

Toepassen van Fysica Zinvol bij het Horen

Een Nieuw Gehoorparadigma

Willem Chr. Heerens

en

J. Alexander de Ru

Toepassen van Fysica Zinvol bij het Horen

Deze versie is een vertaling van het Engelse boekje dat de titel draagt:

Applying Physics Makes Auditory Sense

ISBN 978-90-816095-1-7

Gedrukt door:

Digital Printing Partners
www.dpp-utrecht.nl

Colofon

Corresponderend auteur:

Willem Chr. Heerens
Dr. Ir.
Fysicus
Dr. H. Colijnlaan 352
2283 ZA Rijswijk
Nederland

E-mailadres:

heerens1@planet.nl

Co-auteur:

J. Alexander de Ru
Dr.
KNO-arts
Centraal Militair Hospitaal
Afdeling KNO
Lundlaan 1
3584 EZ Utrecht
Nederland

© 2010 Heerens en De Ru

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze publicatie mag worden gekopieerd, opgeslagen worden in een automatisch gegevensbestand of verzonden worden in welke vorm of door welk middel, elektronisch, mechanisch, fotokopie, opname of anderszins, zonder voorafgaande toestemming van de auteurs.

Wij, de auteurs, willen hierbij de gelegenheid te baat nemen om onze diepgevoelde dank uit te spreken jegens de vrouwen die ons hebben aangemoedigd om onze inspiratie te volgen, onze echtgenotes

Elly Heerens en Manou de Ru

samen met onze beide families, hebben zij ons hun onvoorwaardelijke steun en aanhoudende geduld betoond gedurende de vele jaren die het gekost heeft om uiteindelijk ons werk gepubliceerd te krijgen.

Niet het einde, maar eerder een begin!

Nietzsche's Ode aan de Fysica

--- Und dazu müssen wir die besten Lerner und Entdecker alles Gesetzlichen und Notwendigen in der Welt werden: wir müssen *Physiker* sein, um, in jenem Sinne, *Schöpfer* sein zu können, — während bisher alle Wertschätzungen und Ideale auf *Unkenntnisse* der Physik oder im *Widerspruch* mit ihr aufgebaut waren. Und darum: Hoch die Physik! Und höher noch das, was uns zu ihr *zwingt*, — unsre Redlichkeit! ---

Friedrich Wilhelm Nietzsche

1882 'Die fröhliche Wissenschaft' Buch IV 'Sanctus Januarius'

--- En daartoe moeten wij de beste leerlingen en ontdekkers worden van al wat wettelijk en noodzakelijk is in de wereld: wij moeten *fysici* zijn, teneinde, in die zin *scheppers* te kunnen zijn, — terwijl tot op heden alle waardeoordelen en idealen gebaseerd waren op *onbekendheid* met de fysica of in *tegenspraak* met haar. En daarom, hoog leve de fysica! En leve nog hoger datgene, wat ons tot haar *verplicht*, — onze oprechtheid!---

Vertaling Willem Chr. Heerens 2010

Proloog

Daniël Bernoulli (1700 – 1782) was in zijn tijd reeds algemeen bekend als fysicus, wiskundige en medicus. Onder zijn vele wetenschappelijke resultaten is verreweg het meest belangrijke een fysisch fenomeen, dat wij tegenwoordig benoemen als:

“De Wet van Bernoulli”.

Bernoulli merkte op dat in de formule die volgens de ‘Wet tot Behoud van Energie’ – een uiterst belangrijke basiswet van de fysica waarin beschreven wordt dat de totale energie, zijnde de som van kinetische en potentiële energie, in een mechanisch systeem altijd constant blijft – de energie-inhoud beschrijft van een gesloten systeem in het geval van een bewegende vloeistof, een extra term nodig is welke gerelateerd is aan de inwendige druk in die vloeistof.

Vervolgens realiseerde hij zich dat de kinetische energie per volume E_{kin}/V in een vloeistof, welke op homogene wijze stroomt door een buis met snelheid v , zal toenemen met een hoeveelheid $\frac{1}{2}\rho v^2$, indien de snelheid verandert van nul tot v , terwijl gelijktijdig de inwendige vloeistofdruk zal afnemen met een hoeveelheid $-\Delta p$. Hierbij staat de factor ρ voor de vloeistofdichtheid oftewel massa per volume. Natuurlijk zijn er beperkingen – met name de vloeistof moet onsamendrukbaar zijn, niet viskeus en de stroming moet niet turbulent zijn. Maar zolang aan deze voorwaarden in redelijke mate voldaan wordt, biedt de wet van Bernoulli in hoge mate precieze experimentele resultaten.

Bernoulli heeft beschreven dat dit principe ook gebruikt zou kunnen worden voor het meten van de bloedstroming in aderen. We weten echter niet zeker of Bernoulli dit zelf uitprobeerde op zijn eigen patiënten. Vast staat wel dat in die tijd overal in Europa medici begonnen met het gebruik van holle naalden, die zij in de aderen van hun patiënten staken om de bloedstroming te meten, vermoedelijk gebaseerd op hun kennis van het Bernoulli effect. Dus mogen wij concluderen dat het in brede kring bekend was dat men veranderingen kan bepalen in de stroming van een vloeistof, die door een nauwe buis stroomt, door meting van de verandering in de druk op de wand.

Naast zijn indrukwekkende mathematische werk heeft Bernoulli ons ook een indrukwekkende diepgaande studie van trillingen in snaren van muziekinstrumenten nagelaten.

Pas honderd jaar later was Hermann von Helmholtz (1821 – 1894), een andere bekende medicus en fysicus, in staat tot het bestuderen van zowel het briljante werk van anatomist Alfonso Corti (1822 – 1876) betreffende de anatomie van het binnenoor als het schitterende mathematische werk betreffende periodieke functies en samengestelde trillingsfenomenen van Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830).

De kennis die Von Helmholtz op die manier verkreeg, inspireerde hem tot de eerste serieuze poging om het functioneren van het gehoororgaan van zoogdieren te beschrijven en te verklaren – daarmee leverde hij het eerste in brede kring geaccepteerde gehoorparadigma aan de wetenschappelijke wereld.

In de loop van de tijd is dit paradigma vervangen door nieuwe concepten, zoals het lopende golf paradigma van Nobelprijswinnaar Georg von Békésy (1899 – 1972). Von Békésy's paradigma – hoewel aanzienlijk gewijzigd en aangepast – houdt nog altijd redelijk stand.

Ik ben ervan overtuigd dat de geschiedenis herschreven zou zijn, indien Bernoulli – een veelzijdig genie – toegang had gehad tot het werk van deze collega-wetenschappers, zoals ik dat nu heb. Gedetailleerde kennis van de anatomie van het binnenoor inclusief kennis van de stroming van perilymfvloeistof in de buisvormige scalae in het slakkenhuis, het begrip voor de mathematische eigenschappen van periodieke functies inclusief trillingen, samen met de kennis die Bernoulli zelf verkregen had door zijn eigen ontdekkingen, zouden ongetwijfeld Bernoulli hebben geïnspireerd tot het formuleren van een compleet andere uitleg van het functioneren van het gehoorzintuig van zoogdieren.

Bernoulli's conclusies zouden hem hoogstwaarschijnlijk zelfs hebben geïnspireerd tot het formuleren van weer een ander gehoorparadigma. Onontkoombaar zou dit nieuwe concept het nu bestaande model van het gehoorzintuig, dat gebaseerd is op Von Békésy's model, hebben gewijzigd.

De Seebeck-Ohm-Helmholtz controversie – het nog steeds gaande debat over hoe wij toonhoogte horen en hoe die werkelijk gevormd wordt uit de bijdragende frequenties in een tooncomplex – zou hoogstwaarschijnlijk niet eens hebben plaatsgevonden.

De verschillende stromingen in de uitleg van dit perceptiefenomeen zouden zelfs niet ontstaan zijn. Noch het fenomeen van de ontbrekende grondtoon – een geluid dat niettegenstaande door ons gehoord wordt – noch de hypothese van de lopende golf die zich voortplant over het basilair membraan – volgens Georg von Békésy – zouden hun huidige uitleg hebben verkregen.

*En ironisch gesproken, ons initiatief tot dit boekje zou
net zo min noodzakelijk zijn geweest.*

Bernoulli zou zich waarschijnlijk door al deze fysische en mathematische onderwerpen te combineren hebben gerealiseerd dat het hydrodynamische effect, dat naar hem vernoemd is, ook een cruciale rol speelt in het inwendige van het slakkenhuis en hij zou tenslotte tot de volgende conclusie zijn gekomen:

In het slakkenhuis wordt het inkomende geluidssignaal getransformeerd naar het geluidsenergie signaal. Het is dit signaal dat in het basilair membraan de mechanische trillingen en in het

*orgaan van Corti de overeenkomende elektrische stimuli opwekt,
die frequentieselectief naar de hersenen gezonden worden.*

Helaas had Bernoulli deze kennis niet tot zijn beschikking en daarom kon hij die exercitie niet volbrengen. Maar nu, meer dan 150 jaar later dan de poging van Von Helmholtz, hebben wij deze exercitie wel succesvol uitgevoerd en een complete revisie van de werking van het gehoorzintuig geformuleerd.

Wij brengen daarbij in van mijn kant vele jaren ervaring als allround academisch fysicus en mathematicus, en van mijn co-auteur J. Alexander de Ru, de expertise van de medicus gespecialiseerd in KNO-wetenschappen. Beiden zijn wij zondermeer in staat om de experimentele gegevens van anderen opnieuw te interpreteren en van daaruit wat men noemt ‘outside of the box’ te denken.

Concluderend kunnen wij stellen dat onze ontdekking en model solide gebaseerd zijn op de herinterpretatie van experimentele gegevens van Wever en Lawrence; hetgeen functioneel gelijk staat aan de mathematische stelling dat ons gehoororgaan

de inkomende geluidsstimulus differentieert en kwadrateert.

Gebaseerd op onze inzichten, verkregen uit de literatuur, zijn wij gekomen op nog twee basisprincipes die eveneens hoekstenen vormen van ons model. Namelijk het feit dat de aanpassingen van het trommelvlies en de gehoorbeentekten de basis vormen voor het extreem grote dynamische bereik van ons gehoor en het feit dat het beengeleiding fenomeen in werkelijkheid het gevolg is van de heen- en weergaande beweging van de perilymfefloeistof in plaats van de veronderstelde vervorming van de omringende botstructuur.

*Deze drie uitgangspunten vormen de basis van
dit nieuwe gehoorparadigma.*

Ondanks de vele jaren waarin wij tevergeefs geprobeerd hebben om publicatie te realiseren, daarbij gedwarsboemd door onverklaarbare bezwaren gedurende het review proces – overigens een bekend fenomeen beschreven door Thomas Kuhn dat optreedt tijdens een wetenschappelijke revolutie die uiteindelijk tot een paradigma-wisseling leidt – voelen mijn co-auteur en ik ons beiden als professionele wetenschappers verplicht om onze vakgebieden vooruit te helpen.

Wij zijn er daarom van overtuigd geraakt dat wij u van al deze inzichten in kennis dienen te stellen door middel van dit boekje.

Willem Christiaan Heerens

november 2010

Inhoud

Nietzsche's Ode aan de Fysica	4
Proloog	5
1. Inleiding	10
1.1 Bezwaren tegen de hypothese van de lopende golf	10
1.2 Bezwaren tegen de hypothese van de cochleaire versterker	12
1.3 Bezwaren tegen de bestaande hypothese van signaaloverdracht via beengeleiding	13
1.4 Bezwaren tegen de bestaande beschrijving van het hydrodynamisch gedrag in het binnenoor	13
1.5 Hieruit concluderend	15
2. De nieuwe gehoorhypothese	16
2.1 De functies van het middenoor	16
2.2 Relatie tussen geluidsstimulus en elektrische output in het slakkenhuis	17
2.3 Beengeleiding	19
2.4 Het hydrodynamische gedrag in het slakkenhuis	21
2.4.1 Von Békésy's lopende golf versus het Bernoulli effect	21
2.4.2 Overdracht van geluidssignalen in het slakkenhuis en het Bernoulli effect	25
3. Methoden en experimenten voor verificatie	29
3.1 Stimulering van het slakkenhuis met samengestelde frequentiecomplexen	29
3.2 Toonhoogteperceptie in incomplete harmonische geluidscaplexen	29
3.3 Residu toonhoogteperceptie in onharmonische toonreeksen	31
3.4 Toevoeging van harmonischen en hun invloed op zwevingfenomenen	32
3.5 Verandering van de zwevingfrequentie door toevoeging van een laagfrequente stimulus	33
3.6 Schouten's verklaring voor de slagtoon van klokken moet opnieuw in revisie	33
3.7 Is toonhoogteverschuiving in een onharmonisch tooncomplex met equidistante frequenties een illusie?	34
3.8 Infrageluid kan 'gehoord' worden volgens het kwadrateerprincipe	36

4.	De rol van DC signalen in het orgaan van Corti en de cochleaire versterker	38
5.	Het orgaan van Corti als een in hoge mate selectieve frequentieanalysator	40
6.	Resonantieverschijnselen in het basilair membraan	42
7.	Resonantiephenomenen van het basilair membraan in plaats van lopende golven	45
8.	Conclusies	48
9.	Dankbetuigingen	50
	Epiloog	51
	Referenties	52
	Appendices	55
A I.	Zelf berekenen van de te verifiëren residutoonhoogte en zwevingfenomenen	55
A I.1	Inleiding	55
A I.2	Hoe het softwareprogramma te gebruiken na de installatie	55
A I.3	Wat wordt er berekend met het programma	57
A I.4	De verschillende experimenten	58
A II.	De residutoonhoogte en zwevingfenomenen die in de praktijk te horen zijn	66
A II.1	Inleiding	66
A II.2	De verschillende experimenten	67

1. Inleiding

1.1 Bezwaren tegen de hypothese van de lopende golf

De bestaande modellen van het slakkenhuis zijn gebaseerd op de hypothese van Von Békésy [1] dat een lopende golf zich voortbeweegt over het basilair membraan in het slakkenhuis. In de beschrijving van de werking hiervan wekken drukvariaties voor het trommelvlies – overgebracht door de gehoorbeenketen naar de stijgbeugel – drukgolven op in het slakkenhuis, die het basilair membraan in een lopende golfbeweging brengen, die vanuit de basis, dichtbij het gebied van ovale en ronde venster, lopen naar de top of helicotrema. Ook wordt doorgaans aangenomen dat dit lopende golfmechanisme een maximale uitwijking op een specifieke plek op het basilair membraan genereert en daarna in de richting van het helicotrema snel uitsterft. Deze uitwijking wekt vervolgens een elektrisch signaal op in het orgaan van Corti, dat wordt overgebracht naar de auditieve cortex via de gehoorzenuw.

Echter een lopende golf die trillingsenergie meedraagt om de verwachte uitwijkingen op het basilair membraan op te wekken is voor geen enkele frequentie in het hoorbare spectrum in overeenstemming met de fundamentele wetten van de fysica.

Omdat perilymfe een viscositeitscoëfficiënt bezit die niet meer is dan drie keer die van water, is perilymfe nog altijd een laagviskeuze vloeistof. De snelheid waarmee geluidsgolven zich in dit medium verplaatsen is vergelijkbaar met de geluidssnelheid in water, welke ongeveer 1500 m/s bedraagt. Als dit gegeven gecombineerd wordt met de algemene formule voor de lopende golf $v = f \times \lambda$, waarbij v de voortplantingssnelheid is in m/s, f de frequentie in Hz en λ de golflengte in m, maakt berekening duidelijk dat zelfs voor de hoogst hoorbare frequentie van 20 kHz, de bijbehorende golflengte van 75 mm niet eens past op de lengte van het basilair membraan, dat slechts 35 mm meet.

Verder moeten we opmerken dat een geluidsgolf altijd de weg van de minste weerstand zal volgen, dit is dan via de vloeistof en niet via het membraan. Dit geldt ook voor de trillingsenergie. Een kwestie die reeds onderwerp was van een algemene en fundamentele discussie in 1954, zoals door Wever, Lawrence en Von Békésy [2] is gerapporteerd. In de huidige cochleaire modellen is dit kardinale vraagstuk, waar en hoe geluidsenergie zich voortplant in het slakkenhuis, nog altijd niet eenduidig opgelost.

Daarnaast hebben cochleaire deskundigen abusievelijk gesuggereerd dat deze ‘golf’, welke als lopend over het basilair membraan wordt waargenomen en daarom gewoonlijk als lopende golf wordt geïnterpreteerd, vergeleken kan worden met de ‘rimpels’ in een vijver.

Echter het eenvoudig opschalen tot zulke enorme afmetingen zoals die in een vijver van deze zeer kleine scheidingswand in het slakkenhuis is onmogelijk om meer dan één reden. Capillaire golven [3], of beter gezegd golven in een scheidingslaag, zijn uitsluitend mogelijk op het scheidingsvlak van twee onderling niet mengbare vloeistoffen of tussen een vloeistof en een gas, vooropgesteld dat aan twee kardinale voorwaarden wordt voldaan.

De eerste voorwaarde is dat een afscheiding bestaande uit een vaste stof dit contactvlak tussen beide media niet mag verstoren. Zelfs niet als dat scheidingsvlak extreem dun is in vergelijking met de amplitudes van de bewegingen in dat grensvlak, omdat capillaire golven zowel uit transversale als laterale grenslaagbewegingen bestaan. De aanwezigheid van het relatief stevige en omvangrijke basilair membraan als afscheiding in het slakkenhuis maakt het bestaan van de noodzakelijke laterale bewegingen eenvoudigweg onmogelijk.

De tweede noodzakelijke voorwaarde voor capillaire golven is dat de vloeistoffen aan beide zijden van het grensvlak een duidelijk verschillende dichtheid moeten hebben. De verschillen in dichtheid van de beide vloeistoffen, perilymfe en endolymfe, in het slakkenhuis is slechts rudimentair.

Hieruit volgt dat de noodzakelijke condities voor capillaire golven – ‘de rimpels in een vijver’ – nergens binnen het slakkenhuis blijken te bestaan.

Naast al deze beperkende eisen bestaat er ook een fundamentele mechanische beperking welke het onmogelijk maakt dat er golven zowel in voorwaartse als achterwaartse richting vrijelijk over het basilair membraan bewegen. Het is ook bekend uit het experimentele werk van Von Békésy [1] en bevestigd door talrijke andere onderzoekers dat de mechanische eigenschappen van het basilair membraan buitengewoon opmerkelijk zijn.

Bepaald door de combinatie van lokale breedte, stijfheid en spanning, bezit het een logaritmisch verdeelde resonantiefrequentie topografie. Lage resonantiefrequenties die dicht bij het helicotrema en hoge resonantiefrequenties die dicht bij het ronde venster [4] te vinden zijn. Beginnend bij ongeveer 20 Hz bestrijkt deze verdeling bijna drie decades in frequentie tot 20 kHz over een basilair membraan van ongeveer 35 mm lengte bij de mens. Dit binnen geringe afstand snel veranderen van eigenschappen in de cochleaire scheidingswand verhindert dat we het signaaloverdracht mechanisme van het slakkenhuis kunnen beschouwen als een goed afgestemde transmissielijn [3].

