Violine, der Bassgeige und anderer Instrumente, den Gesang des Tenors, die gesprochenen Worte unseres Nachbarn und das Geräusch, das seine Bewegungen verursacht, zur selben Zeit gesondert von einander wahrzunehmen. Und wenn wir auch annehmen, dass die Sondernung der Töne in unserem Ohre wahrscheinlich im Labyrinth vor sich geht, so ist es doch feststehend, dass alle diese Töne das Trommelfell gleichzeitig passiren mussten.

Man hat die Ursache dieser eminenten Leistungsfähigkeit des Trommelfells theils in der eigenthümlichen Struktur der Membran, theils in den Spannungsverhältnissen derselben gesucht. Es wurde einerseits geltend gemacht, dass das Trommelfell vermöge der Anordnung seiner radiären und circulären Fasern an einzelnen Stellen eine verschiedene Dichtigkeit und Schwingbarkeit besitze, wodurch die gleichzeitige Erregung der Membran durch verschiedene Töne ermöglicht werde. Andererseits wurde die durch den Zug des Hammergriffs bedingte Spannungsverschiedenheit am vorderen und hinteren Abschnitte des Trommelfells als Ursache der vorzüglichen Schwingungsfähigkeit derselben betrachtet, indem man annahm, dass die vordere Hälfte vorzugsweise durch hohe, die hintere Partie der Membran durch tiefe Töne erregt werde.

Diesen Ansichten gegenüber gewinnt die von *Helmholtz* jüngst hin entwickelte Theorie eine wichtige Bedeutung für die Lösung dieser Frage. *Helmholtz* hat nämlich auf mathematischer und experimenteller Grundlage den Nachweis geliefert, dass die Resonanzfähigkeit gekrümmter Membranen ungleich grösser sei, als die flachgespannter Membranen. Er leitete die Töne einer gespannten Saite mittelst eines an derselben befestigten Stiftes auf eine über einen Glaseylinder concav gespannte Membran und fand, dass die Resonanz derselben sich über einen grossen Theil der Scala erstrecke und weit grösser sei, als die einer flach gespannten Membran.

Die von mir über diesen Gegenstand angestellten Versuche habe ich an einem Apparate ausgeführt, an welchem das Trommelfell (6 Cm.) und der Hammer ($5\frac{1}{2}$ Cm.) im vergrösserten Massstabe nachgebildet waren. Die die Trommelhöhle darstellende Metalltrommel (10 Cm. Durchmesser und 16 Cm. lang) war an ihrem hinteren durchbohrten Ende mit einem Auscultationsschlauche versehen, durch welchen der Untersuchende die Aenderung der auf die Membran geleiteten Töne wahrnehmen konnte. Es zeigte sich nun, dass Töne hoch- und tiefgestimmter Stimmgabeln, welche bei flachen Membranen

nur schwach gehört wurden, sofort stärker wahrnehmbar waren, wenn die Membran durch einen Zug am Hammer eine gewölbte Form erhielt.

Bekanntlich ist das nach innen gewölbte Trommelfell gleichzeitig vom Umbo gegen die Peripherie in entgegengesetzter Richtung nach aussen gewölbt. Auf diese Weise stellen die gespannten radiären Fasern der Membran nach aussen gewölbte Bogen dar, welche nach *Helmholtz* günstige Angriffspunkte für die auffallenden Schallwellen bilden.

