

BASILARMEMBRANENS SVINGNINGER OG HELMHOLTZ' RESONANSTEORI

AF

ALFR. LEHMANN

S kønt HELMHOLTZ' Resonansteori er i Stand til at forklare de fleste af vor Toneopfattelses Ejendommeligheder, har den alligevel ikke vunden almindelig Anerkendelse. Dels forudsætter Teorien nemlig visse ikke helt sandsynlige Antagelser, og dels gives der enkelte Kendsgerninger, som den ikke kan forklare. For at afhjælpe disse Mangler er der opstillet forskellige andre Teorier, som enten kun er Modifikationer af Resonansteorien, eller ogsaa fuldstændig opgiver Resonansprincippet og søger at forklare Hørenervens Paavirkning ad anden Vej. Alle disse Teorier har det tilfælles, at de nok kan forklare enkelte Kendsgerninger, særlig de subjektive Kombinationers Opstaaen, men intet Hensyn tager til de fleste andre Fænomener; paa enkelte Punkter kommer de vel endog ligefrem i Strid med Kendsgerningerne. Efter at det er lykkedes SCHAEFER at paavise, at Kombinationstoner kan frembringes af Telefonmembraner og derfor efter al Sandsynlighed ogsaa af Trommehinden¹, er en væsenlig Indvending mod Resonansteorien dermed gendrevet, og alle de Teorier, som nærmest tog Sigte paa at forklare Kombinationstonernes Opstaaen er dermed blevne overflødige. Sagens Stilling i Øjeblikket er sikkert træffende karakteriseret ved følgende Udtalelse af HENSEN: „Ich wünsche recht sehr eine dahin gehende

¹ Ueber die Erzeugung physikalischer Kombinationstöne mittels des Stentortelephons. Ann. d. Physik. 4 Folge, Bd. 17, 1905.

Gemeinschaft der Ansichten der Physiologen, dass wir die alte, zwar mit einigen Lücken behaftete, aber doch als recht nützlich bewährte Wohnung (Resonansteorien) nicht niederreißen lassen, ehe die Physiologie das nötige Kapital zum Neubau besitzt¹.

I det følgende skal der blive gjort et Forsøg paa at udfylde nogle af disse Huller ved en experimental Undersøgelse over elastiske Membraners Svingninger og derved at forhale den gamle prøvede Bygnings Nedrivning.

De fleste af de mod Resonansteorien rejste Indvendinger angaar dens hypotetiske Forudsætninger.

1. HELMHOLTZ antog, at Basilarmembranens forskellige Traade var afstemte hver paa sin bestemte Tone og derfor kun kunde sættes i Bevægelse ved Lydbølger af tilsvarende Svingetal. Ved en matematisk Deduktion paaviste han, at et saadant System af Traade eller Strengte vilde forholde sig, som om de enkelte Strengte laa næsten isolerede, saa at enhver af dem for sig kunde sættes i Svingninger som en spændt Streng. Men det er rigtignok, saavidt mig bekendt, aldrig experimentalt undersøgt, om de enkelte Dele af en spændt baandformet Membran virkelig kan sættes i Svingninger, uden at de øvrige Dele svinger med.

2. Et normalt Øres Toneomfang er omtrent 12 Oktaver. Basilarmembranens Bredde maatte derfor ved Sneglens Spids være $2^{12} = 4096$ Gange saa stor som ved Indgangen, hvis de enkelte Strengtes Afstemning udelukkende skulde bero paa deres Længde. Faktisk er imidlertid Membranens største Bredde kun omtrent 12 Gange saa stor som den mindste, og følgelig maa der mellem de længste og de korteste Strengte tillige antages meget betydelige Forskelle i Tykkelse og Spænding. Det er i hvert Fald ikke paavist, om saadanne Forskelle virkelig findes.

¹ Die Fortschritte in einigen Teilen der Physiologie des Gehörs. Ergebnisse d. Physiologie, 1 Jahrgang. II Abteil. 1902. S. 892.

3. Som MAX MEYER¹ og TER KULE² har fremhævet, sættes Basilarmembranen i Svingninger paa den Maade, at den usammentrykkelige Perilymfe i Forgaarden og Sneglen forskydes opad Forgaardstrappen, idet det ovale Vindu hvælver sig indad. Ved denne Forskydning underkastes Hudsneglen et Tryk og bøjer sig, hvorved Bevægelsen forplanter sig til Perilymfen i Pauketrappen og tilsidst til det runde Vindu. Idet nu begge Vinduer svinger tilbage, bevæger Perilymfen og dermed ogsaa Basilarmembranen sig i modsat Retning af den tidligere. Membranens Svingninger er altsaa ligefrem en Følge af Vædskenes Forskydning. Men det er næppe tænkeligt, at den Mængde Vædske, der forskydes ved det ovale Vindus Bevægelser, skulde kunne skaffe sig Plads derved, at nogle enkelte af Basilarmembranens Strengs svinger. Efter al Sandsynlighed maa altid større Dele af Membranen svinge samtidig, hvilket netop direkte strider mod Resonansteorien.

Til disse Indvendinger, der vedrører Teoriens Antagelser, kommer som sagt endnu den Omstændighed, at der gives forskellige Kendsgerninger, som Teorien ikke kan forklare. EWALD har anført en hel Række saadanne Indvendinger³, men jeg skal ikke gaa nærmere ind paa dem her, da de synes mig gendrevne dels ved de ovennævnte Undersøgelser af SCHAEFER, dels ved KRÜGERS Modkritik⁴. Imidlertid findes der endnu to betydningsfulde Fænomener, som Akustikerne hidtil ganske har ladet ude af Betragtning, og som vil være meget vanskelige at forklare efter den HELMHOLTZ'ske Resonansteori.

1. Der forekommer Individier, som tiltrods for en iøvrigt normal Hørelse ganske mangler Evnen til Klanganalyse. Disse Personer kan have en meget skarp Hørelse, deres Toneomfang

¹ Introduction to the mechanics of the inner ear. Missouri, 1907. S. 9.