Een transmissielijn kan trillingsenergie van een signaal slechts goed overbrengen als op alle plaatsen langs die lijn de karakteristieke impedantie correct is aangepast aan de frequentie van dat signaal [5]. Zo niet, dan zal een trillingssignaal met frequentie f_s extreem gedempt worden en zelfs uitsterven buiten het lokale gebied met resonantiefrequentie f_r , waarbij $f_r = f_s$.

1.2 Bezwaren tegen de hypothese van de cochleaire versterker

Het uitgebreide dynamische bereik van ongeveer 90 dB in het gehoororgaan heeft wetenschappers tientallen jaren voor raadsels geplaatst. Tegenwoordig zijn deskundigen ervan overtuigd dat dit niet bereikt kan worden zonder het bestaan van een versterker [6-8]. In de hypothetische oplossing van de laatste drie decennia wordt verondersteld dat de buitenste haarcellen geen directe rol spelen bij de overdracht van elektrische signalen naar de auditieve cortex, maar dat zij de stimulus versterken door hun beweeglijkheid [9]. Hoewel de discussies daarover nog altijd gaande zijn, heeft dit geleid tot de hypothese dat de buitenste haarcellen een dermate krachtige beweeglijkheid bezitten dat ze in staat zijn om de uitwijkingen van het basilair membraan te vergroten en op deze wijze dan ook als cochleaire versterker dienst doen.

Verder wordt verondersteld dat zij in onderlinge samenwerking op hun beurt ook weer in het basilair membraan achterwaarts lopende golven richting het ovale venster genereren. Ter plaatse van het ovale venster worden deze veronderstelde achterwaarts lopende 'geluidsgolven' overgebracht via de gehoorbeentenen naar het trommelvlies en kunnen dan waargenomen worden als de gebruikelijke oto-akoestische emissie (OAE) signalen [10,11].

Daarnaast wordt ook de hypothese gebruikt waarin de signaaloverdracht in het slakkenhuis bestaat uit elektrische stroompjes, opgewekt door de vervorming van de binnenste haarcellen. Schuifkrachten tussen de rand van het basilair membraan en het enigszins scheef uitwijkend gedachte tectoriaal membraan, gelegen binnen de scala media, worden verondersteld deze vervorming te genereren.

Het belangrijkste bezwaar tegen deze haarcel hypothesen is dat van deze buitenste haarcellen een fysiek onmogelijke taak wordt verwacht. Elk van hen moet krachten opwekken om massa's te versnellen die vele malen groter zijn dan hun eigen massa. Naar onze mening zullen, zelfs als alle buitenste haarcellen samenwerken op een gemeenschappelijke en coherente wijze, de gecombineerde krachten nog altijd te zwak zijn om een meetbaar signaal op te wekken.

Een bijdrage van Ren en Gillespie [12] tot deze discussie bevestigt onze mening. Zij sloten hun theoretische en experimentele werk af met de volgende constatering:

--- Hoe het slakkenhuis de door de buitenste haarcellen opgewekte krachten gebruikt om de trillingen in de cochleaire scheidingswand te versterken blijft echter onbeantwoord. Ondanks drie decennia van intensief onderzoek is het verwachte vermogensbereik van de cochleaire versterker niet experimenteel aangetoond. Het extreem beperkte longitudinale patroon en de locatie van de

cochleaire niet-lineariteit ter plekke van de piekrespons zijn beide inconsistent met voorspellingen gebaseerd op de beschikbare theorieën. ---

Daarom zou het eveneens onmogelijk zijn om een achterwaarts lopende golf op te wekken, want buitenste haarcellen zouden dan niet alleen lokale bewegingen van het basilair membraan moeten kunnen opwekken, maar zouden ook relatief grote verplaatsingen binnen het slakkenhuis van zowel de perilymfe- als endolymfevloeistof moeten opwekken op een opeenvolgende systematische en tot gebieden beperkte actie. Dit teneinde die verwachte lopende golf op te wekken.

En inderdaad bevestigen experimenten van De Boer et al. [13] de bevindingen van Ren et al. [14] en He et al. [15]: Achterwaarts lopende golven, die verantwoordelijk gehouden kunnen worden voor distorsie product OAE's in het slakkenhuis zijn niet gevonden. Alleen voorwaarts lopende golven gerelateerd aan opgewekte OAE's zijn aanwezig in hun experimenten.

1.3 Bezwaren tegen de bestaande hypothese van signaaloverdracht via beengeleiding

Het nu gebruikte model voor de overdracht van een beengeleidingsignaal is gebaseerd op de trilling van het rotsbeen. Echter zowel het materiaal als de constructie van deze uit bot bestaande omhulling zijn mechanisch extreem stijf, terwijl de slakkenhuisvorm van de holte de mogelijkheid uitsluit dat delen van deze holte dienst kunnen doen als de daarbij veronderstelde resonatoren. Daarom kunnen geluidsstimuli niet op deze wijze worden overgebracht. En al helemaal niet de zwakke trillingssignalen met drukvariaties van ongeveer 20 mPa, gelijk aan een drukvariatie van $0,2 \times 10^{-6}$ atmosfeer, welke opgewekt worden door een normale geluidsstimulus van 60 dB SPL. Ergo, 'beengeleiding' moet een andere oorzaak hebben dan de vervorming van het robuuste rotsbeen, het benen omhulsel van het slakkenhuis.

1.4 Bezwaren tegen de bestaande beschrijving van het hydrodynamisch gedrag in het binnenoor

In zijn beschrijving van de werking van het slakkenhuis heeft Von Békésy [1] beweerd dat het Reissner membraan, dat de scheiding vormt tussen de met perilymfe gevulde scala vestibuli en de met endolymfe gevulde scala media, nauwelijks enige inwendige spanning bezit en dat het bovendien zo dun is dat het geen obstakel vormt voor drukgeïnduceerde stroming van hetzij de perilymfe hetzij de endolymfe. Hij concludeerde dat deze twee feiten het mogelijk maken om het bestaan van het Reissner membraan volledig te verwaarlozen in het geval dat het hydrodynamische gedrag van de aangrenzende vloeistoffen wordt bestudeerd. Met als gevolg, volgens hem, dat de drie binnenoorkanalen, de scala tympani, scala vestibuli, en scala media,

beschouwd kunnen worden als een combinatie van alleen scala tympani en scala vestibuli, onderling verbonden bij het helicotrema en gescheiden door het basilair membraan.

Het Reissner membraan blijft echter een vaste dunne scheidingswand. Bewegingen ervan samen met de vloeistoffen aan weerskanten in de richting loodrecht op zijn oppervlak zullen geen ernstige problemen opleveren, maar voor bewegingen in richtingen langs het oppervlak zou dit membraan oneindig elastisch en flexibel moeten zijn. Omdat deze conditie niet bestaat, zal het Reissner membraan nog altijd een obstakel vormen voor de hydrodynamische stromingscondities aan beide zijden ervan. Daarom moet het afwijkende hydrodynamische gedrag van de scala media afgescheiden beschouwd worden van dat van de scala vestibuli en scala tympani.

Derhalve is verwaarlozing van dit membraan niet toegestaan. Deze foutieve interpretatie vormt ook de basis voor de onder cochleaire experts geaccepteerde poging tot het theoretisch verklaren van de op hydrodynamica gebaseerde energiestroming in het slakkenhuis gegeven door Lighthill [5]. Geholpen met suggesties van toonaangevende experts in het cochleaire onderzoek en na een indrukwekkend aantal berekeningen gekoppeld aan verschillende cochleaire modellen en onder handhaving van de eis dat een lopende golf geluidsenergie meedraagt tot een zekere plaats op het basilair membraan, illustreerde Lighthill in zijn publicatie hoe akoestische energie door zowel een snelle golf als een langzame golf getransporteerd zou worden in het inwendige van de beide aan elkaar grenzende kanalen die door een flexibele wand van elkaar gescheiden zijn. Fig. 1. is een reproductie van deze illustratie.

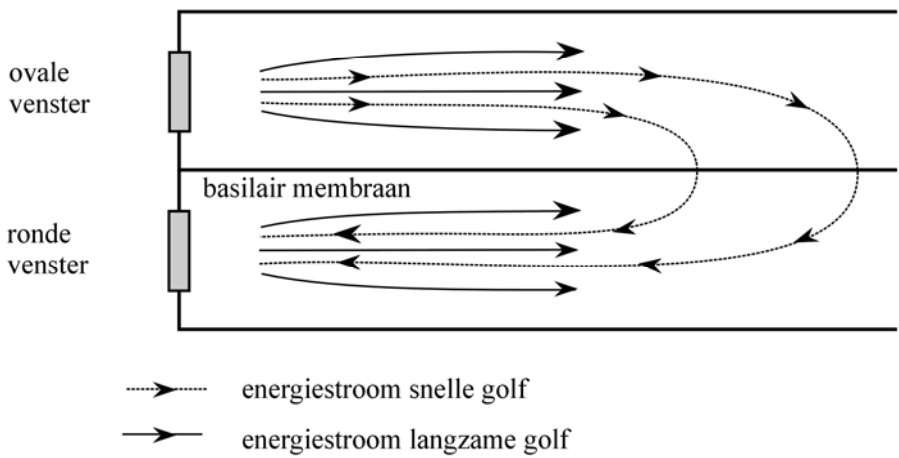


Fig. 1. Akoestische energiestroming verklaard volgens Lighthill

Maar de hypothese, oorspronkelijk geïnitieerd door Von Békésy [1] en hier opnieuw verondersteld door Lighthill in zijn verklaring, dat de afmetingen van de scala media – het met endolymfe gevulde kanaal liggend tussen de met perilymfe gevulde scala vestibuli en scala tympani en in werkelijkheid optredend als scheidende structuur tussen beide scalae – verwaarloosd kan worden als bijdragende factor in het hydrodynamische gedrag van de perilymfebewegingen in het slakkenhuis, is fundamenteel fout.

Binnen de perilymfe inhoud van het slakkenhuis – niet meer dan een enkel druppeltje – kunnen er geen drukverschillen bestaan tengevolge van opgewekte geluidssignalen zoals Lighthill suggereert in zijn theorie. Volgens de wetten van de fysica moeten we ons ervan bewust zijn dat, zodra er een lokale verstoring van de druk ergens in de perilymfevloeistof is opgewekt, deze verstoring zich altijd zal voortplanten en uitbreiden met de snelheid van het geluid, welke 1500 m/s bedraagt. Ergo, er kunnen geen twee geluidsenergie fenomenen bestaan met verschillende voortplantingssnelheden in het inwendige van dit nietige cochleaire volume zoals verondersteld wordt door Lighthill en getoond in Fig. 1.

Na het bestuderen van Lighthill's publicatie kunnen we concluderen dat zijn wiskundige exercitie niet meer is dan een poging om alle tijdens experimenten door andere wetenschappers waargenomen mechanische activiteiten in het slakkenhuis in termen van voortplanting van een geluidsgolf door middel van lopende golven te rechtvaardigen. Maar de noodzakelijke fysische gronden voor deze exercitie ontbreken fundamenteel.

De perilymfevloeistof in scala tympani en scala vestibuli kan feitelijk slechts als één geheel bewegen in een heen- en weergaande beweging tengevolge van de excitatie van het ovale venster. De vorm van het smalle en gevouwen kanaal, bestaande uit scala tympani en scala vestibuli, verandert daarbij niets aan dit principe.

1.5 Hieruit concluderend

Door rekening te houden met alle hierboven genoemde bezwaren tegen de bestaande concepten kunnen we vaststellen dat er een alternatieve theorie moet bestaan. En bij die theorie moeten we zeker rekening houden met het bestaan van de scala media, naast het feit dat de perilymfevloeistof in de scala vestibuli en scala tympani beweegt als één geheel en als een onsamendrukbare vloeistofkolom.

2. De nieuwe gehoorhypothese

2.1 De functies van het middenoor

De variërende druk in het buitenoorkanaal wekt geluidsstimuli op en activeert daarmee het trommelvlies. Het trommelvlies brengt op zijn beurt de gehoorbeenketen in beweging. Deze beweging wordt overgebracht op de perilymfte in het slakkenhuis via de stijgbeugel, die nauw verbonden is met het ovale venster.

Onze hypothese beschrijft een andere werking van het middenoor. Wij stellen dat de musculus tensor tympani en de musculus stapedius de versterkingsverhouding van deze bewegingen kunnen veranderen. Een geleidelijke toename van de geluidsstimuli veroorzaken daarbij een geleidelijke vermindering in die verhouding. Onder normaal veranderende geluidscondities is deze aanpassing dermate subtiel dat dit zonder gebruik te maken van extreem gevoelige experimentele gereedschappen niet kan worden waargenomen.

Deze hypothese lijkt realistisch, want bij het optreden van plotselinge luide geluidsuitbarstingen kan de optredende en waargenomen stapedius reflex – de enige tot nu toe beschreven functie van de stijgbeugel – beschouwd worden als een extreem plotseling optreden van dit aanpassingsmechanisme.

Dit continu functioneren van beide middenoorspiertjes houdt in dat slechts onder abnormale omstandigheden, zoals bijvoorbeeld de plotselinge geluidsuitbarsting van een in de nabijheid optredende explosie, dit beschermingsmiddel voor het kwetsbare binnenoor te laat kan zijn en daardoor ineffectief is. Onder normale omstandigheden kan het juist buitengewoon effectief zijn.

Het hiervoor genoemde systeem werkt als een gedempt massa-veer systeem geactiveerd door een extern gegenereerd geluidssignaal zoals is voorgesteld in Fig. 2.

De functionele samenwerking van trommelvlies en gehoorbeenketen als regelaar in Fig. 2 kan beschouwd worden als de versterker R_S . De kolom met de perilymfvloeistof komt overeen met de massa m . Het gecombineerde elastische gedrag van trommelvlies, ovale venster en ronde venster worden voorgesteld als de veerconstante k , terwijl de demping wordt aangegeven met ξ .

De perilymfesnelheid als functie van de frequentie kan worden berekend door middel van een standaard oplossing in de fysica, de tweedeorde differentiaalvergelijking. Afhankelijk van de praktische waarden voor m , ξ , en k in het slakkenhuis, zullen de resultaten van deze berekening een resonantiefrequentie f_r opleveren van 1000 – 2000 Hz en een 3 dB per octaaf toename van de perilymfesnelheid v voor frequenties lager dan f_r , en een 3 dB per octaaf daling voor frequenties hoger dan f_r .

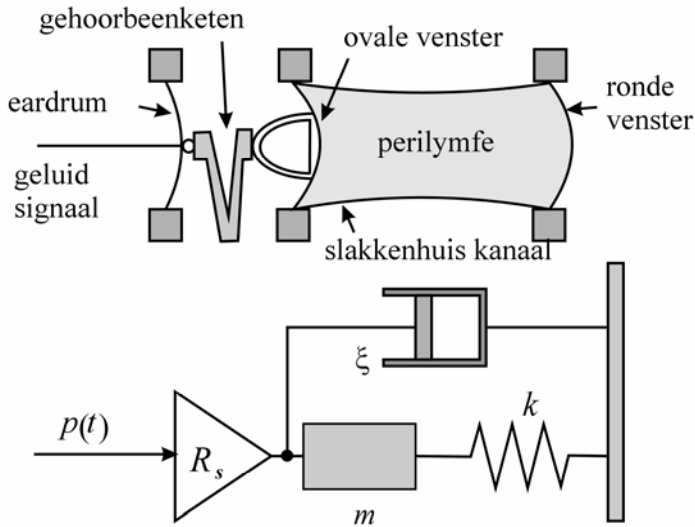


Fig. 2. Schematische tekening van het gehoor, als extern geactiveerd massa-veer systeem

2.2 Relatie tussen geluidsstimulus en elektrische output in het slakkenhuis

Volledig in overeenstemming met de bevindingen van Wever en Lawrence [16], stellen we vast dat rechtstreekse geluidsstimuli op hetzij het ovale venster hetzij het ronde venster – i.e. het andere membraan dat het middenoor afscheidt van het slakkenhuis – een gelijke verandering in de elektrische cochleaire potentiaal opwekt gerelateerd aan de perilymfebeweging.

De reeds genoemde experimenten van Wever en Lawrence gepubliceerd in 1950 onder de titel ‘De akoestische weg naar het slakkenhuis’ hebben veel belangrijker consequenties voor het begrijpen van de werking van het gehoorzintuig dan Wever of Lawrence opmerken in hun conclusies.

Omdat wij ervan overtuigd zijn dat de commentaren, die wij willen toevoegen aan verschillende beweringen in de publicatie van Wever en Lawrence, zo belangrijk zijn, zullen we de volledige samenvatting citeren en deel voor deel voorzien van ons commentaar.

Citaat:

--- *Metingen zijn gedaan aan de relatieve effectiviteit van het ronde venster als ingangsrouten voor geluiden naar het slakkenhuis. Indien het gehoor normaal werkt, is deze weg niet van belang, maar wanneer het middenoor-mechanisme ontbreekt en de route naar het ovale venster deze voorkeur heeft*

verloren, zal een geluid nagenoeg gelijke toegang hebben via beide vensters. -

--

Commentaar:

In een normaal werkend gehoor is het bestaan van het ronde venster als flexibele afscheiding tussen de scala tympani en de middenoorholte hoogst belangrijk want het maakt de algehele heen- en weergaande beweging van de onsamendrukbare perilymfefloeistof in de gecombineerde scala vestibuli en scala tympani mogelijk. Dat is ook een deel van de volgende bevindingen van Wever en Lawrence:

Citaat:

--- Indien het binnenoer gelijktijdig bereikt wordt via beide routes vertegenwoordigen de cochleaire potentialen de vectorsom van hetgeen zou resulteren van de twee afzonderlijke golven. Wanneer de fase- en intensiteitsverhoudingen tussen de twee routes veranderen gaan de potentialen door maximum en minimum waarden, die voor gelijke intensiteit van de twee golven variëren van een 6 dB bereik en tot een volledig verdwijnen. Bewijs is geleverd waarin getoond wordt dat via elke stimuleringsroute dezelfde sensorische cellen geëxciteerd worden en met hetzelfde intensiteitspatroon. Over het grootste deel van het frequentiebereik ontstaat een minimum in de respons als de golven in fase met elkaar zijn op het moment dat ze het ovale en ronde venster passeren. ---

Commentaar:

Uit de bovenstaande verklaringen kunnen we een aanzienlijk aantal gegevens verzamelen die ons in staat stellen een paar zeer belangrijke maar tot op heden niet opgemerkte conclusies te trekken.

- Twee geluidsdruk signalen met gelijke intensiteit, maar beide simultaan in fase trachtend ovale en ronde venster heen en weer te bewegen in en uit het slakkenhuis, leverden een vectorsom op voor de perilymfe stimuli gelijk aan nul op. Dan is er ook geen beweging van de perilymfe, de perilymfesnelheid is dus ook nul. Maar ook de veranderingen in de cochleaire potentialen zijn nul. Wij mogen daarom concluderen dat de veranderingen in cochleaire potentialen afhankelijk zijn van de perilymfesnelheid en niet van de drukbelasting.
- De vectorsom van beide perilymfesnelheid stimuli bereikt zijn maximum op het moment dat ovale en ronde venster in tegengestelde fase bewegen. En voor gelijke maar in fase tegengestelde stimulusintensiteit op beide vensters, resulteert dit in een verdubbelde perilymfesnelheid. En omdat de 6 dB, door

Wever en Lawrence gemeld, een factor vier betekent, mogen wij concluderen dat de eraan gekoppelde cochleaire potentiaal gekwadrateerd is.