Der von *Helmholtz* ausgesprochenen Ansicht, dass durch eine derartige Anordnung der radiären Fasern vorzüglich die starke Resonanzfähigkeit des Trommelfells bedingt werde, kann ich nur insofern beistimmen, als ich annehmen muss, dass die convexe Krümmung der Radiärfasern nur zum Theile der Grund der verstärkten Schwingfähigkeit der Membran sei. Durch Versuche an dem vorhin geschilderten Apparate wurde der Nachweis geliefert, dass es für die Verstärkung der Resonanz der Membran gleichgültig sei, ob sie gegen den auffallenden Schall convex oder concav gekrümmt ist. Ich bin der Ansicht, dass ein wichtiger Factor für die gleichzeitige und gleichmässige Aufnahme verschieden hoher Töne, die durch die Einwärtswölbung der Membran bedingte verschiedenartige Spannung der einzelnen, zwischen der Peripherie und dem Hammergriffe gelegenen Theile des Trommelfells sei. *)

Die schräge Stellung, welche die Ebene des Trommelfells zur Leitungslinie (Axe) des Gehörorgans einnimmt, ist nicht ohne Einfluss auf die Trommelfellschwingungen, indem bekanntlich Schallwellen, welche auf eine schiefe Ebene auffallen, zum Theile reflectirt werden, (*Fick*), daher nicht mit jener Kraft einwirken, als wenn sie auf eine senkrechte Ebene gelangen. Es gilt dies allerdings nur von einem Theile der Membran, nämlich von der hinteren oberen Partie, welche in einer Flucht mit der hinteren oberen Gehörgangswand liegt, während die vordere untere Hälfte des Trommelfells durch den Zug des Hammergriffs zur Gehörgangsaxe fast senkrecht gestellt erscheint. Es ist übrigens klar, dass der durch die schräge Stellung der

*) Nach Prof. *Stern* leiten die Körper Schallschwingungen unverändert um so besser, je weniger sie selbstständig tönend werden können. Saiten und Membranen tönen nur durch Vermittlung von transversalen Schwingungen; zu solchen sind sie aber nur fähig, wenn sie in einer Ebene, unfähig, wenn sie in krummen Linien oder Flächen gespannt sind, daher sie in letzterem Falle jeden Stimmgabelton verstärken, in ersterem nicht.

Membran sich ergebende Verlust an Intensität der Schalleinwirkung, durch die Schallreflexion von der Mulde an der vorderen untern Wand des knöchernen Gehörganges zum Theile ausgeglichen wird.

Die Gehörknöchelchen bilden einen Fühlhebelapparat, durch welchen die Schwingungen des Trommelfells auf das Labyrinth übertragen werden. Vor einer Reihe von Jahren (1861) wurde von mir der experimentelle Nachweis geliefert, dass durch die das Trommelfell treffenden Schallwellen die einzelnen Gehörknöchelchen als ganze Massen in ausgedehnten Amplituden schwingen. Es gelang mir, mittelst der graphischen Methode Vibrationen der Gehörknöchelchen darzustellen und verweise ich auf die in diesem Archiv (Band I) ausführlich geschilderten Versuche. Von grosser Wichtigkeit jedoch sowohl für die Physiologie als auch für die Pathologie des Gehörorgans erscheint uns die Erkenntniss der Schwingungsverhältnisse der einzelnen Gehörknöchelchen.

Das Verhältniss der Schwingungen des Hammers zu jenen des Amboses und des Steigbügels hängt wesentlich mit dem Mechanismus der Gelenke derselben zusammen. Ich habe bereits im Jahre 1862 (Wiener med. Wochenschrift No. 13 und 14) durch das Experiment gefunden, „dass man bei jedesmaliger Luftverdichtung in der Trommelhöhle eine bedeutende Excursion des Trommelfells mit dem Hammergriffe nach aussen gegen den Gehörgang und eine deutliche Verschiebung der Flächen des Hammer-Ambosgelenkes sieht, während die Excursionen des langen Fortsatzes des Amboses sehr gering sind.“ Hiedurch erscheint der von *Helmholtz* in der neuesten Zeit geschilderte Mechanismus des Hammer-Ambosgelenkes klar angedeutet. Er vergleicht dieses Gelenk mit einem mit Sperrzähnen versehenen Uhrschlüsselgelenke. Bei einer Excursion nach innen greift der Sperrzahn des Hammers genau in den des Amboskörpers, wobei der Ambos mitbewegt wird. Bei der Bewegung nach aussen hingegen hackt sich der Sperrzahn des Hammers aus dem Zahne des Amboskörpers aus, wobei vorzugsweise der Hammer, der Ambos aber nur in geringem Grade bewegt wird.