² Die Uebertragung der Energie von der Grundmembran auf die Haarzellen. Pflügers Archiv, Bd. 79, 1900. S. 504.

³ Zur Physiologie des Labyrinths. VI Mittel. Pflügers Archiv, Bd. 76, 1899. S. 151.

⁴ Zur Theorie der Kombinationstöne. Wundts Phil. Stud. Bd. 17, 1901. S. 288.

kan være saa stort, som det overhovedet findes hos noget Menneske, og deres Skelneevne for Tonehøjder kan være næsten ligesaa fin som et musikalsk Øres, naar Tonerne kommer efter hinanden. Men saasnart Tonerne lyder samtidig, smelter de fuldstændig sammen, saafremt deres Højdeforskel da ikke er flere Oktaver. Om denne Sammensmeltning virkelig har til Følge, at der opstaar en Mellemtone, lader sig naturligvis ikke med Sikkerhed afgøre, da de paagældende Individuer er ude af Stand til at analysere deres Tonefornemmelser. Men Resultanten af de to samtidige Toner afviger som oftest saa meget fra enhver af de enkelte Toner, at det ingenlunde er usandsynligt, at selv Duodecimer og endnu større Intervaller smelter sammen til en enkelt Mellemtone. Det er derfor let forstaaeligt, at saadanne Individuer ikke kan opfatte nogen Forskel mellem konsonante og dissonante Intervaller; de hører jo nemlig ikke de to konsonerende eller dissonerende Toner, men kun den deraf resulterende Mellemtone. Følgelig er de ogsaa ganske umusikalske.

I Litteraturen er denne Ejendommelighed kun sjældent omtalt. STUMPF giver en indgaaende Beskrivelse af to Tilfælde¹. BUCH omtaler et udpræget og et mindre sikkert Tilfælde². Personer af denne Art betegnes sædvanlig som yderst umusikalske, men det karakteristiske for disse Tilfælde er aabenbart slet ikke, at Sansen for Musik mangler, hvilket kan skyldes mange forskellige Aarsager. Det tilgrundliggende er utvivlsomt den Anomali, at Evnen til Klanganalyse mangler. Deraf følger ligefrem, at Forskellen mellem Konsonans og Dissonans ikke kan opfattes, og hermed forsvinder øjensynlig en ret væsenlig Forskel mellem Musik og Støj. Jeg foretrækker

¹ Tonpsychologie, Bd. 2, Leipzig 1890. S. 362.

² Om Fornemmers Sammensmeltning, Kbh. 1898. S. 117. Ueber die Verschmelzung von Empfindungen, besonders bei Klangeindrücken. Wundts Phil. Stud. Bd. 15, 1900. S. 237. Forsøgsresultaterne viser, at Hr. E. H. maa regnes til de afgjort umusikalske, skønt han betegnede sig selv som ikke helt umusikalsk.

derfor at kalde de Personer, hos hvem denne Anomali findes, for de tonanormale. Iøvrigt maa det bemærkes, at der findes alle mulige Mellemløber mellem de tonanormale og de normal-musikalske. STUMPF beskriver enkelte saadanne Former¹, og af BUCH's Undersøgelser fremgaar ligeledes, at Mangel paa Evne til at analysere kan gøre sig mer eller mindre stærkt gældende.

Det ses nu let, at den HELMHOLTZ'ske Resonansteori ikke er i Stand til at forklare Tonanomalien og dens Overgangstrin til den normale Toneopfattelse. Teorien gaar nemlig hovedsagelig ud paa at forklare Hørelsens væsentligste Ejendommelighed, Evnen til at analysere sammensatte Lydpaavirkninger, og naar netop denne Evne mangler, medens Hørelsen iøvrigt er normal, saa er Teorien aabenbart ilde stedt. Naar Skelneevnen for successive Toner er normal, saa maa de paagældende Resonatorer være tilstede i Basilarmembranen og fungere normalt; men saa er det ganske uforstaaeligt, hvorfor de enkelte Toner ikke kan høres ud af Sammenklangen.

2. Resonansteorien er ligeledes ude af Stand til at forklare Tonernes rumlige Udstrækning. Medens høje Toner er spidse eller skarpe, synes at indtage et meget lille Rum, saa har de dybe Toner en stor Udstrækning, idet de ligesom omgiver os paa alle Sider. At denne Forskel i Udstrækning er noget, der umiddelbart fornemmes, indrømmes nu af mange Psykologer²; det er iøvrigt meget let at overbevise sig om, at den ikke beror paa Associationer. Meget hyppigt finder man endog musikalske Personer, som aldrig har bemærket de høje og de dybe Toners forskellige Udstrækning; de ved slet ikke, hvad det drejer sig om, naar der tales om Sagen. Lader man dem nu høre en høj og en dyb Tone og henleder deres Opmærk-

¹ Anf. Sted S. 365 o. f.

² STUMPF: Tonpsychologie, Bd. 1, Leipzig 1883. S. 207. JAMES: Textbook of Psychology, London 1892. S. 385. EBBINGHAUS: Grundzüge der Psychologie, Bd. 1, Leipzig 1902. S. 277.

somhed paa, hvorledes den første kommer til Øret som en fin Straale, medens den sidste skyller rundt om hele Legemet, saa træder Forskellen strax frem for dem som noget næsten vidunderligt. Om en pludselig Associationsdannelse kan der ikke ret vel være Tale, naar man gaar saaledes tilværks; Tonefornemmelsernes Udstrækning er utvivlsomt en umiddelbar Iagttagelse, som Opmærksomheden blot skal henledes paa.