Omdat de geluidsdruk stimulus wordt omgezet naar perilymfesnelheid, betekent dit dat dit deel van de signaaloverdrachtfunctie gegeven wordt door differentiëren. De factor vier in de toename van de cochleaire potentialen, gerelateerd aan de factor twee voor de toename van de perilymfesnelheid, betekent dat dit deel van de overdrachtfunctie bestaat uit kwadrateren.

De cochleaire potentialen zijn evenredig met de gedifferentieerde en gekwadrateerde geluidsdruk stimulus bij het ovale venster of het ronde venster.

De experimenten van Wever en Lawrence zijn bevestigd door de experimenten van Voss et al. [17]. In hun publicatie geven Voss et al. de volgende conclusie:

--- Deze resultaten komen overeen met de hypothese dat het drukverschil tussen de beide vensters een dominant mechanisme is bij het produceren van een cochleaire respons; de bijdragen van enkele "niet in serieschakeling werkende" verbindingen tussen de vensters, zoals het cochleaire aqueduct of de samendrukking van de cochleaire vloeistof, moet gering zijn. ---

Tegenwoordig vormen deze experimentele resultaten de basisreferentie voor actieve in het middenoor implanteerbare apparaten, zoals de Vibrant Soundbridge. Naast andere publicaties tonen recente studies rond de effectiviteit van dit type gehoorapparaten, gepresenteerd door Beltrame et al. [18], aan dat ze zeer succesrijk zijn bij de overdracht van geluidsstimuli naar het binnenoor door middel van stimulatie van het ronde venster via een zogenaamde ‘floating mass transducer’.

Maar ook Voss et al. [17] zagen de scherpere conclusie over het hoofd die getrokken kan worden: het is feitelijk de snelheid van de perilymfefloeistof in het cochleaire kanaal welke de verandering in de cochleaire potentialen opwekt. En natuurlijk wordt deze snelheid gegenereerd door de inwerking van de netto kracht op de perilymfe, tengevolge van het verschil in geluidsstimulatie welke op één of beide vensters inwerkt.

Het in beweging brengen van de perilymfe in het slakkenhuis is feitelijk ook wat bereikt wordt met de opgewekte kracht op het ronde venster door de floating mass transducer in het geval van de Vibrant Soundbridge.

2.3 Beengeleiding

Daar het rotsbeen uit het hardste bot in het menselijk lichaam bestaat, is het praktisch onmogelijk dat er vervorming optreedt tengevolge van de trillingsbewegingen

welke veroorzaakt worden door akoestische drukveranderingen. Daarom moet er wel een ander middel bestaan voor deze signaaloverdracht. Een beengeleiding audiogram – afgezien van een verminderde overdracht van voornamelijk de hogere frequenties – is niet fundamenteel verschillend van het zuivere luchtgeleiding toon-drempel audiogram. Daaruit volgt wel dat de perilymfebeweging in het slakkenhuis ook de signaaloverdracht van de beengeleiding op de één of andere wijze moet voortbrengen. En inderdaad bestaat er een dergelijke mogelijkheid. De scala tympani is rechtstreeks verbonden met de schedelholte door middel van het cochleaire aqueduct, dat zijn verbinding heeft in de nabijheid van het ronde venster. Het cochleaire aqueduct maakt het mogelijk dat de perilymfe heen en weer kan bewegen tussen de schedelholte en de cochleaire kanalen (scala tympani en scala vestibuli). De perilymfe in deze schedelholte wordt blootgesteld aan wisselende drukken, welke veroorzaakt worden door de door geluid opgewekte trillingen van de schaal-vormige schedelbeenderen, gelokaliseerd in de voor- en achterzijde van de schedel.

Als gevolg van Newton's fundamentele traagheidswet weten wij dat, indien een grotere hoeveelheid vloeistof in de schedel in beweging moet worden gebracht, het effect van deze beengeleiding stimuli voor de hogere frequentie bijdragen kleiner zal zijn dan die voor in frequentie vergelijkbare luchtgeleiding stimuli.

Verder introduceert de stijgbeugel het luchtgeleiding signaal dat resulteert in heen- en weergaande beweging van perilymfe voor het basilair membraan langs in tegen-gestelde fase ten opzichte van de heen- en weergaande beweging welke opgewekt wordt door beengeleiding. Hetgeen resulteert in een geringe vermindering van het luchtgeleiding signaal, want dat is het sterkste van die twee signalen.

De wisselende beweging van perilymfe tussen de schedelholte en de scala tympani via het cochleaire aqueduct zal ook gedeeltelijk richting het ronde venster gaan. Deze opsplitsing in twee richtingen van de perilymfebeweging veroorzaakt een verminderde perilymfesnelheid voor het basilair membraan langs, hetgeen tenslotte leidt tot een vermindering van het beengeleiding signaal. De mate van vermindering hangt af van de verhouding in de beweeglijkheid tussen het ovale en ronde venster. Een vermindering in de beweeglijkheid van het ronde venster, gerelateerd aan de beweeglijkheid van het ovale venster, resulteert in een hogere perilymfebeweging voor het basilair membraan, hetgeen een hoger beengeleiding signaal opwekt, terwijl een toename in een verminderde beengeleiding resulteert.

Deze hypothese betreffende het heen en weer bewegen van perilymfe is niet zomaar een loze bewering. In hun publicatie geven Stenfelt et al. [19] een overzicht van eerdere onderzoeken van andere collega's. Van dit overzicht geven wij een duidelijk lijst van onderzoeken, die wijzen op de perilymfe bewegingshypothese.

Freeman et al. [20] en Sohmer et al. [21] hebben aangetoond dat een geluidsdruk geïntroduceerd in de schedelholte wordt overgebracht naar het slakkenhuis en daar

dan een gehoorsensatie opwekt, zelfs indien er niet voldoende trillingen van de schedelbeenderen worden opgewekt om deze signaaloverdracht te beschouwen als normale beengleiding.

Carlborg et al. [22], en Yoshida en Uemura [23], toonden eerder aan dat een verandering van de statische druk in de vloeistof van de schedelholte overgebracht kan worden naar de cochleaire vloeistof. Alhoewel de invloed van het cochleaire aqueduct op het horen bij de mens ook betwijfeld wordt door anderen [24-28].

Reeds in 1936 stelde Von Békésy [29] voor dat de aqueducten vloeistof in en uit het slakkenhuis zouden kunnen transporteren. Tonndorf [30] vond toen hij experimenteerde met het immobiliseren van het ronde venster slechts een vermindering van de gevoeligheid voor luchtgeleiding van 20 tot 30 dB bij katten. Het restgehoor schreef hij toen toe aan onvolledig immobiliseren van het ronde venster, maar in dezelfde studie rapporteerde hij dat er geen significante verandering gevonden was in hetzij beengleiding hetzij luchtgeleiding indien het ronde venster geblokkeerd werd zolang het cochleaire aqueduct maar open bleef.

Groen en Hoogland [31] vonden tijdens het onderzoeken van een patiënt, waarbij ronde venster otosclerose gediagnosticeerd was, dat het horen via beengleiding weinig vervormd werd in het lage tonen gebied, vooropgesteld dat het cochleaire aqueduct en de onderste cochleaire ader open bleven. Bij toenemende frequenties vonden zij drempelwaarden die met 6 dB/octaaf verslechterden, hetgeen zij toeschreven aan frequentieafhankelijke toename in impedantie van het vloeistofkanaal.

Onze hypothese dat beengleiding uitsluitend bestaat uit heen en weer beweging van perilymfe vanuit de schedelholte via het cochleaire aqueduct en wordt opgewekt door trillingen van de schaalvormige beenderen van de schedel, terwijl het harde rotsbeen helemaal niet vervormt, is slechts één stap verder dan de functionele mogelijkheden die anderen aangeven.

2.4 Het hydrodynamische gedrag in het slakkenhuis

2.4.1 Von Békésy's lopende golf versus het Bernoulli effect

De uitspraak dat het Reissner membraan tussen scala vestibuli en scala media geen beletsel vormt voor drukgeïnduceerde stroming van zowel perilymfe als endolymfe, berust op een misinterpretatie. Deze uitspraak is in strijd met de wetten van de hydrodynamica, die niet toestaan dat de scala media, een afzonderlijke driedimensionale buis gevuld met vloeistof, vervangen kan worden door een tweedimensionaal dun membraan.

De verklaring voor de verschillende consequenties in gedrag bij de berekeningsmodellen welke dienst doen als analoge geometrieën voor Von Békésy's [1] twee

kanalen model en het werkelijk bestaande drie kanalen model worden weergegeven in Fig. 3.

Hoewel de perilymfvloeistof aan beide zijden van de scala media in tegengestelde richtingen beweegt, zoals getoond wordt in (A), zullen in de vereenvoudigde weergave (B) de beide drukinvloeden Δp op het basilair membraan, opgewekt door vloeistofbewegingen in zowel scala vestibuli als scala tympani langs het basilair membraan, gelijk in grootte zijn, maar tegengesteld in richting. Dit betekent dat zij elkaars stimulus overdracht op het basilair membraan zullen opheffen. Het basilair membraan ondervindt geen netto stimulus en zal in rust blijven.

Alleen indien de verbinding tussen scala vestibuli en scala tympani bij het helicotrema aanzienlijk smaller zou zijn dan de gemiddelde dwarsdoorsnede van zowel scala vestibuli als scala tympani elders in het cochleaire kanaal – feitelijk dienstdoende als een aanmerkelijke stromingsbeperking – zal stimulatie van het ovale venster drukverschillen tussen de scala vestibuli en scala tympani opwekken, waardoor vervolgens mogelijk bewegingen van de gehele scala media worden opgewekt.

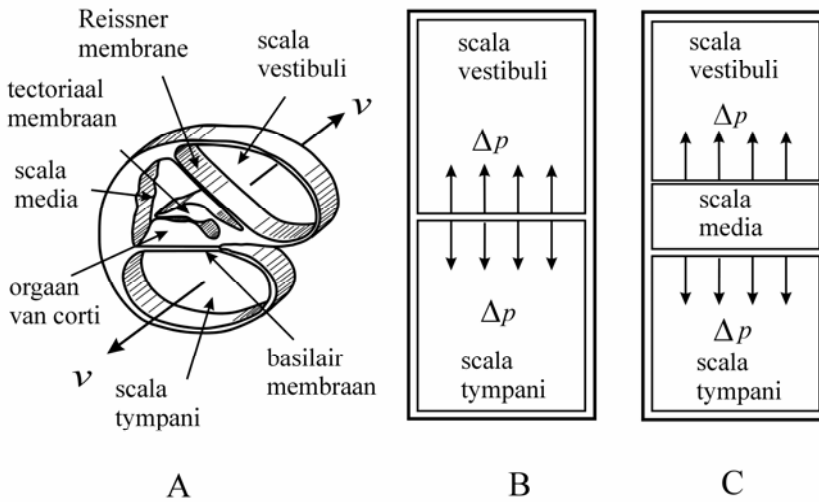


Fig. 3. Doorsnede van het slakkenhuiskanaal met twee en drie kanalen werkend

Von Békésy wakte inderdaad bewegingen op van de gehele scala media in zijn experimenten met cochleae uitgenomen uit kadavers. Hij nam in werkelijkheid bewegingen waar van het Reissner membraan door middel van zijn waarnemingen van de zilverdeeltjes die hij voor dat doel verstrooid had over het membraan, teneinde deze bewegingen zichtbaar te maken. Deze bewegingen, zo concludeerde hij, werden veroorzaakt door hoge vibratie stimuli.

Echter de indirecte waarnemingen van wat een lopende golf lijkt te zijn over het basilair membraan opgewekt door hoge trillingsstimuli – in werkelijkheid bewe-

gingen van de zilverdeeltjes uitgestrooid over het Reissner membraan – voerde Von Békésy tot zijn hypothese dat de scala media en het basilair membraan direct het Reissner membraan volgen.

Ons model, waarbij wij uitgaan van drie bijdragende compartimenten, zoals in (C) te zien is, vertoont een drukstimulus Δp op zowel het Reissner membraan als het basilair membraan, welke beide membranen dwingt te bewegen in buitenwaartse richting relatief ten opzichte van de scala media omdat de endolymfevloeistof in deze scala zich in rust bevindt, terwijl de perilymfe in zowel de scala tympani als de scala vestibuli beweegt met een snelheid v , gericht langs de as van elk van beide scalae.

Volgens de wet van Bernoulli wordt dit ontstane drukverschil aan beide zijden van het Reissner membraan en het basilair membraan gegeven door:

$$\Delta p = -\frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

hier is ρ de dichtheid in kg/m^3 en v de snelheid van de perilymfe in m/s.

In media zoals gassen en vloeistoffen wordt een lopende golf gekarakteriseerd door een opeenvolging van gebieden, welke beurtelings hoog en laag in druk zijn en die zich voortplanten met de snelheid van het geluid. Als we dit combineren met het feit dat perilymfe, zoals de meeste vloeistoffen, in hoge mate onsamendrukbaar is, resulteert dit in afstanden tussen die opeenvolgende gebieden die veel groter zijn dan de lengte van het slakkenhuiskanaal. De enige mogelijke conclusie is dat de perilymfe als één geheel beweegt door de beweging van de stijgbeugel samen met het ovale venster en zich gedraagt als een bewegende vloeistofkolom. Alle wetenschappelijke literatuur en waarnemingen bij experimenten om dit te onderzoeken laten zien dat het ronde venster in tegengestelde richting doorbuigt in relatie tot de beweging van het ovale venster.

Daarom functioneert naar onze mening het met perilymfe gevulde deel van het slakkenhuis, bestaande uit scala tympani en scala vestibuli, als een geleidende buis voor stroming. Volgens het Bernoulli effect wekt zo'n stroming drukverlagingen op die evenredig zijn met het kwadraat van de vloeistofsnelheid, vermenigvuldigd met de dichtheid van de vloeistof. In essentie veroorzaakt dit kwadrateren van de snelheid dat de drukverlagingen over het basilair membraan zowel een statische als dynamische component bezitten. Tenslotte kunnen we twee functies onderscheiden in de gecombineerde activiteiten van het basilair membraan en het orgaan van Corti. In de eerste plaats die van een reeks afzonderlijke frequentieselectieve druksensoren, elk met een hoge kwaliteitsfactor en reagerend op frequentie signalen welke overeenkomen met de lokale resonantiefrequentie. Deze functie is essentieel bij het horen van geluiden. De tweede gecombineerde sensoractiviteit is naar onze mening de werking als een druksensor voor zeer laagfrequente drukvariaties. Deze tweede functie kan cruciaal zijn voor de overdrachtregeling van het gemiddelde signaal via

het trommelvlies en de gehoorbeentjes. Het auditieve systeem kan worden vergeleken met een optimaal gedempt tweedeorde resonantiesysteem met een relatief lage resonantiefrequentie, die in amplitude regelbaar is. Berekningen van deze effecten zullen worden gegeven in de volgende hoofdstukken.

Recent leverde een beoordelaar, die geconsulteerd werd door de redacteur van een wetenschappelijk tijdschrift, het commentaar in zijn rapportage dat het Bernoulli effect een niet-lineair hogere orde Navier-Stokes fenomeen zou zijn, dat extreem klein is en daarom onvoldoende sterk is om een rol te spelen in het proces van geluidsoverdracht in het slakkenhuis.

Echter het tegenovergestelde is juist waar. Het Bernoulli effect in bijna onsamendrukbare laag viskeuze vloeistoffen, die bewegen in een buis is zelfs een relatief sterk effect, dus het toepassen hiervan in het slakkenhuis is eveneens correct. Het toepassen van de wet van Bernoulli in dit geval is gebaseerd op Newton's wet van behoud van energie – welke het evenwicht beschrijft tussen de hoeveelheden kinetische en potentiële energie. De toepasbaarheid van de wet van Bernoulli ontkennen hier staat gelijk aan het veronachtzamen van één van de meest fundamentele wetten van de fysica.

En er bestaan meer onweerlegbare bewijzen waarom het is toegestaan Bernoulli's wet toe te passen in het geval dat perilymfesnelheid heen en weer beweegt in het slakkenhuis.

Gegevens uit de literatuur laten zien dat voor normale geluidsstimuli de maximale verplaatsingen van het ovale venster aanzienlijk kleiner zijn dan 10 micrometer. Laten wij echter, ter wille van de keuze van een extreem hoge hypothetische perilymfesnelheid opgewekt door een 20 kHz sinusoidale trilling, beginnen met de extreme amplitude U_0 van $10\ \mu\text{m}$. Een simpele berekening resulteert in de maximum snelheid $v_{pm} = 2\pi f U_0 = 1,26\ \text{m/s}$.

Bovendien kunnen wij gebruik maken van de volgende gegevens die we gevonden hebben in de literatuur voor een aantal parameters die een rol zullen spelen in dit proces:

- Voor het perilymfekanaal in het slakkenhuis wordt aangegeven een diameter: $d = 0,3\ \text{mm}$.
- Terwijl de kinematische viscositeit gegeven is als $\nu = 0,801 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$.
- Perilymfe wordt beschouwd als een praktisch onsamendrukbare vloeistof, nagenoeg identiek aan water.

Bij gebruik van deze gegevens berekenen wij voor het Reynolds getal Re :

$$Re = \frac{v_{pm} \times d}{\nu} = 471,9 \quad (2)$$

Hetgeen slechts $1/5$ is van de kritische waarde voor Re tussen 2000 en 3000 die vereist is om de stromingscondities te veranderen van laminair voor lage Re , naar turbulent voor hoge Re . Daar v_{pm} proportioneel is met de frequentie f zal voor lagere frequenties Re zelfs nog geringer zijn.

Dus blijft de stroming van de onsamendrukbare perilymfefloeistof laminair voor alle geluidsfrequenties in het slakkenhuis. Dit heeft tot gevolg dat de betrokken parameters onveranderd blijven voor alle reguliere geluidssignalen die wisselende perilymfesnelheden opwekken.

Daarom kan zonder enige restrictie de quasistatische benadering toegepast worden, hetgeen betekent het vervangen van de constante snelheid v_p door de tijdsafhankelijke snelheid $v_p(t)$. Voor een enkelvoudige frequentie f resulteert dit in de sinusvormige snelheidsrelatie:

$$v_p(t) = (2\pi f U_0) \cos(2\pi f t) \quad (3)$$

2.4.2 Overdracht van geluidssignalen in het slakkenhuis en het Bernoulli effect

Stel dat in een buis, zoals het cochleaire kanaal, een stroming bestaat met een uniforme snelheid v . In elke dwarsdoorsnede loodrecht op de as van dit kanaal genereert deze stroming een drukverlaging Δp op de wanden, zoals te zien is in formule (1). In de eerste plaats moet worden opgemerkt dat er geen restrictie geldt voor Δp met betrekking tot de richting van de stroming; ten tweede dat aan alle condities voor de geldigheid van deze formule in het slakkenhuis is voldaan. Dit betekent dat indien de stijgbeugel een tijdsafhankelijke verplaatsing $u(t)$ aan het ovale venster oplegt over een dwarsdoorsnede oppervlak S_0 , dit overeenkomt met een verplaatsing in volume van $\Delta V(t)$ van de onsamendrukbare perilymfe zoals weergegeven in formule (4).

$$\Delta V(t) = S_0 u(t) \quad (4)$$

Met de volumeverplaatsing volgens formule (4) kunnen we berekenen dat op plaats x met lokale dwarsdoorsnede oppervlak S_x de plaatselijke snelheid $v_x(t)$ van de perilymfe beschreven wordt door:

$$v_x(t) = \frac{S_0}{S_x} \frac{du(t)}{dt} \quad (5)$$

waar $du(t)/dt$ de tijdsafgeleide van de verplaatsing van het ovale venster is, wat overeenkomt met de snelheid van deze verplaatsing.