Das Verhältniss der Excursionsfähigkeit der einzelnen Gehörknöchelchen lässt sich nach der von mir angegebenen Methode dadurch ermitteln, dass man gleichlange Glasfäden an dem Hammer, Ambos und Steigbügel befestigt und durch Verdichtung und Verdünnung der Luft im äusseren Gehörgange das Trommelfell in Bewegung setzt. Es zeigt sich hiebei, dass der Glasfühlhebel des Hammers viel grössere Excursionen ausführt, als der des Amboses und dass die Excursionen des am Steigbügel befestigten Glasfadens am geringsten seien.

Durch diese Methode*) ist es mir auch gelungen, den Nachweis zu liefern, dass die Axen der Gehörknöchelchen keine fixen, sondern bewegliche seien, und habe ich mich dahin ausgesprochen, dass bei der Uebertragung der Schallwellen vom Trommelfelle zum Labyrinth die Vibrationen des Hammers grösser seien, als jene des Amboses und die Schwingungen dieses wieder grösser als jene des Steigbügels.

Diese Annahme wurde ein Jahr später durch *Schmiedeknecht***) bestätigt. In neuester Zeit hat sich Dr. *Buck* aus New-York einer anderen Methode bedient, um die Schwingungen der Gehörknöchelchen nachzuweisen. Diese Methode ist dem *Lissajous'schen* Principe entnommen, welches darauf beruht, die Schwingungen der Körper auf optischem Wege zu untersuchen. Es wurden von *Buck* Amylumkörner an den Gehörknöchelchen befestigt, und die Schwingungen der Gehörknöchelchen mittelst des mit einem Mikrometer versehenen Mikroskops untersucht. Das unter dem Mikroskope fixirte Amylumkörperchen, welches im Ruhestande als weisslicher Punkt erschien, zog sich während der Schwingung des Trommelfells und der Knöchelchen zu einer Linie aus, deren Länge an den einzelnen Gehörknöchelchen mit dem Mikrometer gemessen werden konnte. Durch diese Methode, welche den Vortheil hat, dass die Gehörknöchelchen beim Versuche nicht belastet werden, hat *Buck* den Nachweis geliefert, dass die Schwingungen des Hammers zweimal so gross seien, wie jene des Amboses, und viermal so gross wie jene des Steigbügels.

Es ergibt sich hieraus, dass die *Intensität* der Schallwellen auf dem Wege vom Trommelfelle zum Labyrinth abgeschwächt wird, und in diesem Sinne wäre die Ansicht von *Ludwig*, dass die Gehörknöchelchen neben ihrer Funktion als Schallleiter gleichzeitig als Beruhigungsorgane wirken, aufzufassen. In anderer Richtung zeigt das anatomische Verhältniss des Schallleitungsapparates, dass beim Durchgange durch die Kette der Gehörknöchelchen eine Condensation der Schallwellen stattfinden muss, indem dieselben von der grösseren Fläche des Trommelfells auf die kleinere Fläche des Steigbügels übertragen werden.

*) Wochenblatt der Gesellschaft der Aerzte Nr. 8. 1868.