Paa andre Sansseomraader, hvor Fornemmelsernes Udstrækning spiller en større Rolle, finder vi imidlertid, at denne Udstrækning i hvert enkelt Tilfælde er bestemt ved Størrelsen af den Flade, der paavirkes i vedkommende Sansseorgan. En Farvefornemmelses Udstrækning voxer uafhængig af Paavirkningens Art og Styrke med det Nethindeareal, som paavirkes. Indenfor bestemte Grænser gælder, som jeg har fundet, ganske det samme for Hudens Trykfornemmelser. Holdes Trykket pr. Kvadratmillimeter konstant, saa bliver ogsaa Fornemmelsens Styrke konstant, og kun Fornemmelsens Udstrækning voxer med Arealet af den paavirkede Flade. Ifølge disse Erfaringer skulde man egentlig vente, at de dybere Toners større Udstrækning hidrørte fra, at et større Antal Nervetraade paavirkedes. Resonansteorien støtter dog ikke en saadan Opfattelse, da intetsomhelst taler for, at Antallet af de paavirkede Nervetraade skulde voxe med Basilarmembranens Bredde. Den Kendsgerning, at Tonefornemmelsernes Udstrækning voxer med aftagende Tonehøjde, staar saaledes foreløbig som et ganske uforklarligt Fænomen.

Begynde vi nu med det første af de ovennævnte Problemer, saa ved vi altsaa endnu slet ikke, om en baandformet Membran, der er spændt paatværs men slap paalangs, virkelig kan udføre den Art Svingninger, som Resonansteorien kræver. Resultatet af EWALD'S Undersøgelser paa dette Punkt er ikke

afgørende¹. EWALD befæstede meget tynde Gummimembraner slapt paa en Træramme og fik dem til at svinge ved at berøre dem med den ene Gren af en anslaaet Stemmegaffel. De paa denne Maade frembragte staaende Bølger kunde ganske vist ikke gøres synlige ved Hjælp af Sand el. lign., fordi Pulveret blev slynget bort fra Membranen; men ved at indgnide Membranen med Olie, kunde han gøre den glinsende, og i reflekteret Lys traadte Bølgerne saa frem som mørke Striber, adskilte ved de parallelle lyse Knudelinier. Knudelinierne indbyrdes Afstand var omvendt proportional med Stemmegafflernes Svingetal. Til ethvert givet Svingetal svarede saaledes en ganske bestemt Klangfigur („Schallbild“), og EWALD antog derfor, at ogsaa Basilarmembranen vilde danne et saadant System af staaende Bølger, naar den blev sat i Svingninger af en enkel Lydbølge; derved kunde saa atter Hørenerven paavirkes.

De af EWALD fundne Kendsgerninger kan, som det let ses, næppe anføres mod Resonansteorien. Basilarmembranen er ikke slap men spændt stramt paatværs, og desuden har den ikke overalt samme Bredde; det er derfor meget muligt, at der under disse Forhold kan opstaa andre Svingningsformer end i en slap Membran. Hertil kommer yderligere, at EWALD's tilsyneladende regelmæssige Klangfigurer i Virkeligheden slet ikke forekommer; de er ligefrem optiske Bedrag. Opstiller man nemlig en omtrent 15 cm lang og 4 cm bred, tynd Gummimembran, der er befæstet til en Træramme, saaledes, at man ved at se i Længderetningen ser hele Overfladen glinsende, saa bemærker man let de paatværs gaaende parallelle Knudelinier, naar Membranens ene Ende berøres med en anslaaet Stemmegaffel. Men stilles Membranen nu saaledes op, at man ved at se paatværs af den ser hele Overfladen glinsende, saa viser der sig mere spredte, uregelmæssige Klangfigurer, naar Stemmegafflen sættes til paa samme Sted som før, medens

¹ Pflügers Archiv Bd. 76, 1899. S. 147 og Bd. 93, 1903. S. 485.

man aldeles ikke ser noget til de tidligere parallelle Knude-linier. Faktisk opstaar der altsaa meget komplicerede Klang-figurer af lignende Art som de, der kan frembringes med Sand paa spændte Membraner; men af disse Klangfigurer ser man, alt efter Retningen af det reflekterede Lys, kun visse Dele ved EWALD's Fremgangsmaade. De enkle, regelmæssige Bølge-systemer, som man iagttager ved at se paalangs af Membranerne, er derfor som sagt kun optiske Bedrag, men rigtignok af en saadan Art, at ogsaa et Fotografapparat bliver skuffet.

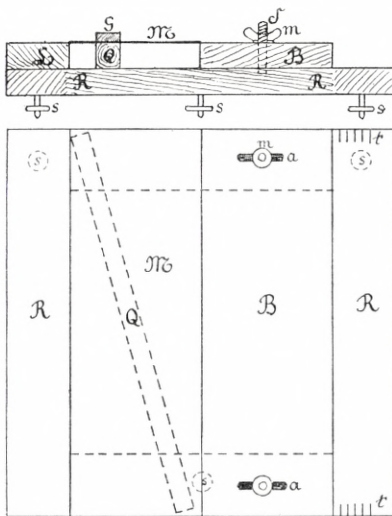


Fig. 1.

Efterat jeg havde overbevist mig om, at EWALD's Metode ikke giver noget paalideligt Billede af Membranernes Svingninger, lavede jeg mig et nemt lille Apparat for at kunne underkaste disse Svingninger en systematisk Undersøgelse. I Fig. 1 er Apparatet vist baade set ovenfra og fra Siden. *R* er en kvadratisk Træramme, 30 cm i Firkant, som ved Stilleskruerne *s* kan stilles vandret; Rammens

Lister er omtrent 5 cm brede og 2 cm tykke. Den ligesaa brede og tykke Liste *L* er fastskruet til denne Ramme, medens den 10 cm brede Liste *B* er forsynet med 2 parallelle Udsnit *aa*, hvorigennem de til Rammen *R* befæstede Skruer *S* er førte. Ved Hjælp af Møttrikerne *mm* kan Listen *B* fastklemmes i forskellige Afstande fra *L*. En tynd blød Gummimembran er fastlimet paa den ene Side til *L* og paa den anden Side til *B*. Naar den ikke er spændt, har den overalt samme frie Bredde, 10 cm; i Længderetningen er den ligeledes uspændt. For at faa en Membran, der kunde holdes uspændt

uden at slaa Folder, har jeg maattet anvende en meget tykkere Gummiprade end den, der bruges ved de EWALD'ske Forsøg. Membranens Tykkelse har naturligvis i Principet intet at sige, kun har jeg til mine Forsøg maattet benytte ret kraftige Stemmegafler med Grene paa 14 mm Bredde, fordi Stemmegafler med ringere Masse ikke kunde sætte den relativt stive Membran i Svingninger.