Als voor de geluidsstimulus een zuivere toon met geluidsdruk amplitude p_0 en frequentie f genomen wordt, resulteert dit in een sinusvormige tijdsafhankelijke perilymfeverplaatsing zoals getoond in formule (6):

$$u(t) = Ap_0 \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

waar A de overdrachtsfunctie van geluidsdruk voor het trommelvlies naar verplaatsing van het ovale venster is. Dan zullen we, na enkele berekeningen, namelijk differentiëren voor de transformatie van verplaatsing naar snelheid, gevolgd door kwadrateren ten gevolge van het Bernoulli effect, ter plaatse x met lokale dwarsdoorsnede oppervlak S_x voor de drukdaling op de wand van het slakkenhuis vinden:

$$\Delta p(t)_x = -2\rho(A\pi f p_0)^2 \left(\frac{S_0}{S_x}\right)^2 \cos^2(2\pi ft) \quad (7)$$

Dit kan weer worden uitgedrukt in een combinatie van een constante stimulus en een stimulus met een dubbele frequentie bijdrage:

$$\Delta p(t)_x = -\rho(A\pi f p_0)^2 \left(\frac{S_0}{S_x}\right)^2 [1 + \cos(4\pi ft)] \quad (8)$$

Vanaf hier zullen we gebruikmaken van de zogenaamde $1/f$ relatie voor geluiden gevonden in de natuur. Door deze $1/f$ relatie zal de geluidsdruk amplitude p_{0i} van een zuivere toon in een tooncomplex, omgekeerd evenredig zijn met zijn frequentie f_i . Onmiddellijk wordt in formule (8) de reden voor de voorkeur voor $1/f$ geluidscontributies duidelijk: de signaalsterkte, gegeven door $f_i p_{0i}$, van elke stimulus bijdrage op het basilair membraan wordt frequentieonafhankelijk.

Deze goed waarneembare $1/f$ kwaliteit van geluiden is een fenomeen dat overal in de natuur [32] te vinden is. Het gehoororgaan van zoogdieren toont een perfecte aanpassing aan dergelijke geluiden.

Een ander resultaat wordt duidelijk als we bedenken dat in gelijkvormige dwarsdoorsneden het opgewekte signaal op plaats x_1 , waar bijvoorbeeld de karakteristieke diameter van het cochleaire kanaal 2 maal kleiner is dan op plaats x_2 , de dwarsdoorsnede daardoor 4 keer kleiner is. Dit resulteert plaatselijk in een perilymfesnelheid die ook 4 keer hoger is, terwijl door het kwadrateren van deze snelheid de stimulus op het basilair membraan in overeenstemming met het Bernoulli effect zelfs 16 keer sterker is. Dit biedt een verklaring voor het feit dat de taps toelopende vorm van de scala tympani, vanaf het ronde venster naar het helicotrema toe, in het voordeel werkt voor de lagere frequenties.

Bijgevolg is deze verklaring verschillend van het ‘fluisterende galerij’ fenomeen, de hypothese van Manoussaki et al. [33]. Sterker nog, het ‘fluisterende galerij’ fenomeen is slechts geldig als de golflengten van de voortlopende golven relatief klein zijn in relatie tot de afmetingen van de beschouwde gekromde galerij; een voorwaarde welke in het slakkenhuis totaal niet bestaat. Bovendien is in het cochleaire model, dat Manoussaki et al. [33] toepassen als basis voor hun wiskundige bereke-

ningen, van het twee kanalen type in plaats van het drie kanalen type. Bovendien maken zij gebruik van de differentiaalvergelijking van Laplace, maar dan met foutieve randvoorwaarden.

Een nadere beschouwing van het resultaat van formule (8) laat zien dat een geluid dat bestaat uit één frequentie een tijdsafhankelijke daling van de druk op de wanden van het slakkenhuiskanaal opwekt, evenredig met het kwadraat van de combinatie van frequentie, vermenigvuldigd met de geluidsdruk voor het trommelvlies. Daaraan toegevoegd zien wij een tijdsafhankelijke harmonische verandering in de druk op het basilair membraan met een amplitude gelijk aan de waarde van de constante drukdaling.

Echter, deze in tijd variërende harmonische bijdrage heeft een dubbele frequentie. Uitgedrukt in muziektermen, de oorspronkelijke zuivere toon in een geluidssignaal wordt omhoog getransponeerd met exact één octaaf. Dit vormt de basis voor het verklaren van dubbele frequentierespons fenomenen en andere opmerkelijke frequentie verschuivingen zoals het ‘halve octaaf verschuiving’ fenomeen dat voor het eerst onderzocht en beschreven is door Davis et al. [34], gevolgd door Mitchell et al. [35] en Cody en Johnstone [36,37] bij getraumatiseerde proefdieren en mensen.

Indien we een samengestelde geluidsgolf, bestaande uit verscheidene Fourier componenten, via de gehoorbeentketen aanbieden, draagt elk van deze componenten accumulatief bij tot de uitwijking van het ovale venster.

Daardoor zal formule (6) veranderen in een som van sinusvormige bijdragen. Tengevolge van het kwadraterende effect bij het opbouwen van druk op de wand, zoals te zien is in formule (9), en opnieuw door gebruik te maken van algebraïsche en trigonometrische relaties, kan worden gedemonstreerd dat twee frequenties f_i en f_j met respectievelijke perilymfesnelheid amplitudes $2A_i$ en $2A_j$, een bijdrage leveren tot de constante drukdaling op het basilair membraan die gelijk is aan $-\rho(A_i^2 + A_j^2)$. Voor het tijdsafhankelijke deel van de druk $\Delta p(t)$ worden de bijdragen zuiver harmonisch en in het geval dat $f_j \geq f_i$, levert berekening de frequenties $2f_i$, $2f_j$, $f_j - f_i$, $f_i + f_j$, met corresponderende onderlinge amplitude verhoudingen van respectievelijk ρA_i^2 , ρA_j^2 , $2\rho A_i A_j$, $2\rho A_i A_j$. Dit is weergegeven in formule (10).

$$\Delta p(t) = -2\rho A_i^2 \cos^2(2\pi f_i t) - 2\rho A_j^2 \cos^2(2\pi f_j t) - 4\rho A_i A_j \cos(2\pi f_i t) \cos(2\pi f_j t) \quad (9)$$

$$\Delta p(t) = -\rho A_i^2 - \rho A_j^2 - \rho A_i^2 \cos(4\pi f_i t) - \rho A_j^2 \cos(4\pi f_j t) - 2\rho A_i A_j \cos\{2\pi(f_j - f_i)t\} - 2\rho A_i A_j \cos\{2\pi(f_i + f_j)t\} \quad (10)$$

Daar het principe, dat in formules (8) tot en met (10) verklaard is, geldig is voor elke willekeurige combinatie van twee Fourier frequentie componenten in het spectrum

van een geluidsgolf, kan berekend worden dat voor een geluidsgolf die bestaat uit 100 individuele Fourier componenten, dit zal resulteren in het maximum aantal van 10.000 Fourier componenten. Daaraan toegevoegd: er wordt een statische bijdrage gevonden, die bestaat uit het totale tijdsgemiddelde van het geluidssignaal. Dit tijdsgemiddelde bestaat uit de som van de tijdsonafhankelijke termen in formule (10), zoals getoond in formule (11).

In het algemeen zal het totale aantal frequenties in het geluidsenergie spectrum worden gereduceerd in geluidsgolven met een aanzienlijk aantal harmonische tonen, omdat grote aantallen van de diverse som- en verschilfrequenties aan elkaar gelijk zijn en zullen combineren met andere harmonische bijdragen.

$$\Delta p = -\rho(A_i^2 + A_j^2) \quad \text{voor 2 bijdragen}$$

en

$$\Delta p = -\sum_{i=1}^N \rho A_i^2 \quad \text{voor } N \text{ bijdragen} \quad (11)$$

Bij nauwkeuriger onderzoek staan de vier frequenties die resulteren uit het vernigvuldigingsproces van de twee originele Fourier componenten f_i, f_j , terwijl $f_j \geq f_i$, ons toe om het onderscheid te maken van één enkele frequentie of grondtoon frequentie $f_j - f_i$ en een triplet, gevormd door $2f_i, f_i + f_j$ en $2f_j$. Elk van de beide originele componenten is gelijk in perilymfesnelheid amplitude, zodat we voor de resulterende som- en verschilfrequenties signaalamplitudes verkrijgen op het basilair membraan die tweemaal zo hoog zijn als de amplitudes van de bijbehorende verdubbelde frequenties.

Als f_j dus gekozen wordt als de één octaaf hogere frequentie ten opzicht van f_i , de octaaf dubbeltoon combinatie, resulteert dit in de opmerkelijke reeks frequenties $f_i, 2f_i, 3f_i$ en $4f_i$, met amplitude verhoudingen $2 : 1 : 2 : 1$. Een perfecte combinatie van een grondtoon met zijn opeenvolgende boventonen.

Het bovenstaande laat zien hoe goed deze gehoortheorie overeenkomt met de ervaringen uit de praktijk. Deze resultaten zijn in overeenstemming met Euler's definitie van 'Gradus Suavitatis': zijn wiskundige verklaring die de menselijke ervaring van muziek beschrijft; de verschillende gradaties van harmonisch klinken, consonantie of welluidendheid.

Als het gehoor gestimuleerd wordt met zowel harmonische als disharmonische tooncombinaties, zoals in de residu toonhoogteperceptie experimenten door Schouten [38], De Boer [39] en anderen zijn uitgevoerd, wordt het duidelijk dat het eenvoudig is om residu toonhoogten op te wekken in een onvolledig tooncomplex.

3. Methoden en experimenten voor verificatie

3.1 Stimulering van het slakkenhuis met samengestelde frequentie complexen

Teneinde theoretisch voorspelde gehoorfenomenen welke voortkomen uit het proces van differentiëren en kwadrateren in de scala tympani voor het basilair membraan te verifiëren, kunnen we gebruik maken van samengestelde geluidscplexen, waarin de bijdragende frequentie componenten aan twee karakteristieke voorwaarden voldoen.

De eerste voorwaarde is dat de gemiddelde geluidsenergie van een individuele frequentiebijdrage gelijk moet zijn aan die van al de andere individuele bijdragen. En als consequentie van formule (10) kan dit bereikt worden indien we voor de geluidsdruk amplitude kiezen voor een $1/f$ afhankelijkheid.

De tweede voorwaarde is dat, los van vooraf aangebrachte afwijkingen van een paar Hz bij slechts één of twee componenten in de reeks, de opeenvolgende frequenties op de frequentieschaal onderling gelijke afstanden moeten hebben.

Door deze twee voorwaarden te handhaven en gebaseerd op de formules (8) en (9), kunnen wij vooraf berekenen hoe al de bijdragen tot de energiefrequentie in een geluidscplex worden gevormd en samengesteld worden uit de opgewekte stimulus afkomstig van het geluidsdruk signaal. En hoe ze vervolgens het basilair membraan en het orgaan van Corti stimuleren. En tenslotte kunnen wij de berekende resultaten onderzoeken aan de hand van echte geluidsexperimenten.

Voor dit doel heeft Yves Mangelinckx, co-auteur van de Appendices, een relatief eenvoudig, gemakkelijk te gebruiken en efficiënt werkend softwareprogramma ontwikkeld. Voor de berekeningen hebben we gebruik gemaakt van een zeer hoge bit resolutie in de geluidssignalen; dit teneinde elk verstoring aliasing of ongewenst zwevingfenomeen te vermijden die zouden kunnen optreden in de composities.

[Zie ook Appendix A I of A II]

3.2 Toonhoogteperceptie in incomplete harmonische geluidscplexen

Voor het voorbeeld van gecompliceerde toonhoogteperceptie, gegeven door De Cheveigné [40], kunnen het bijbehorende en resulterende geluidsenergie frequentiespectrum berekend worden door het combineren van alle bijdragen met een identieke frequentie in het harmonische complex. Dit is te zien in Fig. 4.

Omdat ons gehoororgaan een voorkeur heeft voor het $1/f$ criterium voor toonbijdragen in het geluidsdruk tooncomplex P_0 , zoals eerder is aangegeven, is hiervoor gekozen als voorwaarde in Fig. 4a.

Na het differentiëren resulteert dit in het perilymfesnelheid frequentiespectrum v_0 in het inwendige van de scala tympani en scala vestibuli met voor alle frequentie-

bijdragen gelijke perilymfesnelheid amplitudes, zoals te zien is in Fig. 4b. De harmonische bijdragen zijn ook zodanig toegepast dat ze elk een fase nul bezitten.

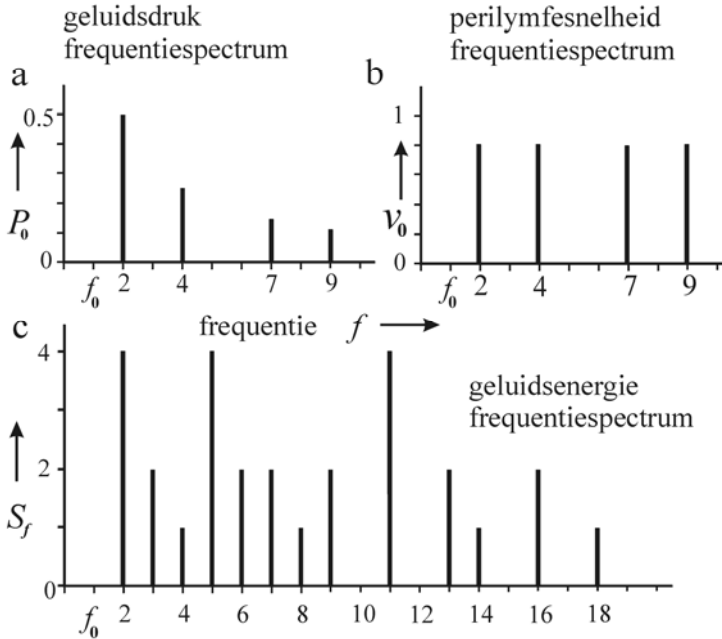


Fig. 4. Overdracht van geluidsdruksignaal naar geluidsenergie frequentiespectrum

Dus alle bijdragen in P_0 zijn zuiver sinusvormig en nul op tijdstip $t = 0$. De berekening van alle primaire- en combinatiefrequenties, zijnde de som- en verschilfrequenties in dit voorbeeld, leveren tenslotte het resulterende geluidsenergie frequentiespectrum S_f , gegeven in Fig. 4c. We kunnen ook in Fig. 4c zien dat de geringste afstand Δf tussen opeenvolgende harmonischen acht keer voorkomt in het frequentiespectrum en gelijk is aan de grondtoon f_0 . De grondtoon f_0 van de reeks is nog altijd afwezig in het geluidsenergie spectrum van dit voorbeeld. Echter, een vergelijk van de waarnemer van de toonhoogtefrequentie met een zuivere toonreferentie leidt tot f_0 als zijnde die referentiefrequentie. Dit tengevolge van het feit dat de stimulus van de aangeboden referentie geluidsdruk ook het differentiëren en kwadrateren zal ondergaan in het slakkenhuis. Dit resulteert in de verdubbelde frequentie $2f_0$ op het basilair membraan en zal dan gelijk klinken als de grondtoonfrequentie in de combinatie van $2f_0 + 4f_0 + 7f_0 + 9f_0$.

Als we het in Fig. 4 aangegeven experiment uitvoeren, waarbij we opnieuw de $1/f$ voorwaarde toepassen in een harmonisch tooncomplex dat bestaat uit de 200+400+700+900 Hz frequenties, maakt het toevoegen van hetzij een 99 Hz hetzij een 101 Hz testfrequentie met een relatieve amplitude van 2 het gemakkelijker om in het originele tooncomplex die toonhoogte te bepalen.

In beide gevallen resulteert dit in een krachtige 2 Hz zweving, welke ontstaat als gevolg van het proces van differentiëren en kwadrateren in de hierboven beschreven theorie. Dit fenomeen is inderdaad gehoord en kan worden gehoord door iedere luisteraar met een redelijk normaal gehoor. Dit is een duidelijke aanwijzing dat de verdubbelde frequentie van 198, respectievelijk 202 Hz, interfereert met de 200 Hz frequentiecomponent van het tooncomplex op het basilair membraan door daar een stimulus op te wekken van 199, respectievelijk 201 Hz, met een 2 Hz zweving.

Voor residu tooncomplexen – reeksen van harmonischen waarin de eerste harmonische of grondtoon ontbreekt – genereert het differentieer- en kwadrateerproces in het slakkenhuis perfect de ontbrekende grondtoon. De bevindingen van Monahan et al. [41] laten zien dat de luisteraar de grondtoon of virtuele toonhoogte reconstrueert binnen ruwweg 100 ms na inschakeling van het geluidssignaal, hetgeen in overeenstemming is met eerder uitgevoerde elektrofysiologische research. Volgens de titel van hun publicatie suggereert dit ook dat de toonhoogte van de grondtoon gereconstrueerd wordt in het eerste begin van de auditieve cortex.

Onze experimenten laten echter duidelijk zien dat dit reconstructieproces zelfs eerder plaatsvindt. In onze experimenten vonden wij dat de vooraf berekende signalen in het basilair membraan exact ontstaan als door ons voorspeld wordt. Daarom hebben wij in tegenstelling tot de conclusie van Monahan et al. dat een vroegtijdig neuraal mechanisme verantwoordelijk is voor het mysterie van de interferentietoonhoogte, sterke bewijzen dat de oorzaak van deze reconstructie van de virtuele of grondtoonhoogte in beginsel hydrodynamisch is.

3.3 Residu toonhoogteperceptie in onharmonische toonreeksen

Het experiment met onharmonische toonreeksen beschreven door De Boer [39] is opnieuw uitgevoerd, dit keer met de toegevoegde voorwaarde dat alle frequentiecomponenten in de reeksen relatieve amplitudes bezitten volgens het $1/f$ criterium. Een voorbeeld van een dergelijk onharmonisch tooncomplex bestaat uit de volgende frequenties: 1400+1600,5+1800 Hz.

Bij toepassing van dit voorbeeld leiden berekeningen vervolgens tot het geluidsenergie frequentiespectrum dat de stimulus vormt op het basilair membraan, hetgeen naast diverse andere bijdragen ook drie bijdragen oplevert met onderling identieke amplitude met verschillende lagere frequenties, gegeven in formule (12).

$$2\cos[2\pi(200,5t)]; 2\cos[2\pi(199,5t)]; 2\cos[2\pi(400t)] \quad (12)$$

Naast deze drie frequenties, bevat het totale spectrum ook de verdubbelde primaire frequenties in het triplet 2800+3201+3600 Hz, met amplitudes die in dit voorbeeld arbitrair op de relatieve referentiewaarden zijn gezet, en de drie somfrequenties: 3000,5+3200+3400,5 Hz, met amplitudes dienovereenkomstig berekend als 2.