**) Experimentelle Studien zur Physiologie des Gehörorgans, Inaugural-Dissertation. Kiel 1868,

Durch die oben geschilderte Konfiguration des Hammer-Ambosgelenkes wird das Gehörorgan gegen heftige, auf das Trommelfell einwirkende Erschütterungen geschützt. Bei starken Erschütterungen, welche das Trommelfell durch eine plötzliche Verdichtung der Luftsäule im Gehörorgane erleidet, wird zwar die Membran mit der ganzen Kette der Gehörknöchelchen rasch nach innen gedrängt, der heftige Stoss jedoch, der das Labyrinth treffen würde, wird durch die nach aussen gekehrte bogenförmige Krümmung der Radiärfasern paralysirt, indem sich der Bogen, welcher zwischen seinen beiden Endpunkten (Anulus tympanicus und Hammergriff) nach aussen gewölbt ist, durch die auf seine convexe Krümmung einwirkende Kraft sich bis zu seiner Sehne verkürzen kann, bevor der Hammer mit grösserer Gewalt gegen den Ambos getrieben wird.

Ebenso wird durch kräftiges Eindringen eines Luftstromes durch die Tuba Eustach. in die Trommelhöhle das Labyrinth gegen zu starke Druckschwankungen geschützt, indem, wie erwähnt, das Trommelfell mit dem Hammergriffe in grösserer Ausdehnung nach aussen zu bewegt wird, wobei Ambos und Steigbügel nur in geringem Grade dieser Bewegung folgen.

Die Widerstände, unter welchen die Gehörknöchelchen schwingen, werden theils durch die ihre Gelenke verbindenden Bänder, theils durch die von den Trommelhöhlenwandungen zu den Knöchelchen hinziehenden faserigen Ligamente und Schleimhautfalten erzeugt. Diese Widerstände sind für die gleichmässige Aufnahme und Fortleitung der Schallwellen von so mannigfacher Schwingungsdauer von der grössten Wichtigkeit. Sie verleihen zunächst der Kette der Gehörknöchelchen den genügenden Grad von Festigkeit, durch welche das nöthige Verhältniss zwischen Spannung des Trommelfells und jener der Gehörknöchelchen hergestellt wird.

Die Missverhältnisse, welche nun bei pathologischen Processen zwischen der Spannung des Trommelfells und jener der Gehörknöchelchen entstehen, müssen zur Beeinträchtigung der Schallfortpflanzung führen. Eine vermehrte Spannung des Trommelfells, wie sie nicht selten bei Verschluss der Tuba Eustachii durch Luftverdünnung in der Trommelhöhle entsteht, indem der äussere Luftdruck das Trommelfell einseitig belastet, wird auch eine straffere Ausspannung der Gehörknöchelchen nach sich ziehen. Die Folge davon ist eine überaus mässige Zunahme der Widerstände und eine Behinderung der Schallleitung zum Labyrinth. Es kommen fernerhin Fälle vor, wo das Trommelfell entweder durch langdauernde einseitige

Belastung oder durch Narbenbildung verdünnt und atrophisch wird und dadurch seine Elasticität und Spannung einbüsst. Auch hier wird das Missverhältniss zwischen Spannung der Membran und der Knöchelchen zur Funktionsstörung führen. Dasselbe gilt von jenen pathologischen Vorgängen im Mittelohre, wo die Spannung des Trommelfells nicht alterirt ist, wo aber an den Gelenken der Gehörknöchelchen oder an den Stellen, wo diese die Trommelhöhlenwände berühren, durch krankhafte Producte Widerstände erzeugt werden, welche der Fortleitung des Schalles ein Hemmniss entgegensetzen.

Das von *Buck* angewendete *Lissajous'sche* Princip habe ich zu einer Reihe von Versuchen benützt, deren Resultate für die Erklärung der Functionsstörungen, welche in Folge pathologischer Schalleitungshindernisse im Mittelohre beobachtet werden, von Wichtigkeit sind. Da, wie erwähnt, ein mit dem Mikroskope fixirter Punkt an den Gehörknöchelchen während der Schwingung derselben als Linie erscheint, so konnte man bei den Versuchen aus der Aenderung der Länge der Linie auf die Intensität der Schwingung schliessen. Diese Versuche wurden auf folgende Weise angestellt:

Um die Schwingungen der Gehörknöchelchen unter dem Mikroskope anschaulicher zu machen, als es durch die Amylumkörperchen geschieht, befestigte ich sehr kleine aus einem dünnen Glasfaden geschmolzene Kügelchen mittelst eines Stückchens einer Harzwachsmasse an den Gehörknöchelchen. Die Belastung war eine so geringe, dass dadurch die Schwingungen der Gehörknöchelchen kaum alterirt wurden. Durch eine seitlich vom Versuchsobjecte befindliche Kerzenflamme wurde im Glaskügelchen ein Lichtbildchen erzeugt, welches unter dem Mikroskope als leuchtender Punkt erschien, und während der Schwingung der Gehörknöchelchen in eine leuchtende Linie ausgezogen wurde.

1) Um die Stärke der Intensität der Schwingungen der Gehörknöchelchen bei Einwirkung hoher und tiefer Töne auf das Trommelfell zu prüfen, wurden die Töne eines Harmoniums vom Tonkasten durch einen Kautschuckschlauch in den Gehörgang des Präparates geleitet. Es ergab sich: bei gleicher Intensität der auf das Trommelfell einwirkenden Töne ist die Intensität der Schwingungen der Gehörknöchelchen bei tiefen Tönen geringer als bei den hohen Tönen,

welche über der Mittellage sich befinden; bei sehr hohen Tönen nimmt die Intensität wieder ab.

2) Von Wichtigkeit erschien mir die Untersuchung der Schwingungen der Gehörknöchelchen bei Einwirkung gesprochener Wörter auf das Trommelfell. Die Perception der menschlichen Sprache muss als eine der complicirtesten Functionen des Gehörorgans betrachtet werden; sie ist ungleich complicirter, als die Fortleitung und Perception musikalischer Töne. Während es sich nämlich bei Letzteren um periodische Schwingungen handelt, ist die Sprache aus einer so grossen Anzahl von Tönen und Geräuschen (nichtperiodischen Schwingungen) zusammengesetzt, dass jedes grössere Wort, wollte man dasselbe in seine einzelnen Partialschwingungen auflösen, deren eine bedeutende Anzahl liefern würde. Die Schwingungsart der Gehörknöchelchen ist daher bei der Fortleitung der Sprache eine viel complicirtere, als beim Durchgange von Tönen mit regelmässigen periodischen Schwingungen.

Behufs der Prüfung wurde der äussere Gehörgang des Präparates mit einem Hörrohre in Verbindung gebracht, in dessen Trichter einzelne Wörter oder ganze Sätze hineingesprochen wurden. Die Betrachtung des im Glaskügelchen erzeugten Lichtbildchens unter dem Mikroskope ergab, dass *die Gehörknöchelchen so viele Erschütterungen zeigen, als das Wort Sylben zählt. Die grösste Excursion der Erschütterung fällt mit dem Vocale der Sylbe zusammen.* Die durch die Consonanten bedingten Schwingungen der Gehörknöchelchen erscheinen im Verhältnisse zu jenen durch die Vocale hervorgerufenen Vibrationen äusserst gering.

Bekanntlich entwickeln sich im Verlaufe chronischer Mittelohr-affectionen Krankheitsproducte, welche das Trommelfell oder die Gehörknöchelchen belasten und das Hörvermögen in verschiedenem Grade beeinträchtigen. Da sich derartige Belastungen am Trommelfelle und an den Gehörknöchelchen auch künstlich anbringen lassen, so war hiedurch die Möglichkeit gegeben, mittelst der genannten Untersuchungsmethode die Veränderungen zu studiren, welche die Schwingungen des Trommelfells und der Gehörknöchelchen durch Krankheitsproducte erleiden.

Werden nun einzelne Theile *des Trommelfells* mit einem Wackskügelchen oder Stäbchen belastet, so nimmt die Intensität der Schwingungen der Gehörknöchelchen, jedoch nicht bedeutend, ab; wenn man aber dieselbe Belastung am Hammer oder an einem anderen Gehörknöchelchen anbringt, somit ein ähnliches Schalleitungs-Hinderniss schafft, wie die durch Erkrankungen des Mittelohres entstandenen

Exsudate und Adhäsionen, so wird die Schwingungsexcursion *bedeutend* herabgesetzt.