Den baandformede, 30 cm lange Membran er ikke befæstet ved Enderne, hvorved man opnaar, at Spænding i Længderetningen lettere undgaas. For Membranens Svingninger er denne Ordning uden Betydning. Ligesom staaende Bølger kan danne sig saavel i en aaben som i en lukket Orgelpibe, saaledes kan de ogsaa opstaa i en Membran uden Hensyn til, om dens Ender er frie eller fastgjorte til noget. Membranens Spænding paatværs kan forøges paa den Maade, at den bevægelige Liste B trækkes tilhøjre og igen fastklemmes i en ny Stilling. For at man kan være sikker paa, at Spændingen bliver ens over det hele, er der paa Rammen, ved tt , anbragt Maalestocke; hvis begge Ender af Listen B forskydes samme Antal Millimeter, maa Membranen overalt faa samme Spænding. I det følgende angiver jeg ligefrem Membranens Spænding ved det Antal Millimeter, som den er trukket ud i Bredden.

Uafhængig af Spændingen kan Membranens Bredde varieres paa den Maade, at en Træliste Q , af samme Tykkelse som Listerne L og B , stikkes ind under Membranen, og imod denne Liste trykkes Membranen saa af en tung Messingstang G . Stilles Q parallelt med L og B (se Fig. 1 foroven), saa er Membranen altsaa delt i to Baand af vilkaarlig men konstant Bredde. Hvis Q derimod danner en spids Vinkel med L og B (Fig. 1 forneden), saa har den fri Membran altsaa ikke samme Bredde i de forskellige Tværnit. Paa denne Maade kan man give Membranen en Form, der nærmer sig til Basilarmembranens.

Hvis Membranen holdes ganske slap, lykkes det næppe at faa tydelige Knudelinier frem; Sandet kastes bort fra Membranen. Men blot en ringe Spænding paa 2,5 mm, hvorved altsaa den 100 mm brede Membran bliver 2,5 mm bredere, er tilstrækkelig til at give den den fornødne Elasticitet. Under disse Forhold viser Membranen imidlertid, ligesom en Telefonmembran, ingen fremtrædende Egensvingninger; Stemmegafler med meget forskellige Svingetal kan sætte den i Svingninger uden Hensyn til dens Bredde. Men de fremkomne, mer eller mindre regelmæssige Klangfigurer vexler med Bredden. Fig. 2 *A & B* viser Klangfigurerne paa en 80 mm og en 44 mm bred Membran (Spænding 2,5 mm), naar disse sættes i Svingninger af $a^1 = 435$; saavel disse som de følgende Figurer er gengivne i halv naturlig Størrelse. Disse Figurer stemmer ganske med EWALD's Angivelser. Medens der paa en smal Membran, Fig. 2 *B*, kun optræder ét System af nogenlunde regelmæssige Knudelinier, saa kommer der paa en bred Membran flere Systemer, der er forskudt imod hinanden. Gennemgaaende staa de enkelte Systemer af Knudelinier vinkelret paa Membranens Længderetning, men de er rigtignok ikke indbyrdes adskilte, saaledes som de viser sig ved EWALD's Metode; derimod danner de sammenhængende uregelmæssige Bølgelinier, der skiller de enkelte svingende Dele fra hinanden. Det er ikke videre sandsynligt, at en enkel Tonebølges regelmæssige Bevægelse overføres til Hørenerven gennem saa komplicerede Svingninger.

Spændes Membranen nu stærkere, f. Ex. 10 mm, og gaar man systematisk tilværks, idet dens Bredde Skridt for Skridt forøges, saa finder man følgende. Er Bredden meget ringe, danner der sig overhovedet ingen Knudelinier, skønt Membranen synlig sættes i Svingninger. Idet Stemmegaflen sættes til, kastes Sandet enten lige op, saa at det atter falder ned omtrent paa samme Sted, eller ogsaa kastes det ud til Siden. Naar Bredden har naaet en ganske bestemt Størrelse, som er

afhængig af Membranens Spænding og Stemmegafflens Svingetal, saa optræder der pludselig et regelmæssigt System af parallelle Knudelinier (se Fig. 2 C, der ved 10 mm Spænding blev frembragt af $a^1 = 435$). Gøres Membranens Bredde blot faa