De eerste twee bijdragen in formule (12) verschillen 1 Hz, wat kleiner is dan het frequentiescheidend vermogen van het slakkenhuis en kunnen niet gescheiden gehoord

worden. Met hun gelijke amplitude kunnen ze gecombineerd worden volgens de volgende formule.

$$2\cos[2\pi(200,5t)] + 2\cos[2\pi(199,5t)] = 4\cos[2\pi(200t)]\cos[2\pi(0,5t)] \quad (13)$$

Het resultaat wordt door een luisteraar gehoord als de 200 Hz grondtoonfrequentie van het harmonische residu tooncomplex, dat bestaat uit de drie frequenties 1400+1600+1800 Hz, met een amplitudemodulatie van $4\cos[2\pi(0,5t)]$. Meer dan dat, gedurende de 2 s periode van deze 0,5 Hz modulatie bereikt het 200 Hz signaal twee keer zijn maximale waarde 4. Dit houdt in dat deze grondtoonfrequentie gehoord wordt met een krachtige 1 Hz zweeping, exact wat De Boer [39] in zijn proefschrift gerapporteerd heeft.

3.4 Toevoeging van harmonischen en hun invloed op zweepingfenomenen

Een theoretische consequentie van dit nieuwe toonhoogteperceptie model is dat het uitbreiden van het triplet met twee andere harmonischen onder de $1/f$ voorwaarde, waardoor de 1200+1400+1600,5(of 1599,5)+1800+2000 Hz reeks gevormd wordt, moet resulteren in een afwijkend zweepingfenomeen. Berekening toont dat het uiteindelijke resultaat van formule (12) zal veranderen in:

$$4\{1 + \cos[2\pi(0,5t)]\}\cos[2\pi(200t)] \quad (14)$$

Nu verandert tijdens de periode van 2 s de modulatiefactor $4\{1 + \cos[2\pi(0,5t)]\}$ slechts één keer tussen 0 en zijn maximale waarde 8. Dit betekent dat de zweeping in de 200 Hz grondtoon nog altijd krachtig is, maar met een 0,5 Hz frequentie dit doet, gehalveerd in vergelijking met het originele experiment van De Boer [39].

Experimenten met dergelijke residu geluidcomplexen, samengesteld volgens dit principe, kunnen worden waargenomen door elke luisteraar en bewijzen op positieve wijze dit theoretische resultaat in zweepingfenomenen. Opgemerkt kan worden dat dit fenomeen een onbekende anomalie vormt voor de bestaande gehoortheorie, omdat dit verschijnsel niet verklaard of voorspeld kan worden met de bestaande toonhoogteperceptie theorieën.

Meer dan dat, door de harmonische combinaties te veranderen kan het experimenteel bewezen worden dat de verlaging van de zweepingfrequentie van 1 Hz naar 0,5 Hz de frequentie van 200 Hz betreft, doorgaans de ‘ontbrekende grondtoon’ genoemd. Dit omdat de verandering in de zweepingfrequentie van 1 Hz naar 0,5 Hz ook gehoord wordt indien we de harmonische bijdragen van 1000+1200 Hz, respectievelijk 2000+2200 Hz, aan het triplet 1400+1600,5+1800 Hz toevoegen, ook nu weer onder het $1/f$ criterium als voorwaarde. Analytische berekeningen van het energie frequentiespectrum van de andere twee combinaties laten zien dat alleen het 1 Hz zweepingsignaal in de 200 Hz ontbrekende grondtoon van het triplet (zoals aangegeven in formule 13) verandert in een 0,5 Hz zweepingsignaal. (zie formule 14)

3.5 Verandering van de zwevingfrequentie door toevoeging van een laagfrequente stimulus

Een derde en zeer overtuigend experiment dat een sterk bewijs levert voor het bestaan van een differentiërend en kwadraterend slakkenhuis is gebaseerd op het toevoegen aan het 1400+1600,5+1800 Hz triplet van slechts één enkele lagere frequentie f_l welke een extra bijdrage tot de ontbrekende grondtoon genereert van 200 Hz, waardoor de bestaande 1 Hz zweving in het triplet verandert in een 0,5 Hz zweving in het vier tonen experiment.

Hier moet opnieuw het $1/f$ criterium gebruikt worden, aangevuld met een extra vermenigvuldigingsfactor 2 voor de lagere frequentie f_l . Dit teneinde de correct gewogen bijdrage tot de gecombineerde grondtoon van het 200 Hz signaal op het basilair membraan te verkrijgen. Tenslotte moet voor de lagere frequentie f_l gekozen worden voor 100 Hz, opdat het hiervoor genoemde kwadrateerproces voor deze enkelvoudige frequentie zal resulteren in een verdubbelde frequentie bijdrage op het basilair membraan.

Dit zal resulteren in het toevoegen van de juiste 200 Hz stimulus aan het basilair membraan signaal; noodzakelijk voor het veranderen van de 1 Hz zweving tengevolge van de modulatiefactor $4 \cos[2\pi(0,5t)]$ volgens formule (13) naar de zweving van 0,5 Hz tengevolge van de modulatiefactor $4\{1 + \cos[2\pi(0,5t)]\}$ volgens formule (14). Een zuivere frequentie van 200 Hz als geluidsdrubijdrage echter zou een 400 Hz stimulus op het basilair membraan opwekken en is daarom niet in staat tot het veranderen van de zwevingfrequentie die in de 200 Hz grondtoon bestaat.

Het uitvoeren van dit eenvoudige experiment laat zien dat, indien de amplitude berekend wordt volgens dit nieuwe theoretische concept, de van tevoren berekende 100 Hz bijdrage de zweving van 1 Hz, welke gehoord wordt in het 1400+1600,5+1800 Hz triplet, verandert in 0,5 Hz die te horen is in het 100+1400+1600,5+1800 Hz geluidsfragment, terwijl het 200 Hz signaal in een 200+1400+1600,5+1800 Hz geluidsfragment de zweving totaal niet verandert. Precies zoals we dat voorspeld hebben!

3.6 Schouten's verklaring voor de slagtoon van klokken moet opnieuw in revisie

Een opmerkelijk resultaat van deze experimenten is dat ze ook voorzien in een logische verklaring en oplossing voor het mysterie van de slagtoon van klokken. Dit reeds door Rayleigh [42] waargenomen en beschreven mysterieuze fenomeen, onderzocht door Jones [43] en waarvan later Schouten et al. [44] dachten de verklaring te hebben gevonden. Indien men een klok aanslaat wordt de bij aanvang gehoorde snel uitstervende frequentie in de praktijk waargenomen als de één octaaf lagere toon dan de verwachte grondtoon of toonhoogte van die klok.

Dit kan nu verklaard worden door gebruik te maken van het principe. In alle vroegere onderzoeken [42-44] werd de slagtoon van klokken vergeleken met een zuivere referentiefrequentie f_r , welke opgewekt werd door een stemvork of afgestemde frequentiegenerator.

Echter, tengevolge van het eerdergenoemde kwadrateerproces zal de referentiefrequentie f_r altijd een geluidsenergiebijdrage opwekken op het basilair membraan met een verdubbelde stimulusfrequentie $2f_r$, een feit dat tot op heden in de gangbare gehoortheorieën niet wordt onderkend. Als een gevolg daarvan is de frequentie van de slagtoon van een klok, welke feitelijk de meest prominente frequentie is onder de harmonischen in het geluidsenergie spectrum die het basilair membraan van de luisteraar stimuleren, identiek aan de verdubbelde frequentie $2f_r$ en dus niet aan de referentiefrequentie f_r van de overeenkomende geluidsdruk stimulus.

3.7 Is toonhoogteverschuiving in een onharmonisch tooncomplex met equidistante frequenties een illusie?

Reeds in 1929 berichtte Fletcher [45] al over een experiment dat alleen maar kunstmatig in het laboratorium gedaan kan worden en nooit zal optreden in de natuur. Hij rapporteerde dat de muzikale kwaliteit, welke de oorspronkelijke toon had, vernietigd werd in het geval dat alle frequentie bijdragen in het oorspronkelijk harmonische tooncomplex opgehoogd worden met nog 30 Hz, hetgeen betekende dat een volledig onharmonisch tooncomplex was gecreëerd. In 1940 beschreef Schouten [46] een vergelijkbaar experiment waarin de grondtoon en enkele van de andere lager genummerde harmonischen ontbraken. Er werd daarbij gevonden dat het gehoorde residu een opwaartse toonhoogteverschuiving kreeg in de richting van de overeenkomstige frequentieverschuiving. De Boer [39] herhaalde dit experiment en hij heeft de resultaten uitvoerig besproken.

Een geraadpleegde auditieve expert heeft ons willen doen geloven dat deze door getrainde onderzoekers waargenomen toonhoogteverschuiving – alhoewel hun waarnemingen duidelijk subjectief zijn – niet gemakkelijk verklaard kan worden door ons gehoorconcept dat uitgaat van differentiëren en kwadrateren.

Volgens de experimenten beschreven door De Boer kan de toonhoogte in zeer goede benadering beschouwd worden als zijnde gelijk aan de subharmonische frequentie van de centrale frequentie van het complex, welke het dichtst bij de verschilfrequentie uitkomt. Dit betekent voor het

$$1430+1630+1830+2030+2230+2430+2630 \text{ Hz}$$

tooncomplex, met een centrale frequentie van 2030 Hz en een verschilfrequentie van 200 Hz, één tiende van de 2030 Hz van de centrale frequentie, dus 203 Hz.

Om dus minder subjectieve experimentele gegevens te verkrijgen over wat er nu werkelijk gebeurt, hebben wij met meer geavanceerde apparatuur een reeks verge-

lijkbare experimenten uitgevoerd, waarbij we enkele experimentele voorzieningen extra hebben bijgevoegd. Voor de amplitudeverdeling in het tooncomplex hebben we weer de $1/f$ beperking gehanteerd en we hebben een ‘toonhoogte traceer mechanisme’ toegevoegd in de vorm van een dubbeltoon die of een toonhoogte opwekte die identiek was aan die van de verwachte toonhoogte of een toonhoogte die een paar Hz hoger of lager was.

In het eerste experiment hebben we het volgende tooncomplex gebruikt:

$$1400+1600+1800+2000+2200+2400+2600 \text{ Hz.}$$

Dit is duidelijk een harmonisch tooncomplex met 200 Hz als grondtoon of eerste harmonische. En waarbij de eerste zes harmonischen inclusief de grondtoon ontbreken. Berekeningen, volgens het principe uitgelegd in formule (10), resulteren in ons concept in een waarde van 12 voor de relatieve amplitude van de opgewekte grondtoon van 200 Hz. Voor een dergelijk harmonisch tooncomplex is het algemeen bekend dat de grondtoon gelijk is aan de toonhoogte.

Als we dus op het basilaire membraan met de overeenkomende eerste en tweede harmonischen, de 200 en de 400 Hz, een identieke toonhoogte van 200 Hz willen opwekken als het andere tooncomplex, onder de $1/f$ beperking, moeten we een relatieve amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$ bij beide frequenties invoeren.

Indien we daarentegen hetzij het dubbeltoon complex 201+402 Hz hetzij het dubbeltoon complex 199+398 Hz invoeren, wekken deze dubbeltonen een toonhoogte op van 201 Hz, respectievelijk 199 Hz. In combinatie met de 200 Hz toonhoogte van het zeven tonen harmonisch complex zullen de combinaties van beide toonhoogten resulteren in een toonhoogte van 200,5 Hz, respectievelijk 199,5 Hz, waarin in beide gevallen een zweving ontstaat van 1 Hz. Dit wordt exact zo gehoord als het wordt uitgerekend. En zelfs voor zeer lage niveaus van de geluidssignaal intensiteit.

Bij het volgende experiment gebruikten we het onharmonisch tooncomplex:

$$1430+1630+1830+2030+2230+2430+2630 \text{ Hz.}$$

Wij zijn geen onderzoekers die getraind zijn in muziek, dus wij konden niet de door anderen gemelde toonhoogte en zijn opwaartse verschuiving onderscheiden. Wij ervaren het geluid als nogal ruw.

Maar zoals De Boer [39] in zijn proefschrift heeft uitgelegd, kan deze toonhoogte het beste vergeleken worden met die van het harmonisch tooncomplex:

$$1421+1624+1827+2030+2233+2436+2639 \text{ Hz.}$$

Hier is volgens eerdere resultaten de toonhoogte gelijk aan 203 Hz, de eerste harmonische van deze reeks. Dus hebben wij getracht om deze toonhoogte te zoeken met het toonhoogte traceer mechanisme.

We probeerden als eerste benadering de dubbeltoon 203+406 Hz. Maar in plaats van het toevoegen van een extra intensiteit aan de toonhoogte hoorden wij duidelijk een 3 Hz zweving. Wanneer we echter de dubbeltoon 202+404 Hz gebruikten hoorden we een 2 Hz zweving en in het geval van de dubbeltoon 201+402 Hz hoorden we weer een 1 Hz zweving. Bij de dubbeltoon van 200+400 Hz verdween de zweving weer volledig en tenslotte in het geval van de dubbeltoon 199+398 Hz was de zweving van 1 Hz weer terug.

Omdat geen enkele onderzoeker een spoor kan vinden van een verschoven toonhoogte in deze zwevingsexperimenten, kan slechts als enige conclusie getrokken worden dat de verschoven toonhoogte, welke gehoord wordt door in muziekperceptie getrainde luisteraars, een illusie is. De werkelijke toonhoogte blijft dus 200 Hz, hetgeen overeenkomt met het geringste frequentieverschil in de onharmonische reeks.

3.8 Infrageluid kan ‘gehoord’ worden volgens het kwadrateerprincipe

In een experiment met een onharmonisch triplet met frequenties 1400+1600,5+1800 Hz, hebben wij dit triplet uitgebreid met een extra paar harmonischen hetzij aan de lage kant van het triplet, hetzij aan beide kanten van het triplet of aan de hoge kant van het triplet, teneinde een 5-tonen complex te vormen.

In dit 5-tonen complex verandert de zweving van 1 Hz in de hoorbare toonhoogte van 200 Hz, welke opgewekt wordt op het basilair membraan door het triplet, in een 0,5 Hz zweving in dezelfde toonhoogte van 200 Hz.

Dit manipuleren van een zweving beperkt zich niet tot toonhoogten boven de 20 tot 30 Hz ondergrensfrequentie in het gehoor; het is ook mogelijk om een zweving te manipuleren bij ‘toonhoogte’ frequenties die veel lager liggen dan deze ondergrens.

Als wij twee frequenties gebruiken, bijvoorbeeld 600+610 Hz, en we leggen de $1/f$ amplitude beperking weer op, zullen wij een toon horen van 605 Hz met een zweving in de vorm van een vibrato van 10 Hz. Dit fenomeen wordt gebruikelijk, maar dan wel foutief, verklaard als het zwevingeffect veroorzaakt door de combinatie van dicht bij elkaar gelegen frequenties. De volgende reeks experimenten toont duidelijk aan dat dit niet het geval is.

Als we een triplet bestaande uit 600+610+620 Hz gebruiken, horen wij dit nog altijd als een 10 Hz vibrato, maar nu met een toon van 610 Hz. Maar als we de 610 Hz frequentie in dit triplet veranderen in hetzij 609 hetzij 611 Hz, wordt het vibrato van 10 Hz gehoord met een extra 2 Hz zweving. Dit is het resultaat van een modulatie van het 10 Hz frequentieverschil tussen nul en de maximale amplitude binnen een interval van 0,5 seconden.

Wij kunnen dit duidelijk maken als wij één van de volgende frequentiecombinaties: 580+590; 590+630 of 630+640 Hz aan het triplet van 600+609(of 611)+620 Hz toevoegen. In dat geval horen wij hetzelfde effect als eerder beschreven is in paragraaf 3.5. De 2 Hz zweving in het vibrato van 10 Hz verandert in een 1 Hz zweving.

We moeten ons daarbij nog altijd bedenken dat de enige frequentie welke hiermee zo gemoduleerd kan worden die 10 Hz 'toonhoogte' is.

Hetzelfde effect treedt op in het geval wij aan het triplet van 600+609(of 611)+620 Hz een ander triplet toevoegen, zoals bijvoorbeeld 700+710+720 Hz. De beide tripletten samen creëren vier verschillende frequentie bijdragen in de vorm van infrageluid met gelijke amplitudes, namelijk: 9 Hz, 11 Hz en twee bijdragen van 10 Hz. Die vier bijdragen combineren zich tot een enkel 10 Hz frequentiesignaal met een zweving van 1 Hz en zijn daarom gehalveerd ten opzichte van de zweving van het eerste experiment.

Dat dit is wat er werkelijk gebeurt, kan worden waargenomen als wij de 710 Hz in het toegevoegde triplet veranderen in 709 of 711 Hz. In dat geval verandert de 1 Hz zweving in het 10 Hz vibrato opnieuw in de 2 Hz zweving. Maar als we vervolgens de fase van de 709 of 711 Hz veranderen in 180°, verdwijnt de 10 Hz zweving nagenoeg volledig en een niet gemoduleerd 20 Hz vibrato wordt daarvoor in de plaats gehoord.

Dit omdat de twee verschilfrequenties van 9 Hz en 11 Hz opgewekt door het 600+609(of 611)+620 Hz triplet en dezelfde twee verschilfrequenties van 9 Hz en 11 Hz, opgewekt door het 700+709(of 711)+720 Hz triplet, paarsgewijs praktisch nagenoeg dezelfde amplitude hebben, maar tegengestelde fases hebben. Zij heffen elkaars bijdragen nagenoeg volledig op. Wat overblijft is de combinatie van twee bijdragen van de verschilfrequentie van 20 Hz uit de frequentiecombinaties van 620–600 en 720–700 Hz, welke gehoord wordt als een 20 Hz vibrato.

De experimentele resultaten van al deze voorbeelden zullen u zonder twijfel doordrongen hebben van drie belangrijke fundamentele feiten.

- Alleen de toonhoogtefrequentie kan gemoduleerd worden door een vastgestelde afwijkende afstemming van één of meer van de hogere bijdragen.
- Deze toonhoogtefrequentie komt overeen met het verschil in frequentie tussen de opeenvolgende bijdragen in de toonreeks.
- Er bestaat geen enkele aanwijzing voor een toonhoogteverschuiving als alle bijdragen in de toonreeks in frequentie een zelfde frequentieverschuiving ondergaan hebben.

4. De rol van DC signalen in het orgaan van Corti en de cochleaire versterker

Als we realistische waarden voor de verschillende grootheden gebruiken, kan de invloed van de drukeffecten op het basilair membraan berekend worden. Uitwijkingen van het trommelvlies zijn ongeveer 0,1 micrometer. Voor een uitwijking met een frequentie van 1000 Hz, terwijl de dichtheid van de perilymfe geschat wordt op dezelfde als die van water, 1000 kg m^3 , en 1:1 gegeven wordt voor de versterking van de amplitude in de gehoorbeenteten, zal de constante druk op het basilair membraan 0,1 mPa zijn. Dit resulteert in een factor 5 boven 0 dB SPL, wat gelijk is aan $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$. Als de versterkingsfactor gelijk is aan de geschatte ‘drukoverdracht’ factor in de gehoorbeenteten van ongeveer 25, neemt de drukbelasting op het basilair membraan toe met een factor 625, tengevolge van het kwadrateren. Deze waarden worden zeer eenvoudig gedetecteerd, zeker als er voldoende resonantie-mogelijkheden aanwezig zijn in het basilair membraan om de noodzakelijke signalen in de gehoorzenuw op te wekken.