Lässt man während einer solchen Belastung der Gehörknöchelchen tiefe und hohe Töne auf das Trommelfell einwirken, so wird man eine im Verhältniss stärkere Schwingung bei hohen als bei tiefen Tönen beobachten. Ebenso werden die Erschütterungen beim Hineinsprechen von Wörtern auffallend geringer sein, als bei Einwirkung musikalischer Töne.

Diese Resultate stimmen mit den an Kranken beobachteten Hörstörungen überein. Veränderungen am Trommelfelle, wie Narben, Verkalkungen, Perforationen werden das Hörvermögen weniger beeinträchtigen, als pathologische Producte (Adhäsionen, Ankylosen) an den Gehörknöchelchen, welche die Schwingbarkeit desselben herabsetzen. Es zeigt sich auch, dass in solchen Fällen zumeist hohe Töne besser gehört werden als tiefe, und dass das Sprachverständniss mehr afficirt wird, als das Hören musikalischer Töne.

3) Bei künstlicher Zerstörung der Membran werden die Schwingungen des Hammers geringer; wenn man aber ein künstliches Trommelfell einführt und die Cautschoukplatte desselben mit dem Hammergriffe in Berührung bringt, so werden die Schwingungen wieder grösser.

Dieses Resultat bestätigt die von mir schon vor mehreren Jahren ausgesprochene Ansicht,*) dass das künstliche Trommelfell *Toynbee's* nicht nur durch Druck (Erhard v. Tröltzsch), sondern auch als schwingende Platte die Hörverbesserung bewirke. Es heisst dort S. 5: „Wir werden jedoch in der Folge die Wirkungsweise des *Toynbee's*chen künstlichen Trommelfells auch in einer andern Richtung kennen lernen, nämlich als schwingende Platte, welche vermöge ihrer Flächenausdehnung eine erhebliche Menge von Vibrationen auf eines der Gehörknöchelchen zu übertragen vermag, und auf diese Weise eine Hörverbesserung bedingt. Man kann sich sehr gut von der leichten Schwingbarkeit eines aus gutem Material gearbeiteten künstlichen Trommelfells dadurch überzeugen, wenn man an irgend einer Stelle des künstlichen Trommelfells das Fäserchen einer Gansfederfahne mit Wachs befestigt und nun das kleine Instrument in die Nähe einer angeblasenen Orgelpfeife bringt; sofort wird das Fäserchen in sichtbare Schwingungen gerathen.

*) Ueber das künstliche Trommelfell und seine Modifikationen, 1864. Separat-
abdruck der „Wiener Medicinal-Halle“.

Diese Schwingungen werden natürlich nicht jenen des natürlichen Trommelfells gleichkommen, und sie werden fernerhin im Ohre nicht jene Intensität haben, wie ausserhalb des Ohres, da nach dem Einführen des künstlichen Trommelfells die scheibenförmige Platte, desselben durch Berührung mit Gehörknöchelchen, Promontorium Eiter, einen grossen Theil seiner Schwingbarkeit in dem Grade einbüsst, dass diese in vielen Fällen bei der Hörverbesserung nicht in Betracht gezogen werden kann.

4) Die von *Helmholtz* beobachteten Klirrtöne des Ohres bei starken Erschütterungen rühren nicht, wie *Helmholtz* angibt, von dem Aneinanderschlagen der Sperrzähne des Hammer-Ambossgelenkes, sondern von dem Schwirren der Membranen und der Bänder der Gehörknöchelchen her, da diese Klirrtöne am Gehörorgan der Leiche erzeugt werden können, wenn auch das Hammer-Ambossgelenk künstlich ankylosirt wird.