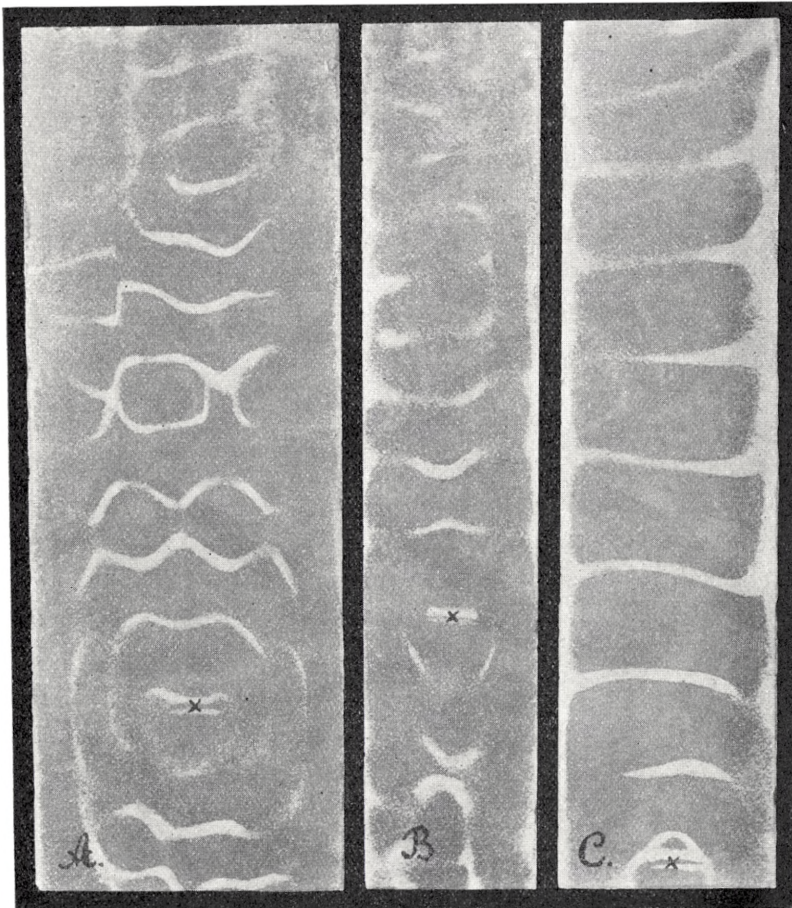


Fig. 2.

Millimeter større, begynder Knudelinierne allerede at bugte sig, for saa ved endnu større Bredde at antage Former som Fig. 2 A. Hvor Stemmegafflen rører Membranen er i Almindelighed uden Betydning; i hver Figur er Stedet mærket med et Kryds.

Den Omstændighed, at de retlinede parallelle Knudelinier kun opstaar ved en ganske bestemt Bredde af Membranen, viser tydeligt, at den spændte Membrans Egensvingninger her har samme Svingetal som Stemmegafflen. Enhver af de Dele, der er begrænset af to Knudelinier, kan da betragtes som en Streng, hvis Længde er lig Membranens Bredde og svarer til den halve Bølgebredde af en Svingning. Paa den anden Side maa Afstanden mellem to Knudelinier ogsaa svare til en halv Bølgebredde. At denne Afstand er mindre end Membranens Bredde, kan kun hidrøre fra, at Spændingen paatværs er betydelig større end Spændingen paalangs. Naar man ikke behøver at tage Stivheden med i Betragtning, gælder for en Strengs Svingninger følgende Formel:

$$n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{g \cdot P}{q}}.$$

Her betyder n Svingetallet, l Strengens Længde, P den spændende Vægt, g Tyngdens Akceleration og q Vægten af en Længdeenhed af Strengen. Af Formlen ses det, at l , for en given Værdi af n , maa voxe med voxende Værdier af P . Betragter man altsaa den mellem to Knudelinier liggende Del af Membranen som en Streng, hvis Længde er lig Membranens Bredde, saa er Spændingen P forholdsvis stor, Vægten af Længdeenheden q forholdsvis lille, og følgelig maa l for en konstant Værdi af n blive forholdsvis stor. Betragter man omvendt Afstanden mellem to Knudelinier som Strengens Længde, saa er P , Spændingen i Længderetningen, lille, q derimod forholdsvis stor, og for samme Værdi af n maa l da blive lille.

Hvis disse Betragtninger er rigtige, saa maa den Bredde af Membranen, ved hvilken de retlinede Knudelinier optræder, voxe med voxende Spænding P for en given Værdi af n . Samtidig maa iøvrigt ogsaa Knudelinierne indbyrdes Afstand voxe. Naar Membranen nemlig spændes paatværs, saa trækker den sig sammen efter Længden, hvilket dog kun tildels er

muligt, fordi de lange Sider er fastgjorte til Rammen. Herved bliver den altsaa i Virkeligheden ogsaa spændt paalangs. Da nu den Længde af en Streng, der svarer til et givet Svingetal, voxer med Spændingen, saa maa Knudelinierne indbyrdes Afstand altsaa voxe med Spændingen paatværs. At det virkelig forholder sig saaledes, fremgaar af en Række Maalinger, som jeg har anstillet ved forskellige Spændinger, idet konstant den samme Stemmegaffel, $a^1 = 435$, blev anvendt. Resultaterne ses af nedenstaaende Tab. 1:

Tab. 1.

<i>S</i>	7,5	10	12,5	15
<i>B</i>	51	56	62	67
<i>E</i>	23	27	31	35

I Rækken *S* er angivet Membranens Spænding i det tidligere omtalte Maal, i Rækken *B* den Bredde, ved hvilken de retlinede Knudelinier optraadte, og i Rækken *E* disses indbyrdes Afstand. Saavel Værdierne *E* som *B* voxer med voxende Størrelse af *S*.

Der kan herefter ikke være Tvivl om, hvorledes Svingetallet vil vise sig afhængigt af Membranens Bredde. Ifølge den anførte Formel maa nemlig Længden *l*, for konstant *P*, blive desto mindre, jo større *n* skal være. Membranen maa altsaa gøres desto smallere, jo større man ønsker dens Egen-svingningers Svingetal. Men da nu den indbyrdes Afstand mellem Knudelinierne, paa Grund af den ringere Spænding i Længderetningen, altid maa være mindre end Membranens Bredde, saa aftager altsaa ogsaa denne Afstand *E* med voxende Svingetal. Betragter man imidlertid, ligesom tidligere, enhver mellem to Knudelinier liggende Del af Membranen som en Streng, hvis Bredde er lig Knudelinierne Afstand *E*, saa maa med *E* ogsaa Længdeenhedens Vægt *q* aftage. Men naar *q* aftager sammen med *l*, saa voxer *n* aabenbart ikke i omvendt Forhold til *l*, men meget stærkere. Hertil bidrager

nu yderligere den Omstændighed, at Membranens Stivhed gør sig desto mere gældende, jo ringere dens Bredde er. Men er Stivheden saa stor, at den ikke kan lades ude af Betragtning, saa gælder Formlen for de fuldstændig elastiske Streges Svingninger ikke; man faar da altid større Svingetal end dem, der beregnes af Formlen¹. Alle disse Momenter virker altsaa i samme Retning, hvoraf følger: naar Bredden af en paatværs spændt Membran formindskes i et bestemt Forhold, saa voxer dens Egensvingningers Svingetal i et meget stærkere Forhold.