Dit mechanisme houdt verder in dat een constant geluidsdruksignaal ook een constant drukverschil Δp tussen beide zijden van het basilair membraan veroorzaakt, zoals getoond wordt in formule (10). Vervolgens resulteert de drukkaling in de scala tympani in een trekkracht over het volledige oppervlak van het membraan; dit veroorzaakt dat het basilair membraan van het tectoriaal membraan af beweegt.

Een toename met een factor twee in het niveau van elk constant geluidsdruksignaal in het uitwendige oorkanaal zal resulteren in een overeenkomstige toename van het constante drukniveau op het basilair membraan met een factor vier.

Dit kan aanschouwelijk gemaakt worden in formule (10) door alle A_i en A_j waarden te vervangen door respectievelijk $2A_i$ en $2A_j$.

Met dit model is een kandidaat gevonden voor de functie van logaritmische ‘luidheidsregeling’ in ons auditieve systeem. In het statische druksignaal zijn alle bijdragen van de originele Fourier componenten aanwezig en vormen de som van de kwadraten van alle amplitudes, zoals te zien is in formule (11). Bij nadere beschouwing wordt het duidelijk dat deze formule exact de gecombineerde gemiddelde geluidsenergie voorstelt.

De gemiddelde geluidsenergie verandert voortdurend in de tijd, omdat elke individuele perilymfesnelheidsamplitude bijdrage $A_i(t)$ ($i = 1$ to N) onafhankelijk of in combinatie met anderen kan veranderen in de tijd. Dit wordt weergegeven door de som van N tijdsafhankelijke termen in formule (15).

$$\Delta p(t) = -\frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \rho A_i^2(t) \quad (15)$$

Het bestaan van dit ‘quasistatische’ druksignaal op het basilair membraan leidt tot onze hypothese dat dit kan werken als feedbacksignaal, waarbij luidheid geregeld wordt door het veranderen van de spanning in de spiertjes in het middenoor. In het algemeen kan dit relatief langzaam veranderende signaal afgescheiden worden van alle andere, typisch als AC gehoorde signalen, door een laagdoorlaat filter. Trommelvlies en gehoorbeenketen verkrijgen dan een afstelling welke een hogere drempel inhoudt voor de gehoorgevoeligheid evenredig met de gemiddelde geluidsdruk geïnduceerd op het basilair membraan. Het is bekend dat het aanspannen van een membraan zijn uitwijkingen aanzienlijk reduceert. Voor het trommelvlies betekent dit dat door het aanspannen van de musculus tensor tympani de signaalvermindering kan variëren met een factor welke iets meer dan 30 keer bedraagt. Bovendien kan de aanspanning van de musculus stapedius de overdracht van de hefboom in de gehoorbeenketen tussen aambeeld en stijgbeugel ook nog eens met een factor 30 reduceren.

Indien elk van deze spiertjes individueel de maximale signaaloverdracht reductiefactoren genereert – als gevolg van het niveau van het gemiddelde geluidsenergie signaal – zal de gecombineerde verhouding tussen uitwijkingen van het trommelvlies en het ovale venster, welke het product is van beide factoren, gereduceerd worden met een factor van ruwweg 1000. Tenslotte resulteert dit in een snelheidsreductie van 1000 keer in de perilymfе vergeleken met de bewegingssnelheid van het trommelvlies. Echter de druk uitgeoefend op het basilair membraan zal door het kwadrateren tengevolge van het Bernoulli effect gereduceerd worden met een factor van één miljoen, hetgeen 60 dB betekent. Volledig analoog aan het irisdiafragma, dat zich aanpast bij toenemende of afnemende lichtintensiteit welke het oog treft, beschermt dit automatische feedbackregelsysteem continu ons gehoororgaan op de best mogelijke plaats: bij de ingang van het sensorische systeem.

Hier kan het effect van een 60 dB dynamisch bereik worden waargenomen. In een stille omgeving ligt de gehoordrempel iets boven 0 dB. In de maximaal acceptabele geluidsomgeving ligt die drempel op 60 dB. In de nu geldende gehoortheorie is dit wat men verwacht van de ‘cochleaire versterker’. In ons model echter is de versterker gesitueerd in het middenoor en niet in het slakkenhuis, alhoewel de verandering van de DC signaalcomponent in de cochleaire potentialen dient als detectiesignaal.

Eén vraag die echter nog beantwoord moet worden door zorgvuldige experimenten is dat zowel binnenste als buitenste haarcellen reageren op het gemiddelde geluidsintensiteit signaal, terwijl de binnenste haarcellen minder dan de buitenste haarcellen reageren op frequentiesignalen door lokale resonantie. De consequentie is dat buitenste haarcellen kwetsbaarder zijn voor frequentieafhankelijke schade dan binnenste haarcellen. Als de binnenste haarcellen verantwoordelijk zijn voor het signaal dat de aanpassing regelt van trommelvlies en gehoorbeenketen voor variërende inkomende geluidsenergie zal dit mechanisme minder kwetsbaar zijn voor overbelasting door frequentieafhankelijke signalen.

5. Het orgaan van Corti als een in hoge mate selectieve frequentieanalysator

De algemeen aanvaarde hypothese is dat alleen van binnenste haarcellen verwacht wordt dat ze signalen opwekken die de gehoorzenuw bereiken. Deze hypothese is gebaseerd op het idee dat het basilair membraan naar het tectoriaal membraan toe beweegt als reactie op de ontwikkelde drukgolven in het slakkenhuiskanaal (scala tympani en scala vestibuli). De reeds lang bestaande aanname daarbij bestaat eruit dat deze beweging van het basilair membraan schuifkrachten zal opwekken die de binnenste haarcellen stimuleren. En binnenste haarcellen zijn zeer gevoelig voor schuifkrachten, volgens Hudspeth et al. [47]. In ons functioneel concept echter is de opgewekte druk in het slakkenhuiskanaal geen drukgolf, maar een overal aanwezige druk die lager is dan de omgevingsdruk en daarom ervoor zorgt dat het basilair membraan alleen maar van het tectoriaal membraan af buigt. Dus de veronderstelde ontwikkeling van schuifkrachten, die de binnenste haarcellen zouden kunnen stimuleren, bestaan helemaal niet.

Het tectoriaal membraan ligt volledig binnen de scala media en is, afgezien van zijn bevestiging aan de stijve uit bot bestaande centrale as van het slakkenhuis, volledig omgeven door de in rust verkerende endolymfevloeistof. De morfologie en algehele structuur in ogenschouw nemend, is het veel waarschijnlijker dat het tectoriaal membraan dienst doet als een relatief onvervormbare positiereferentie. Met als consequentie dat het tectoriaal membraan geen bewegend object kan zijn. De rijen buitenste haarcellen zijn ingebed in het basilair membraan op die plaatsen langs de hoofdspiraal van het cochleaire kanaal, waar tengevolge van drukstimuli de grootste lokale verplaatsingen van het basilair membraan verwacht kunnen worden.

Sterker nog, de top van de haarbundel van een buitenste haarcel is verankerd in het tectoriaal membraan. Daarom ondergaan deze haarbundels een uitrekking indien het basilair membraan van het tectoriaal membraan af beweegt. Dit als het gevolg van de onderdruk – door het Bernoulli effect veroorzaakt – welke wordt opgewekt in de scala tympani door de heen en weer gaande beweging van de perilymfe.

Omdat het elektrische stroompje in de haarcel verantwoordelijk is voor het opwekken van de signaalbijdrage in de gehoorzenuw, is de rechtstreekse onderlinge verbinding van elke tien afferente axons van zenuwcellen naar de buitenste haarcellen zodanig dat een parallelschakeling van deze elektrische stroombronnen bereikt wordt. Zorgvuldige experimenten kunnen wellicht bewijzen dat de buitenste haarcellen inderdaad samenwerken teneinde een veel sterker gecombineerd signaal naar de auditieve cortex te zenden. Sterker nog, deze parallelschakeling maakt het orgaan van Corti minder kwetsbaar voor individuele haarcel uitval of plaatselijke schade.

Zoals vermeld, buigen het Reissner membraan en het basilair membraan af van het tectoriaal membraan en zullen daarom, in plaats van schuifkrachten die inwerken op de haarbundels van binnenste haarcellen, trekkrachten worden opgewekt in de buitenste haarcellen. De binnenste haarcellen echter zijn gesitueerd langs een strip dicht bij de rand, waar het basilair membraan verbonden is met de vaste wand. Dit betekent dat de binnenste haarcellen zich bevinden op plaatsen, waar zij nauwelijks kunnen worden beïnvloed door trillingen of uitwijkingen van het basilair membraan. Dus afgezien van relatief kleine verplaatsingen die voornamelijk geïnduceerd zijn door ongewenste mechanische vervormingen, wekken de binnenste haarcellen waarschijnlijk alleen signalen op ter compensatie van de invloed van die ongewenste vervormingen van het signaal. Daarom kan het aantal binnenste haarcellen veel kleiner zijn dan dat van de buitenste haarcellen, in de praktijk gereduceerd met een factor 10.

Bovendien zouden wij de volgende bijdrage willen introduceren; een artikel van Leibbrandt [48] dat voor het eerst gepubliceerd werd in 1966, maar dat pas zeer recent onder onze aandacht kwam. Tijdens ons contact met de auteur deelde hij ons mee dat dit artikel erg weinig erkenning of respons ontving van de wetenschappelijke gemeenschap in die tijd. Naar onze mening een duidelijke onrechtvaardigheid ten aanzien van deze publicatie en de bevindingen die erin staan. Wij willen daarom de volledige samenvatting van deze publicatie met u delen.

--- Bij cavia's zijn de cochleaire microfonische responsies bestudeerd gedurende stimulaties met harmonische hoge tonen complexen. In het bovenste deel van het slakkenhuis kon een sinusvormig signaal met de frequentie van de "ontbrekende grondtoon" worden geregistreerd. De amplitude van deze laagfrequente microfonische potentiaal (CM) in de derde winding van het slakkenhuis blijkt ongeveer gelijk te zijn aan de amplitude van de sterkste component van het hoge tonen complex dat in de basale winding geregistreerd werd. De "ontbrekende grondtoon" blijkt het bovenste deel van het slakkenhuis te stimuleren, hetgeen cochleaire analyse aantoont volgens een bepaald plaatsprincipe, hoewel blijkbaar niet het Fourier principe. ---

In deze publicatie vermeldt Leibbrandt dat naast de aanwezigheid van de ontbrekende grondtoon, hij ook het optreden van de somfrequenties van de geluidsdruk stimuli heeft waargenomen.

De experimentele resultaten die in deze publicatie vermeld zijn, bevestigen duidelijk onze beweringen. De elektronische signalen, die opgewekt worden in het orgaan van Corti, vertonen zeer veel overeenkomsten met het in frequentiecomponenten gesplitste geluidsenergie signaal.

6. Resonantieverschijnselen in het basilair membraan

Net als bij de primaire signaaloverdracht in het middenoor gedraagt het basilair membraan zich plaatselijk ook als een gedempt massa-veer systeem. Dit betekent dat de Fourier componenten, met frequenties dicht bij de lokale resonantiefrequentie door de drukbelasting op het basilair membraan, grotere bewegingen zullen produceren van het membraan en als gevolg daarvan ook een groter frequentiesignaal opwekken. Dit signaal kan sterk beïnvloed worden door de dempingsfactor in de lokale situatie. De gangbare opvatting dat een systeem in vloeistof niet of nauwelijks in resonantie kan komen is onjuist. De perilymfvloeistof die aanwezig is in de scala tympani en de endolymfvloeistof in scala media, aan weerskanten van het basilair membraan, omringen volledig het basilair membraan en het orgaan van Corti met vloeistof en creëren aldus de ‘onderwater piano’, waarbij algemeen gedacht wordt dat dit het resonantie effect negatief beïnvloedt. Echter de dubbeltoon maskeerexperimenten [49] wijzen op het bestaan van plaatsgebonden afstemming met een gemiddelde versterkingsfactor bij resonantie van 10^6 , overeenkomend met 60 dB. De aanwijzing voor die 60 dB resonantie wordt gevonden in deze experimenten. Het maskeerfrequentie signaal, dat niet tot resonantie binnen de testfrequentie zone resulteert, moet namelijk tenminste 50 – 60 dB hoger zijn dan dat van het testsignaal dat wel tot resonantie leidt.

De constructie van het auditieve systeem – deze nauwkeurige combinatie van geometrie en gebruik van materialen, inclusief vloeistoffen – leveren voorwaarden op die het systeem toestaan om zonder beperking te resoneren en te trillen. Daarna is het slechts een kwestie van de juiste afstemming.

Duidelijk is dat nogal wat Fourier frequentiecomponenten in de drukstimulus, met name die in de hogere frequenties, zulke hoge frequenties hebben dat het basilair membraan niet langer meer beschikt over de geschikte gebieden met de noodzakelijke resonantiefrequenties om hun verdubbelde frequentiesignalen over te brengen op de gehoorzenuw.

Deze frequenties liggen eenvoudigweg buiten het bereik van het ‘resonator venster’, wat gedefinieerd kan worden als het totale bereik van frequenties, waar het basilair membraan gevoeligheid voor bezit. Toch kan hun aanwezigheid gedetecteerd worden zolang ze in staat zijn de perilymfe in het cochleaire kanaal voldoende in beweging te brengen. Indien zij combineren met andere hoge frequenties kunnen deze frequenties in staat blijven om verschilfrequenties te creëren die wel hoorbaar zijn. In het kwadraterproces kunnen zij zelfs, in combinatie met andere hoorbare hogere frequenties, zowel nog net hoorbare somfrequenties als verschilfrequenties genereren. Ze blijven daarbij bijdragen leveren aan een triplet, dat als incompleet beschouwd wordt.

Als bijvoorbeeld in formule (10) de hoogste frequentie $2f_j$ te hoog is om een stimulus voor het basilaire membraan te zijn, kunnen de beide andere frequenties in het triplet $2f_i$ en $f_i + f_j$ samen met de verschilfrequentie $f_j - f_i$ nog wel aanwezig zijn in het totale signaal. Alleen de bijdrage met frequentie $2f_j$ in formule (10) draagt niet langer bij tot het signaal in het orgaan van Corti. In principe kunnen zowel de frequentie als de amplitude van de ontbrekende component gereconstrueerd worden door formule (10) te gebruiken.

Als de hersenen al deze informatie ontvangen, zal een eenvoudig experiment tonen dat het bestaan van de hoogste frequentie gedetecteerd kan worden. Zo veroorzaakt bijvoorbeeld het uitschakelen van deze signaalcomponent dat alleen de frequentie f_i overblijft en beide combinatiefrequenties verdwijnen. Het hierboven beschreven principe verklaart ook waarom een niet in componenten te ontbinden harmonisch hoge toon complex met een toonhoogte Δf , welke te laag is in relatie tot de gebruikte frequenties, nog altijd bijdraagt tot de totale luidheid van de grondtoon. Niet alle opeenvolgende frequenties in het tooncomplex kunnen afzonderlijk gehoord worden; hun gemeenschappelijke toonhoogte echter wordt nog altijd opgewekt als onderdeel van het geluidsenergie frequentiespectrum. Zelfs zwevingfenomenen kunnen worden gehoord als we geluidsfragmenten met hoge frequenties samenstellen.

Bijvoorbeeld bij wederom gebruik maken van de $1/f$ beperking als conditie, toont een luisterproef dat, hoewel geen van de frequenties als afzonderlijke toon gehoord kan worden in het samengestelde triplet van 7800+8000+8200 Hz, de verandering van de 8000 Hz frequentie in het triplet naar 8001 (of 7999) Hz ervoor zorgt dat de luisteraar een 2 Hz zweving hoort in een nogal onplezierig, schril en doordringend geluid, dat qua timbre gedomineerd wordt door de hoge frequenties. Het toevoegen van een ander triplet volgens de $1/f$ beperking, zoals 500+700+900 Hz, verandert niet alleen het schrille en doordringende geluid in een meer aanvaardbaar geluid, maar verandert ook de 2 Hz zweving in een 1 Hz zweving, terwijl het uiteindelijke terugzetten van de 8001(of 7999) Hz naar 8000 Hz resulteert in het volledige verdwijnen van het zwevingfenomeen.

Bovendien zullen in dit nieuwe model, aan de lage kant van het hoorbare frequentiespectrum, twee zeer dicht bij elkaar liggende frequenties, bijvoorbeeld 100 en 103 Hz met gelijke amplitudes een hoorbaar triplet opwekken op het basilaire membraan met frequenties van 200, 203 en 206 Hz, alsook een niet hoorbare verschilfrequentie van 3 Hz. Dit wordt nu gewoonlijk verklaard als het ontstaan van een resulterende 101,5 Hz toon met een zweving van 3 Hz.

In dit hoorbare triplet is de amplitude van de centrale piek van 203 Hz twee maal zo hoog als die van de 200 en 206 Hz frequenties. In het algemeen, uitsluitend gebaseerd op deze combinatie van frequenties, is het onmogelijk om deze drie verschillende tonen in het triplet afzonderlijk te onderscheiden.

Echter, als we goniometrische formules gebruiken, kunnen de beide tonen van 200 en 206 Hz gecombineerd worden. Dit resulteert in nog een bijdrage tot het 203 Hz signaal met een amplitude gelijk aan de reeds bestaande 203 Hz component, maar met een 100% amplitudemodulatie van 3 Hz, vergelijkbaar met hetgeen uit formule (13) af te lezen is.

Beide bijdragen tot de 203 Hz toon samengenomen leveren tenslotte een signaal op van 203 Hz met een sterke 3 Hz zweving, vergelijkbaar met hetgeen is weergegeven in formule (14).

7. Resonantiephenomenen van het basilair membraan in plaats van lopende golven

De andere reden voor de extreem hoge frequentieselectiviteit is te danken aan de hoge kwaliteitsfactor bij de resonantieprestaties van het basilair membraan. De relatieve piekwaarde voor de uitwijking bij een bepaalde resonantiefrequentie kan berekend worden met de algemene formule voor de amplitude van een tweedeorde resonantiesysteem. In het geval van een 1000 Hz resonantiefrequentie f_c en een versterkingsfactor van 60 dB zou dit 0,0003 Hz worden. Veel lager dan de in de praktijk gevonden waarde van 3 Hz.

Daarom los van de invloed van de detectie van som- en verschilfrequenties, veroorzaakt door één van de frequentie bijdragen aan en uit te schakelen, biedt de kwaliteitsfactor in de resonantie ook een duidelijk herkenbaar triplet van frequenties. De frequenties in dit triplet zijn van elkaar gescheiden, omdat de piekbreedte van elk van de drie dicht bijeen gelegen frequenties aanmerkelijk kleiner is dan hun onderlinge afstanden op de frequentieschaal.

Indien wij de faserelaties berekenen van datzelfde tweedeorde resonantiesysteem met de formule voor de fase, vinden wij dat voor membraan resonantiefrequenties hoger dan de stimulusfrequentie, de fase van de membraanbewegingen gelijk wordt aan de fase van de stimulusfrequentie. Voor membraan resonantiefrequenties die lager zijn dan die van de stimulusfrequentie, vertonen de bewegingen van het basilair membraan een achterlopende faseverschuiving van 180° . De fase voor de beweging van het basilair membraan bij de centerfrequentie loopt 90° achter. Dit betekent dat de gehoorzenuw het uiteindelijke signaal bijna uitsluitend van de bijdragen in het centrale frequentiegebied ontvangt. De bijdragen van de beide flanken echter heffen elkaar op tengevolge van hun gelijke amplitude, maar tegengestelde fase.

Deze wiskundige berekening toont voor de logaritmisches verdeelde resonantiefrequenties f_c van het basilair membraan de responskarakteristiek welke Ren [50] waarnam in zijn experimenten op gerbils: een lokaal zeer beperkt bewegingsverschijnsel, dat zich lijkt te verplaatsen langs het basilair membraan.

Naar onze mening is dit fenomeen foutief geïnterpreteerd als bewijs voor een ‘lopende golf’ over het basilair membraan. Dit is geen lopende golf, maar een ‘fasegolf’, welke bestaat uit coherente plaatsafhankelijke in fase verschoven lokale reacties op een stimulus die simultaan aanwezig is over het gehele basilair membraan.

Fig. 5. toont de opeenvolgende basilair membraanuitwijkingen in een reeks opeenvolgende stappen in de tijd van $T/12$ van één volledige afwikkeling van een harmonische trilling, hetgeen het typische uitwijkingsprofiel is in het gebied van de centrale frequentie f_c .

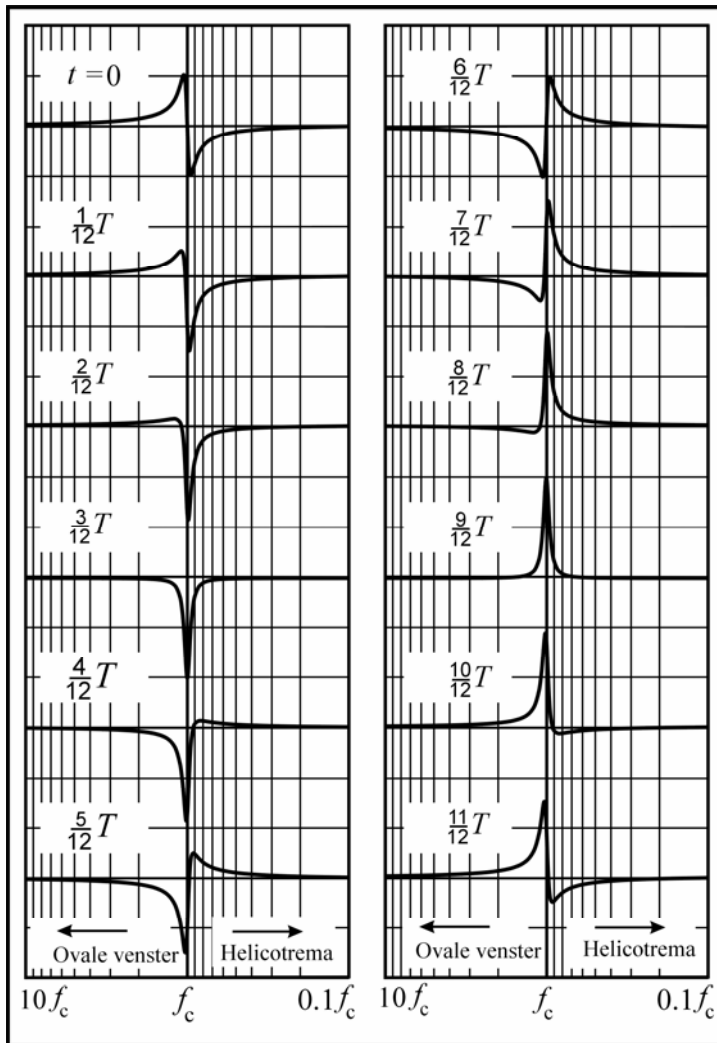


Fig. 5. Uitwijkingsprofielen van het basilair membraan rond f_c in opeenvolgende stappen van $T/12$ in de tijd

In eerdere experimenten gebruikte Von Békésy [1] energetisch krachtige trillingsstimuli, die onvermijdelijk harmonische vervormingen opwekten. Deze vervormingen wekken op andere locaties in het basilair membraan vervolgens hogere harmonische fasegolven op. Zulke gelijktijdig opgewekte hogere harmonische fasegolven zijn gelokaliseerd binnen vastgestelde gebieden – bepaald door hun frequentiegevoeligheid – tussen het ronde venster en het gebied op het basilair membraan dat actief is als gevolg van de stimulus door de grondtoon f_c .

Omdat deze hogere harmonischen coherent zijn in zowel fase als amplitude met hun grondtoon f_c , zullen hun overeenkomstige fasegolven op het basilair membraan ook coherent zijn. Het gevolg is dat bij toegepaste stroboscoopflitsen in hetzelfde ritme

als de grondtoon f_c , deze harmonischen net zo goed ‘bevroren’ zullen worden in telkens dezelfde vorm. Dit leidt gemakkelijk tot de foutieve waarneming dat er meer dan slechts één ‘afwikkeling’ van een golf aanwezig is, hetgeen de gedachte aan een verlengde ‘lopende golf’ versterkt.

Bovendien suggereren Wever, Lawrence en Von Békésy in een gezamenlijke publicatie [2] dat zij zich bewust zijn van het feit dat in het slakkenhuis een lopende golf, welke geluidsenergie meedraagt en dan deze energie overbrengt naar het basilair membraan, wel eens niet zou kunnen bestaan.

8. Conclusies

Onze zorgvuldige analyse van de resultaten die werden bereikt in de gehoorwerking experimenten, uitgevoerd door Wever en Lawrence [16], leidt ons tot de conclusie dat het gehoorzintuig het inkomende geluidsdruksignaal differentieert en kwadrateert. Met als resultaat dat het basilair membraan en het orgaan van Corti gestimuleerd worden met een signaal dat evenredig is met het geluidsenergie signaal.

Dit kan alleen maar verklaard worden door gebruik te maken van het Bernoulli effect. Niet alleen de appreciatie van $1/f$ geluidsstimuli wordt dan verklaarbaar, maar ook het bestaan van zowel DC (gelijkspanning) als AC (wisselspanning) componenten in de cochleaire potentiaal en de logische voorkeur voor harmonische tooncomplexen kunnen daarmee worden verklaard.

Het differentiëren en kwadrateren van inkomende geluidssignalen leveren samen ook het wiskundig mechanisme op dat de sterke bijdragen van combinatiefrequenties bij toonhoogteperceptie duidelijk lokaliseert in het slakkenhuis. Zelfs in het geval er sprake is van residu tooncomplexen en onvolledige harmonische tooncomplexen.

Opgemerkt moet worden dat het stijve omhulsel van het slakkenhuis nauwelijks vervormbaar is. Dit leidt tot de realistische hypothese dat ‘beengeleiding’ geluidssignalen stimuli kunnen opwekken met een vergelijkbaar proces als dat van de luchtgeleiding geluidsstimuli, namelijk door een heen en weer bewegen van de perilymfte, in dit geval, vanuit de schedelholte via het cochleair aqueduct.

Verder geldt dat de omhullende van de cochleaire potentiaal, welke evenredig is aan het gemiddelde geluidsenergie signaal – indien gefilterd via een laagdoorlaat filter en in samenwerking met de aanpassingsmogelijkheden van trommelvlies, gehoorbeenketen en middenoorspiertjes – voorziet in een hoogdynamisch versterkend regelsysteem. Zodat dit systeem niet alleen dienst doet als een beveiligingsvoorziening voor de tere structuren van het binnenoor, maar ook als automatisch regelsysteem voor de luidheid met een versterkingsfactor van 60 dB.

Inderdaad houdt ons model een in hoge mate realistisch alternatief in voor de locatie van de momenteel werkzaam gedachte cochleaire versterker, waarvan het bewijs nog altijd serieus betwijfeld wordt.

Als bewijs presenteren wij u de wiskundig voorspelbare voorbeelden van samengestelde geluidsfragmenten die stimuli opwekken in het slakkenhuis, stimuli die – ook al zijn ze niet aanwezig in het aangeboden geluidsdruksignaal zelf – door elke ongetrainde luisteraar kunnen worden waargenomen en geverifieerd. Dit bevestigt zeer sterk de door ons voorgestelde theorie betreffende de werking van het gehoorzintuig.

Een andere expert in pitch- of toonhoogteverschijnselen stelde in een persoonlijk contact met ons dat ons concept niet alle elementaire fenomenen, welke optreden bij de residutoonhoogte experimenten, zou kunnen verklaren. Deze zorgvuldige residutoonhoogte experimenten tonen echter duidelijk aan dat het tegenovergestelde waar is. Wij zijn er volledig van overtuigd dat de door ons uitgevoerde residutoonhoogte experimenten zeer succesvol zijn. Vooral omdat iedereen – zelfs diegenen, die niet getraind zijn in muziekperceptie – in staat zijn deze experimenten succesvol tot een einde te brengen.

Daarom zijn wij er van overtuigd dat ons cochleaire model voorziet in een duidelijke oplossing voor de nog altijd bestaande problemen die ook genoemd worden in Alain de Cheveigné's historische overzicht in zijn publicatie getiteld: "Pitch perceptiemodellen van het begin tot heden", welke gepubliceerd is op Internet [51].

Omdat de conclusies van De Cheveigné in deze publicatie van 2004 zo nauw in verband staan met hetgeen wij gevonden hebben, kunnen wij niet nalaten om het volgende daaruit te citeren:

--- Moderne ideeën zijn reïncarnaties van oudere ideeën en hun wortels reiken zover als er historische documenten daarover beschikbaar zijn. Modellen die heden ten dage met elkaar wedijveren, kunnen best gemeenschappelijke wortels hebben.

De historische benadering maakt het mogelijk overeenkomsten en verschillen in het juiste perspectief te zetten. Hopelijk kan dit helpen om onvruchtbare tegenstellingen te elimineren die soms schadelijk zijn voor de ontwikkeling van ideeën. Het zou ook van nut kunnen zijn om laten we zeggen voor nieuwkomers te begrijpen, waarom psycho-akoestici erin volharden om muzikale toonhoogte te bestuderen met onopgeloste stimuli (die nogal onmuzikaal klinken), waarom zij laagfrequente ruis toevoegen (wat de taken zelfs nog ingewikkelder maakt), enz.

De goede redenen voor deze gebruiken zijn gemakkelijker te begrijpen indien wij de debatten in ogenschouw nemen waaruit de hedendaagse toonhoogtetheorie zich ontwikkeld heeft. ---

Onze herziening en studie van het gehele samenstel van mechanismen en functies – feitelijk een nieuw en opwindend paradigma – stelt een ieder van ons in staat de meeste, zo niet alle tot op heden onopgeloste, mysteries en anomalieën in het functioneren van het gehoorzintuig te verklaren.

9. Dankbetuigingen

Wij, de auteurs *Pim Heerens* en *Sander de Ru*, zijn *Gaby de Neef* zeer dankbaar voor haar zorgvuldige vertaling in het Engels van het manuscript. We willen haar tevens bedanken voor de door haar aangeboden nuttige suggesties en niet in de laatste plaats voor haar geduld en begrip tijdens de vele uren werk.

We willen ook graag het waardevolle werk van *Mirjam Vonk* noemen. Na lezen en herlezen van het manuscript heeft zij commentaar geleverd op de leesbaarheid van dit boekje voor de meer ontwikkelde leek. Zij heeft een groot aantal redactionele, lay-out en punctuatie verbeteringen voorgesteld en typfouten gecorrigeerd. Daarnaast, was zij, als lid van de ‘*Gehoor Brainstormgroep*’, een ware tovenares bij het vinden voor *Pim* van relevante literatuur in de beschikbare bronnen op Internet.

We zijn ook *Yves Mangelinckx*, een ander lid van de ‘*Gehoor Brainstormgroep*’, zeer veel dank verschuldigd. Hij ontwikkelde op zeer slimme wijze het software-programma waarmee de geluidsexperimenten met vooraf berekende pitch- en zwingfenomenen samengesteld en onderzocht kunnen worden. Dankzij *Yves* kunnen onze lezers nu deze experimenten verifiëren na het downloaden van zijn programma van Internet.

We willen hier ook noemen de aanzienlijke steun welke *Wijnandt de Vries* geboden heeft gedurende onze eerste pogingen om onze inzichten en ideeën te promoten.

Pim, wil ook alle andere leden van de ‘*Gehoor Brainstormgroep*’ bedanken (in alfabetische volgorde) *Gerard Lettinck*, *Hans van Zetten*, *Juke Westendorp*, *Lucas Pannier* en *Tjipke Hoof* voor hun standvastige steun en waardevolle bijdragen tot dit werk en voor hun nog altijd voortdurende promotie inspanningen.

Een speciaal woord van dank moet gegeven worden aan *Rink Struikmans* – een gepensioneerd oud-collega in de fysica – voor zijn zeer nuttige wetenschappelijke commentaren en adviezen. In de loop der jaren is hij een zeer noodzakelijk klankbord geweest en hebben zijn adviezen een zeer substantiële waarde gehad voor *Pim*.

Sander, wil de gelegenheid te baat nemen om zijn dankbaarheid uit te spreken jegens zijn vader, *Jaap de Ru*, voor zijn aanhoudende ondersteuning en zijn vaak wijze en behulpzame commentaren gedurende de vele uren die hij besteedde aan het lezen van het grote aantal versies van dit manuscript.

Speciale woorden van dank van *Sander* gaan uit naar diens collega KNO-arts *Paul Struyvenberg* voor het lenen van zijn oor wanneer dat nodig was gedurende de afgelopen jaren, en naar Kolonel *J. de Graaf*, Commandant van het Centraal Militair Hospitaal, voor het feit dat hij *Sander* de vrijheid heeft gegeven om met dit wetenschappelijke project door te gaan.

Epiloog

U heeft net uw weg gezocht door ons model dat de intrigerende werking van het menselijk gehoorzintuig beschrijft. Een gehoormodel – feitelijk een nieuwe gehoortheorie – dat oplossingen biedt voor onopgeloste anomalieën, mysteries en vragen die bij voortduring vele KNO-artsen en experts op het gebied van de audiologie hebben getart en het werk hebben bemoeilijkt gedurende de afgelopen 150 jaar.

Een nieuw theoretisch concept is ontstaan. Het verandert radicaal de manier waarop wij denken dat ons gehoor functioneert. Deze publicatie levert daarvoor belangrijke principes die de basis vormen voor een nieuw begripen van het gehoorzintuig.

Helaas werden wij niet in staat gesteld om publicatie in de gebruikelijke wetenschappelijke tijdschriften gedaan te krijgen. Wij zijn er echter van overtuigd dat ons werk van grote betekenis kan zijn voor verder onderzoek naar aard en functioneren van ons gehoorzintuig, evenals gehoorbeperkingen. Uiteindelijk leidend tot de heroverweging van bestaande therapieën en de ontwikkeling van nieuwe behandelmethoden van slechthorendheid en andere verstoringen van het gehoorzintuig.

In wezen voelden wij ons gedwongen om ons werk in eigen beheer te publiceren en wij zouden zeer tevreden zijn als het een evenzeer noodzakelijke wetenschappelijke discussie zou lanceren. Wij hopen oprecht dat dit veel onderzoekers, gespecialiseerd in audiologie en otologie, zal stimuleren om resultaten, die zij uit hun eigen onderzoek beschikbaar hebben, te combineren en te vergelijken met onze gehoortheorie. Wij hopen ook dat onze theorie onderzoekers zal inspireren om nieuwe experimenten te ontwikkelen die onze beweringen verder kunnen staven. Wij zijn ervan overtuigd dat op die wijze gehooronderzoekers zich het belang van deze nieuwe theorie zullen realiseren voor hun respectievelijke terreinen van interesse.

Het heeft ons vele jaren gekost om tot deze eerste onafhankelijke publicatie te komen. U kunt er evenwel van verzekerd zijn dat dit in geen geval het einde betekent. Wij zijn eigenlijk pas begonnen. In een tweede uitgave zullen wij verder vorsen in de gehoorfenomenen en anomalieën die tot op heden niet verklaard kunnen worden binnen de huidige modellen. Gelukkig hebben wij inmiddels ervaren dat binnen onze theorie, wij in staat zijn op consistente wijze naadloze en logische verklaringen te geven voor deze mysterieuze fenomenen.

Een ruwe schets voor deze hoofdstukken begint vorm te krijgen. Deze diamanten polijsten vanuit hun ruwe staat zal echter nog een redelijke tijd vergen. Heerens en ik hebben er daarom voor gekozen om eerst de beginselen van ons model te publiceren; wij hopen dat deze publicatie zijn weg zal vinden naar veel onderzoekers en collega's zodat het een open en eerlijk debat kan initiëren, dat hopelijk veel van onze lezers zal overtuigen dat het inderdaad hoog tijd is voor een paradigmawisseling.

Referenties

1. Von Békésy G. (1960) *Experiments in Hearing*. Edited by E.G. Wever, McGraw-Hill, New York.
2. Wever EG, Lawrence M, Von Békésy G. (1954) A note on recent developments in auditory theory. *Proc Natl Acad Sci U S A* 40: 508–12.
3. Lamb H. (1994). *Hydrodynamics* (6th edition ed.). Cambridge University Press.
4. Plack CJ. (2005) *The Sense of Hearing*. Psychology Press, Philadelphia. 70 p.
5. Lighthill MJ. (1981) Energy flow in the cochlea. *J Fluid Mech* 106: 149-213.
6. Zwislocki JJ. (1950) Theory of the acoustical action of the cochlea. *JASA* 22: 778-784.
7. Ashmore JF. (1987) A fast motile response in guinea-pig outer hair cells: the cellular basis of the cochlear amplifier. *J Physiol* 388: 323-47.
8. Kachar B, Brownell WE, Altschuler R, Fex J. (1986) Electrokinetic shape changes of cochlear outer hair cells. *Nature* 322: 365-8.
9. Spector AA. (2005) Effectiveness, active energy produced by molecular motors, and nonlinear capacitance of the cochlear outer hair cell. *J Biomech Eng* 127:391-9.
10. Shera CA, Tubis A, Talmadge CL. (2004) Do forward- and backward-traveling waves occur within the cochlea? Countering the critique of Nobili et al. *J Assoc Res Otolaryngol* Dec 5(4): 349-59.
11. Nobili R, Vetesnik A, Turicchia L, Mammano F. (2003) Otoacoustic emissions from residual oscillations of the cochlear basilar membrane in a human ear model. *J Assoc Res Otolaryngol* 4(4): 478-94.
12. Ren T, Gillespie PG. (2007) A mechanism for active hearing. *Curr Opin Neurobiol* 17:498–503.
13. De Boer E, Zheng J, Porsov E, Nuttall AL. (2008) Inverted direction of wave propagation (IDWP) in the cochlea. *JASA* 123(3):1513-1521.
14. Ren T, He WX, Nuttall AL. (2006) Backward propagation of otoacoustic emissions in the cochlea. In *Auditory Mechanisms; Processes and Models*, edited by Nuttall AL, Ren T, Gillespie P, Grosh K, De Boer E (World Scientific, Singapore) 79-85.
15. He XW, Nuttall AL, Ren T. (2007) Two-tone distortion at different longitudinal locations on the basilar membrane. *Hear Res* 228: 112-122.
16. Wever EG, Lawrence, M. (1950) The acoustic pathways to the cochlea. *JASA* 22: 460-7.
17. Voss SE, Rosowski JJ, Peake WT. (1996) Is the pressure difference between the oval and round windows the stimulus for cochlear responses? *JASA* Sept 100(3): 1602-16.
18. Beltrame AM, Martini A, Prosser S, Giarbini N, Streitberger C. (2009) Coupling the Vibrant Soundbridge to cochlea round window. *Otol & Neurotol* 30: 194-201.
19. Stenfelt S, Hato N, Goode RL. (2004) Fluid volume displacement at the oval and round windows with air and bone conduction stimulation. *JASA* February 115 (2): 797-812.