Gyldigheden af denne Sætning godtgøres ved Fig. 3. Spændingen var konstant 10 mm. De fire Klangfigurer svarer til Svingetallene 256, 512, 1024 og 2048. Udmaales Bredden af Membranen B og den indbyrdes Afstand E mellem Knude-linierne, faar man følgende Resultater:

Tab. 2.

n	256	512	1024	2048
B	90	50	30	25
E	46	24	13	8

Af Tab. 2 ses, at man for at fordoble Svingetallet ingenlunde behøver at formindskes Bredden til det halve; den 90 mm brede Membran skal kun nedsættes til $\frac{5}{9}$, den 30 mm brede Membran kun til $\frac{5}{6}$ af den oprindelige Bredde. Samtlige højere Toner til c^8 vilde efter al Sandsynlighed kun kræve en Reduktion af Bredden til 15 mm. Paa den anden Side vilde rigtignok enhver af de dybere Oktaver paa det nærmeste kræve en Fordobling af Bredden, saa at denne maatte være 720 mm, for at Membranen skulde faa Svingetallet 32. Denne forholdsvis betydelige Bredde, der endnu er 50 Gange saa stor som den formodede mindste Bredde, lod sig imidlertid let reducere ved de forskellige Midler, som anvendes i Strengeinstrumenter. Det er derfor ingenlunde umuligt, at Basilar-

¹ WÜLLNER: Lehrbuch der Physik, Bd. 1, Leipzig 1882. S. 638.

membranen kan have et Toneomfang af henved 12 Oktaver, tiltrods for de forskellige Tværsnits relativt ringe Breddeforskel.

Af det foregaaende kan nu let udledes, hvorledes en spændt Membran vil forholde sig, naar dens lange Sider danner en

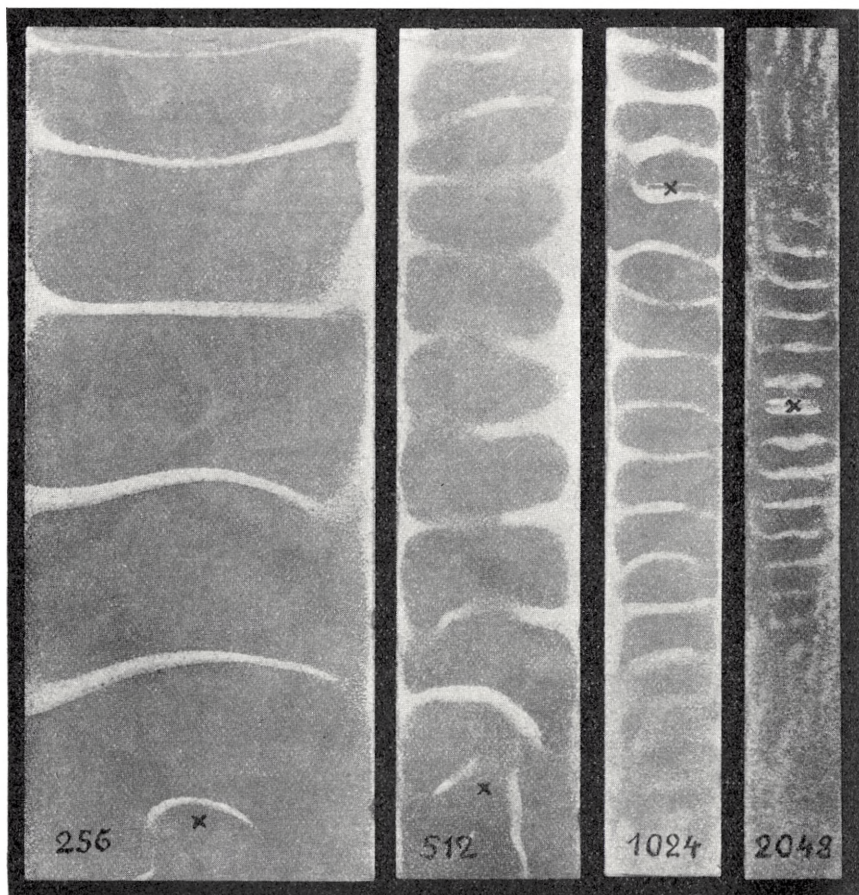


Fig. 3.

spids Vinkel med hinanden. Alt andet lige vil i saa Fald ethvert Tværnit have sit særlige, kun af Bredden afhængige Svingetal, og en Stemmegaffel vil følgelig kun kunne frembringe regelmæssige Svingninger, naar den berører Membranen

i det Tværsnit, der har samme Svingetal som den selv. Forsøgene bekræfter dette. Regelmæssige retlinede Knudelinier danner sig kun, hvor Membranens Bredde svarer til Stemmegafflens Svingetal; ved Membranens smallere Ende kommer der overhovedet ingen Knudelinier, og ved den bredere Ende opstaar der bølgeformede Linier, som tildels gaar i Membranens Længderetning. Lad os nu antage, at Basilarmembranen blev sat i ganske tilsvarende Svingninger af en enkel Tonebølge, som trængte ind i Øret. Det vilde da næppe kunne undgaas, at ogsaa de uregelmæssige Svingninger af Membranens bredere Del paavirkede Hørenerven, og Tonen maatte følgelig blive ledsaget af forskellige Lyde, hvortil der ikke svarede nogen objektiv Aarsag. Da vi nu faktisk ikke kender noget til saadanne Bifornemmelser af subjektiv Oprindelse, saa kan de omtalte Svingninger aabenbart ikke fremkomme i Øret, hvilket rimeligvis hidrører fra, at Basilarmembranen er stærkt dæmpet, dels ved de Corti'ske Buer, som hviler paa den, og dels ved den omgivende Vædske. En saadan Dæmpning kan man tildels frembringe derved, at man strør et tykt Lag Sand paa Gummimembranen. I Virkeligheden bliver dens Bevægelse derved saa stærkt dæmpet, at kun et Par ganske regelmæssige Svingninger kommer i Stand, medens hele den øvrige Del af Membranen bliver i Ro.

Disse Forhold belyses af Fig. 4, *A—C*. Fig. 4 *A* blev frembragt paa den Maade, at Stemmegafflerne $c^1 = 256$ og $a^1 = 435$ samtidig blev sat paa Membranen paa de Steder, hvis Bredde svarede til de nævnte Svingetal. Hver enkelt Stemmegaffel frembringer, som det ses, kun et Par Knudelinier hver paa sit Sted, saa at Svingningerne ikke forstyrrer hinanden. Strør man et tykt Lag Sand paa Membranen, saa bliver Dæmpningen saa stærk, at Stemmegafflerne kan anbringes successivt paa Membranen; saaledes er Fig. 4 *C* kommen i Stand. De to Bølgesystemer er her adskilte ved et neutralt Omraade, hvor Sandet overhovedet ikke sættes i Bevægelse. Endelig er

Fig. 4 B kommen i Stand ved, at Stemmegafflerne. $c^1 = 512$, $c^2 = 1024$ og $c^3 = 2048$ ligeledes successivt blev sat paa Membranen. Hvis Membransvingningerne forplantede sig fra

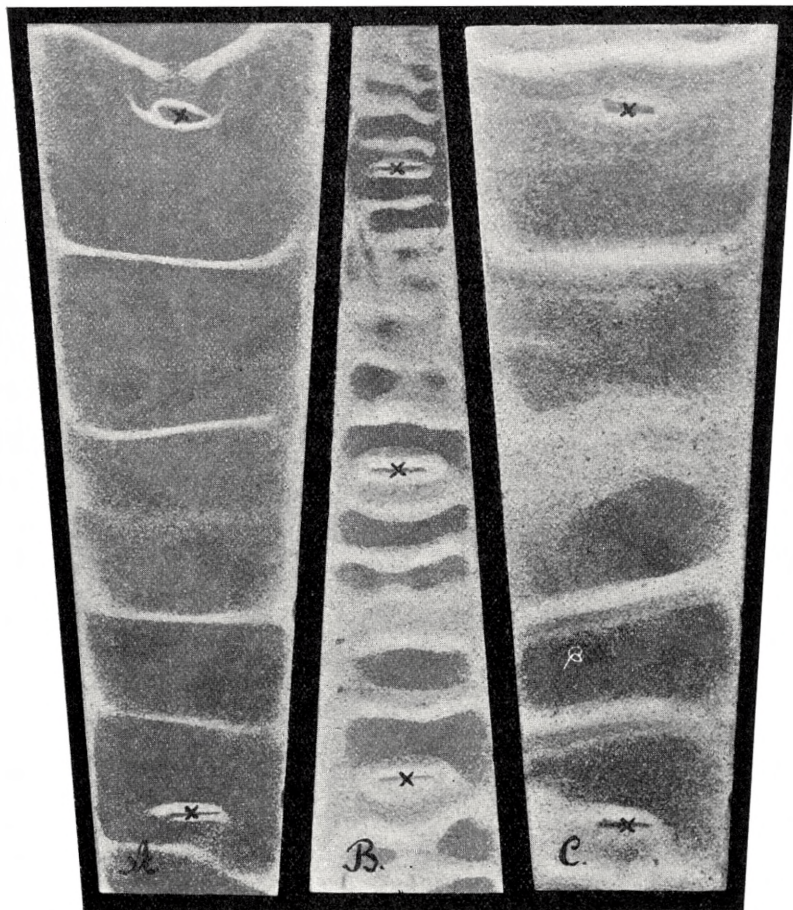


Fig. 4.

Stemmegafflens Angrebspunkt ud over hele Membranen, saa er det indlysende, at de Knudelinier, som den første Stemmegaffel frembragte, maatte blive forstyrrede af de følgende. Men dette er, som Figurerne viser, aldeles ikke Tilfældet.

Hver Stemmegaffel frembringer kun nogle faa Knudelinier paa det Sted, hvor Membranen har samme Svingetal, og disse Omraader griber ikke ind i hinanden.

Saa vidt jeg kan skønne, kan der ikke rejses væsenlige Indvendinger imod den Antagelse, at Basilarmembranen svinger paa samme Maade som de her undersøgte, ensidigt spændte Gummimembraner. Den betydelige Forskel i Størrelse kan ikke komme i Betragtning. EWALD har nemlig paavist, at selv meget smaa, slappe Gummimembraner (0,55 mm brede og 8,5 mm lange), der er omgivne af Vand, kan sættes i Svingninger af middelhøje Toner. Der kan følgelig næppe være Tvivl om, at saadanne smaa Membraner, hvis de kunde spændes, vilde vise Egensvingninger, der ligesom vore store Membraners var afhængige af Bredden, Spændingen og Stivheden. Basilarmembranens særlige Bygning kan i denne Henseende næppe gøre nogen Forskel. De paatværs gaaende Traade er meget faste, deres indbyrdes Forbindelse derimod er meget løs, og en Spænding i Længderetningen maa følgelig være umulig. Membranens Bygning synes saaledes nærmest at have til Følge, at Forskellen paa Spændingen i de to Retninger bliver saa stor som muligt, men dette kan i hvert Fald ikke ophæve Gyldigheden af de Love, der er paaviste for de ensidig spændte Membraner.

Hvis vi nu antager, at Basilarmembranen forholder sig ligesom de i det foregaaende undersøgte Membraner, saa falder dermed de tre ovennævnte Indvendinger mod HELMHOLTZ' Resonansteori bort. For det første er det nemlig experimentalt paavist, at der i en saadan Membran kan fremkomme Svingninger, der i hvert Fald nærmer sig stærkt til dem, som HELMHOLTZ antog. For det andet har vi set, at de tre Momenter, Membranens Brede, Spænding og Stivhed, næsten er tilstrækkelige til at give en Membran det normale Øres

Toneomfang; kun de Dele, der er afstemte for de dybeste Toner, maa vel tillige have en noget større Tykkelse end de øvrige. For det tredje er de Svingninger, som Membranen faktisk kan udføre, netop af en saadan Art, at de giver Plads for en vis Mængde Vædske, idet ikke blot enkelte Traade, men større Dele af Membranen svinger samtidig.

Fremdeles lader sig det uden Vanskelighed forklare, hvorledes Basilarmembranen kan komme i saadanne Svingninger. Naar Perilymfen i Forgaardstrappen sættes i frem- og tilbagegaaende Bevægelse ved det ovale Vindus Svingninger og saaledes afvejlende udøver et positivt og et negativt Tryk paa Basilarmembranen, saa vil først de Dele, der er nærmest ved Indgangen til Forgaarden, bøje sig under dette Tryk. Men hvis nu Perilymfens Bevægelse ikke stemmer med de paagældende Membrandeles Egensvingninger, saa maa Vædsken blive forskudt længere op ad Forgaardstrappen, naar de hurtigere svingende Membrandele svinger tilbage. Naar tilsidst de Dele af Membranen, som er afstemte paa den paagældende Tone, er komne i Svingninger, saa vil altsaa disse Membrandele, de to Vinduer og Vædskesøjlerne i Forgaards- og Pauke-trappen udføre samtidige Svingninger, hvorved alle Svingninger med andre Svingetal maa blive dæmpede. Jo dybere Tonen er, desto nærmere ved Sneglens Spids ligger de Dele af Membranen, der er afstemte paa denne Tone, og desto længere maa det følgelig vare, inden disse Dele kommer i Svingninger. Dette stemmer med BODE's Undersøgelser. Han fandt nemlig, at de dybe Toner ved samme subjektive Intensitet kræver en længere Tid end de høje Toner for at fremkalde en Tonefornemmelse, der er fuldstændig fri for ledsagende Bilyde, Støj¹.

Den lille Modifikation af Resonansteorien, som her er

¹ Die Zeitschwellen für Stimmgabeltöne. Wundts Psychol. Stud. Bd. 2, 1907. S. 315. Lignende Resultater fandt EXNER & POLLAK, Zeitschr. für Psychol. Bd. 32, 1903. S. 327.

fremstillet, er vel tilsyneladende ret uvæsenlig¹, ikke desto mindre kan man derved forklare adskillige Fænomener, som den HELMHOLTZ'ske Teori ikke kan magte. Den ovenfor omtalte Tonanomali f. Ex. er let forstaaelig ud fra den modificerede Resonansteori. Vi har nemlig set, at en slap Membran ikke har udprægede Egensvingninger; der kræves en vis Spænding, for at Membranens enkelte Dele skal blive afstemte paa bestemte Toner. Forskellen mellem det normal-musikalske og det tonanormale Øre lader sig derfor forklare ved den Antagelse, at Basilarmembranen i det sidstnævnte er forholdsvis slap. Følgen deraf maa blive, at en enkel Tonebølge ikke sætter en lille Del, men større Partier af Membranen i Svingninger. Opfattelsen af successive Toner kan ikke paavirkes videre heraf; kun maa Skelneevnen for Tonehøjder blive noget nedsat, hvilket faktisk ogsaa er Tilfældet. Hvis Tonerne derimod klinger samtidigt, saa vil de Svingninger, som endog meget forskellige Toner kan fremkalde i Membranen, gribe ind i hinanden, hvorved der opstaar Mellemtoner, saa at Analysen bliver umulig. Men kan virkelig endog Duodecimer smelte sammen til Mellemtoner — hvilket rimeligvis er Tilfældet i mit Øre — saa eksisterer der heller ingen Forskel paa Konsonans og Dissonans i sædvanlig musikalsk Forstand, fordi man ikke hører Intervallerne, men kun de resulterende Mellemtoner. Teorien kan saaledes forklare alle Tonanomaliens Ejendommeligheder.

Tonefornemmelsernes forskellige Udstrækning er ligeledes let forstaaelig. Som vi har set, voxer den indbyrdes Afstand mellem Knudelinierne paa en svingende Membran med aftagende Tonehøjde. Jo dybere Tonen er, desto længere bliver

¹ I én Henseende er Forskellen mellem de to Teorier dog ret væsenlig, idet den modificerede Resonansteori ikke kan fastholde Læren om de enkelte Nervetraades specifikke Energi. Naar enhver Del af Membranen snart kan svinge hurtigere, snart langsommere, og der i hvert enkelt Tilfælde opstaar en Fornemmelse, der er bestemt ved Svingetallet, saa kan de enkelte Nervetraade ingen specifik Energi have.

altsaa den Del af Basilarmembranen, der svinger med, og dermed voxer ligeledes Antallet af de paavirkede Nervetraade. Ganske vist véd man ikke, om Nervetraadene er fordelt jævnt over hele Membranens Længde, men derpaa kan det heller ikke komme an. Selv om Nervetraadene forekom sparsommere ved Sneglens Spids end ved Indgangen, saa kunde de dybe Toner alligevel paavirke et større Antal Nervetraade end de høje, fordi de sætter meget større Dele af Membranen i Svingninger. Som ovenfor omtalt, er Fornemmelsernes Udstrækning paa andre Sanssomraader rimeligvis ligefrem bestemt ved Antallet af de paavirkede Nervetraade. Gaar vi altsaa ud fra den højst sandsynlige Antagelse, at det ogsaa forholder sig saaledes paa Tonernes Omraade, saa bliver de dybe Toners større rumlige Udstrækning en ligefrem psykisk Følge af, at de paavirker flere Nervetraade end de høje Toner.

Der findes endnu en Del andre Kendsgeneringer, der ligesaa let og konsekvent lader sig forklare ved den her fremstillede Modifikation af Resonansteorien, medens denne i sin oprindelige Form i hvert Fald har Hjælpehypoteser nødvendig. Det vilde dog føre for vidt, her at gaa ind paa disse Enkeltheder. Jeg skal behandle de forskellige Konsekvenser af Teorien mere indgaaende i den samlede Fremstilling af Psykofysiologien, som det forhaabentlig lykkes mig at tilendebringe i Løbet af nogle Aar.