20. Freeman S, Sichel J-Y and Sohmer H. (2000) Bone conduction experiments in animals – evidence for non-osseous mechanism. *Hear Res* 146: 72-80.
21. Sohmer H, Freeman S, Geal-Dor M, Adelman C, Savion I. (2000) Bone conduction experiments in humans – a fluid pathway from bone to ear. *Hear Res* 146: 81-88.
22. Carlborg B, Densert B, Densert O. (1982) Functional patency of the cochlear aqueduct. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 91: 209-215.
23. Yoshida M, Uemura T. (1991) Transmission of cerebrospinal fluid pressure changes to the inner ear and its effect on cochlear microphonics. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 248: 139-143.
24. Ritter FN, Lawrence M. (1965) A histological and experimental study of cochlear aqueduct patency in the adult human. *Laryngoscope* 75: 1224-1233.
25. Palva T, Dampert K. (1969) Human cochlear aqueduct. *Acta Otolaryngol Suppl* (Stockholm) 246: 1-58.
26. Rask-Andersen H, Stahle J, Wilbrand H. (1977) Human cochlear aqueduct and its accessory canals. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 86: 1-16.
27. Nomura, Y. (1984) Otological significance of the round window. *Adv Oto-Rhino-Laryngol* 33:1-162.
28. Gopen Q, Rosowski J, Merchant S. (1977) Anatomy of the normal human cochlear aqueduct with functional implications. *Hear Res* 107: 9-22.
29. Von Békésy G. (1936) Zur Physik des Mittelohres und über das Hören bei fehlerhaftem Trommelfell (Physics of the middle ear and on hearing with the eardrum absent). *Akust Z* 1: 13-23.
30. Tonndorf J. (1962) Experimental occlusion of both cochlear windows in Otosclerosis, edited by H. Schuhknecht (Little, Brown, Boston): 119-126.
31. Groen JJ, Hoogland GA. (1958) Bone conduction and otosclerosis of the round window. *Acta Otolaryngol* (Stockh) 49: 206-212.
32. De Coensel B, Botteldooren D, De Muer T. (2003) 1/f noise in rural and urban soundscapes. *Acta Acustica united with Acustica* 89(2): 287-95.
33. Manoussaki D, Dimitriadis EK, Chadwick RS. (2006) The cochlea's graded curvature effect on low frequency waves. *Phys Rev Lett* 96: 088701 March 3.
34. Davis H, Morgan CT, Hawkins JE, Galambos R, Smith FW. (1950) Temporary deafness following exposure to loud tones and noise. *Acta Otolaryngol Suppl* LXXXVIII: 4-57.
35. Mitchell C, Brummet RE, Vernon JA. (1977) Frequency effects of temporary N₁ depression following acoustic overload. *Arch Otolaryngol* 103: 117-123.
36. Cody AR, Johnstone BM. (1980) Single auditory neuron response during acute acoustic trauma. *Hear Res* 3: 3-16.
37. Cody AR, Johnstone BM. (1981) Acoustic trauma: Single neuron basis for the “half-octave shift”. *JASA* 70(3): 707-711.
38. Schouten JF. (1979) The perception of subjective tones. *Proc Kon Acad Wetensch (Neth)* (1938) 41:1086-1094 (reprinted in Schubert, Psychological acoustics (Benchmark papers in Acoustics, v. 13). 146-154.

39. De Boer E. (1956) On the “residue” in hearing. Thesis; University of Amsterdam.
40. De Cheveigné A. (2005) Pitch Perception Models. In: Plack CJ, Oxenham AJ, Fay RR, Popper AN, editors. *Pitch: Neural Coding and Perception*: 169 – 233. New York: Springer Science + Business Media, Inc. ISBN 10: 0-387-2347-1.
41. Monahan PJ, de Souza K, Idsardi WJ. (2008) Neuromagnetic evidence for early auditory restoration of fundamental pitch. *PLoS One* August 6.
42. Rayleigh Lord. (1890) On bells. *Phil Mag* 29: 1-17.
43. Jones, AT. (1930) The Strike Note of Bells. *JASA* 1: 373-381.
44. Schouten JF, ‘t Hart J. (1965) The Strike Note of Bells. *Neth Acoust Soc* 7: 8-19.
45. Fletcher H. (1929) *Speech and Hearing*. McMillan London: page 248.
46. Schouten JF. (1940) The perception of pitch. *Philips Techn Rev* 5: 286-294.
47. Hudspeth AJ, Jacobs R. (1979) Stereocilia mediate transduction in vertebrate hair cells. *Proc Nat Acad Sci USA* 76: 1506-9.
48. Leibbrandt CC. (1966) Periodicity analysis in the guinea pig cochlea. *Acta Otolaryngol* 61, 413-422.
49. Allen JB, Sen D. (1998) An unified theory of Two Tone Suppression and the Upward Spread of Masking. *JASA* 103: (5). In: *Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics (ICA) and 135th meeting of the Acoustical Society of America*, (1998).
50. Ren T. (2002) Longitudinal pattern of basilar membrane vibration in the sensitive cochlea. *Proc Nat Acad Sci USA* 99: 17101-6.
51. De Cheveigné A. (2004) Pitch perception models from origins to today. *International Conference on Acoustics, Kyoto*. http://audition.ens.fr/adc/pdf/2004_ICA.pdf

Appendices

Appendix I

Zelf berekenen van de te verifiëren residutoonhoogte en zwevingfenomenen

Willem Chr. Heerens, Yves Mangelinckx & J. Alexander de Ru

Dit programma is ALLEEN voor computersystemen die werken onder Windows XP en Vista

A I.1 Inleiding

Appendix I en de daaraan gekoppelde software – een berekeningsprogramma dat door Yves Mangelinckx is ontworpen en te downloaden van Internet – leveren u gezamenlijk de mogelijkheid om de voorspelde residutoonhoogte en zwevingfenomenen, die beschreven zijn in Hoofdstuk 3 van dit boekje, te verifiëren.

U kunt het softwareprogramma downloaden via de volgende websites:

<http://www.een-andere-kijk-op-horen.nl/>

of

<http://www.a3ccm-apmas-eakoh.be/>

Dit softwareprogramma vormt de experimentele basis voor het bovengenoemde hoofdstuk en stelt u in staat om de zweving- en residuexperimenten te verifiëren die zijn verklaard in Hoofdstuk 3.

Vul bij elk experiment beschreven in deze paragrafen eenvoudig de bijbehorende frequenties in het programma in en start de berekening. U zult vervolgens in staat gesteld worden om te luisteren naar de geluidsfragmenten. De geluidsfragmenten kunnen beluisterd worden via de standaard audio softwareprogramma's zoals Windows Media Player of iTunes.

Het programma kan eenvoudig geïnstalleerd worden op computersystemen die onder Windows XP of Vista werken.

A I.2 Hoe het softwareprogramma te gebruiken na de installatie

Na downloaden en installeren van dit programma – in een aparte directory – gaat u verder met de volgende 8 stappen:

1. Open de directory van het programma en klik op de executable file genaamd **Perception_Calculations.application**, het programma invulscherm komt op. [Zie voor de schermafbeelding ook Fig. A.1]
2. Selecteer de duur van het te horen geluidscapex in de eerste regel. Stappen van **5 sec.** van **05 / 10 [default] / 15 / 20 / 25 / 30 sec.** [Wij adviseren u echter om gebruik te maken van 20 sec. bij experimenten waar u het aantal zvevingen moet tellen in die periode]
3. Vul de frequentiecomponenten in de vakjes in aangeduid met **f0; f1; f2;** etc... [Vakjes niet in gebruik blijven leeg. Maximum aantal frequenties 10]
4. Selecteer de amplitudecriteria voor elke frequentie door te schakelen met \updownarrow [**1/f amplitude** [default] voor gelijke energiebijdrage of **amplitude 1** voor gelijke geluidsdrakbijdrage]
5. Vul per frequentie in de extra te gebruiken vermenigvuldigingsfactor voor de amplitude in de linkerkolom. [**Extra Multiply Amplitude 1** [default] of **>1**]
6. Selecteer sinus- of cosinusfunctie voor elke frequentie door te schakelen met \updownarrow [**sin**[default] of **cos**]
7. Selecteer de gewenste fase voor elke frequentie door te schakelen met \updownarrow [**0 degree** [default], anders tussen **0°** en **360°**]
8. Selecteer hoe u het samengestelde geluidscapex wilt horen of de wavelet wilt opslaan op uw PC met de hieronder getoonde knoppen:

Voor de standaard sound machine in Windows XP klik op:

Build wave and Play. !XP Only! (Play within this form).

Voor de sound machine geïnstalleerd op uw PC klik op:

Build wave and Play. (Play: System.Diagnostics.Process).

Voor de opslag van een wavelet op uw PC klik op:

Write wave as ...

en volg daarna de verdere instructies.

Opmerking

Of u een punt of komma voor de decimale notering moet gebruiken in dit programma, hangt af van de instelling van uw computersysteem.

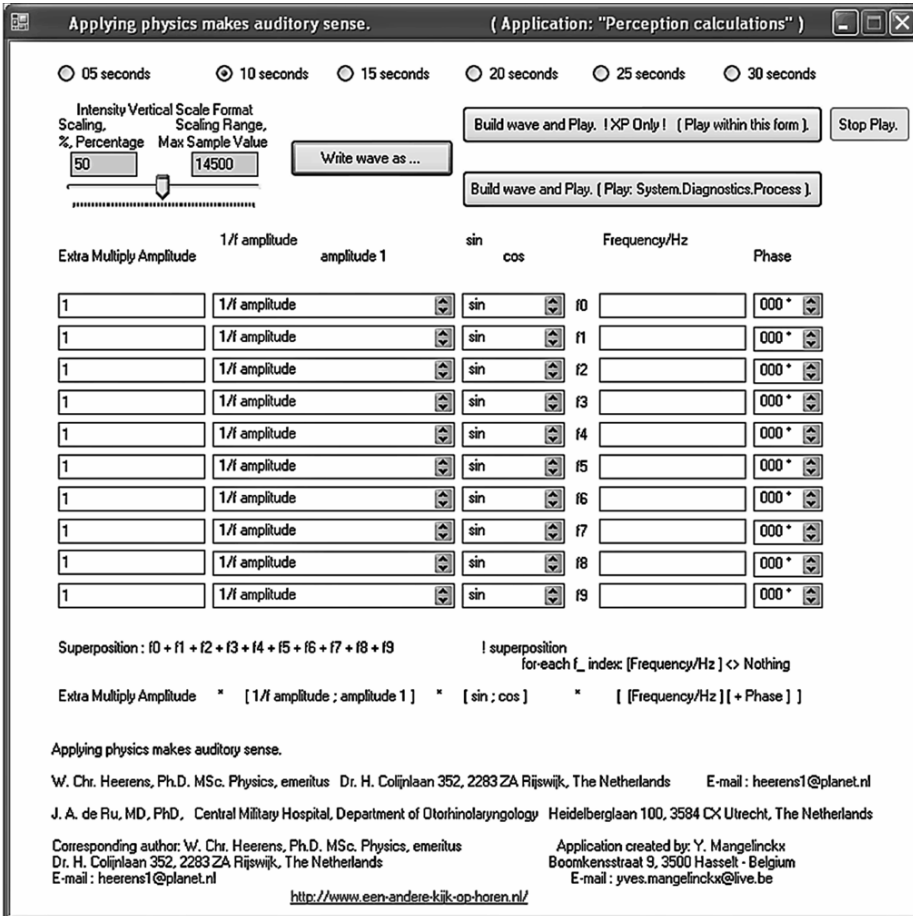


Fig. A.1. Lay-out van het opkomende invulscherm

A I.3 Mogelijke berekeningen die dit programma u toestaat te maken

Natuurlijk kunt u alle frequenties in de gegeven voorbeelden variëren om uzelf ervan te overtuigen dat de keuze van frequentiecombinaties in werkelijkheid niet zo belangrijk is, zolang als de verschillen tussen opeenvolgende frequenties gelijk zijn. Dit komt namelijk omdat de gehoorde pitch opgebouwd is uit de gecombineerde verschilfrequenties.

U moet er ook zeker van zijn dat u de juiste verandering van de originele waarde invoert indien een frequentieverstoring van een paar Hz van die gelijke afstanden nodig is voor het zwevingsexperiment.

Het inbrengen van een reeks van 5 frequenties f_0, f_1, f_2, f_3, f_4 , in het berekenings-
scherm, terwijl alle andere instellingen op de default waarde blijven, zal leiden tot de
berekening van het geluidsfragment S dat opgebouwd is volgens de Fourier reeks als
functie van de tijd:

$$S = \frac{A}{f_0} \sin(2\pi f_0 t) + \frac{A}{f_1} \sin(2\pi f_1 t) + \frac{A}{f_2} \sin(2\pi f_2 t) + \frac{A}{f_3} \sin(2\pi f_3 t) + \frac{A}{f_4} \sin(2\pi f_4 t)$$

A I.4 De verschillende experimenten

Voor uw gemak zijn alle volgende experimenten genummerd en aangeduid met hun
eerdere beschrijving (experimenten) in Hoofdstuk 3.

3.2. Toonhoogteperceptie in incomplete harmonische geluidscplexen

Experiment 3.2.0

Als u gebruik maakt van de frequenties:

$$f_0 = 200 \text{ Hz}; f_1 = 400 \text{ Hz}; f_2 = 700 \text{ Hz en } f_3 = 900 \text{ Hz}$$

hoort u een harmonische toon.

Experiment 3.2.1

Aan de frequenties in Experiment 3.2.0 kunt u toevoegen de extra toon:

$$f_4 = 99 \text{ Hz of } f_4 = 101 \text{ Hz met Extra Multiply Amplitude 2}$$

[hetgeen het testsignaal is voor toonhoogtebepaling]

en u hoort dan een zweving van 2 Hz.

[20 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent $20:10 = 2$ Hz zweving]

3.3. Residu toonhoogteperceptie in onharmonische toonreeksen

Experiment 3.3.0

Als u gebruik maakt van de frequenties:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1600 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

hoort u een harmonische toon.

Experiment 3.3.1

Als u de middelste frequentie verandert van:

$$f_1 = 1600 \text{ Hz in } f_1 = 1600,5 \text{ Hz}$$

waardoor het triplet verandert in:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz; } f_1 = 1600,5 \text{ Hz; } f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

dan hoort u dezelfde harmonische toon als in Experiment 3.3.0, maar met een 1 Hz zweving.

[10 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent 10:10 = 1 Hz zweving]

Experiment 3.3.2

Als u de middelste frequentie verandert van:

$$f_1 = 1600 \text{ Hz in } f_1 = 1599,5 \text{ Hz}$$

waardoor het triplet verandert in:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz; } f_1 = 1599,5 \text{ Hz; } f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

dan hoort u dezelfde harmonische toon als in Experiment 3.3.0, maar opnieuw met een 1 Hz zweving.

[10 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent 10:10 = 1 Hz zweving]

3.4. Toevoeging van harmonischen en hun invloed op zwevingfenomenen

Experiment 3.4.0

Aan het triplet in Experiment 3.3.2 kunt u nog twee frequentiebijdragen toevoegen:

$$f_3 = 1200 \text{ Hz en } f_4 = 2000 \text{ Hz}$$

waardoor u het 5-tonen complex samenstelt:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz; } f_1 = 1599,5 \text{ Hz; } f_2 = 1800 \text{ Hz; } f_3 = 1200 \text{ Hz; } f_4 = 2000 \text{ Hz}$$

en u hoort dan een harmonische toon met een 0,5 Hz zweving.

[5 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent 5:10 = 0,5 Hz zweving]

Experiment 3.4.1

Aan het triplet in Experiment 3.3.2 kunt u twee andere frequentiebijdragen toevoegen:

$$f_3 = 1000 \text{ Hz en } f_4 = 1200 \text{ Hz in plaats van: } f_3 = 1200 \text{ Hz en } f_4 = 2000 \text{ Hz}$$

en u hoort dan opnieuw een harmonische toon met een 0,5 Hz zweving, maar met een ander timbre.

Experiment 3.4.2

Aan het triplet in Experiment 3.3.2 kunt u twee andere frequentiebijdragen toevoegen:

$$f_3 = 2000 \text{ Hz en } f_4 = 2200 \text{ Hz in plaats van: } f_3 = 1000 \text{ Hz en } f_4 = 1200 \text{ Hz}$$

en u hoort dan opnieuw een harmonische toon met een 0,5 Hz zweving, maar wel met nog een ander timbre.

Opmerking

Indien u het moeilijk vindt om een 0,5 Hz zweving te onderscheiden en te tellen, kunt u ook gebruik maken van:

$$f_1 = 1601 \text{ Hz of } f_1 = 1599 \text{ Hz}$$

alle zwevingfenomenen zullen dan verdubbelen in frequentie.

De zweving in de tripletten zal dan gehoord worden als 2 Hz, terwijl deze 2 Hz zweving zal veranderen in 1 Hz in de 5-tonen complexen.

3.5. Verandering van de zwevingfrequentie door toevoeging van een laagfrequente stimulus

Experiment 3.5.1

Als u gebruik maakt van het triplet:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz; } f_1 = 1601 \text{ Hz; } f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

dan hoort u een harmonisch tooncomplex met een zweving van 2 Hz.

Experiment 3.5.2

Aan het triplet in Experiment 3.5.1 kunt u toevoegen het testsignaal:

$$f_3 = 100 \text{ Hz met Extra Multiply Amplitude 2}$$

[hetgeen in dit geval het testsignaal is voor toonhoogtebepaling]

u hoort dan het vorige harmonisch tooncomplex – met een zweving van 2 Hz – veranderen in een harmonisch tooncomplex met een veel lager timbre en met een zweving van 1 Hz.

Experiment 3.5.3

Aan het triplet in Experiment 3.5.1 kunt u toevoegen het testsignaal:

$$f_3 = 200 \text{ Hz met Extra Multiply Amplitude } \geq \sqrt{2} = 1,4142$$

en u hoort dan dat in het vorige harmonisch tooncomplex het timbre verandert, maar dat de zweving van 2 Hz niet verandert.

3.7. Is toonhoogteverschuiving in een onharmonisch tooncomplex met equidistante frequenties een illusie?

Experiment 3.7.0

Als u gebruik maakt van de frequenties van het 7-tonen complex:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1600 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}; f_3 = 2000 \text{ Hz}; f_4 = 2200 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2400 \text{ Hz en } f_6 = 2600 \text{ Hz}$$

hoort u een harmonische toon.

Experiment 3.7.1

Aan het 7-tonen complex in Experiment 3.7.0 kunt u toevoegen de dubbeltoon bijdrage:

$f_7 = 201 \text{ Hz}; f_8 = 402 \text{ Hz}$; met een Extra Multiply Amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$ waardoor u het 9-tonen complex samenstelt:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1600 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}; f_3 = 2000 \text{ Hz}; f_4 = 2200 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2400 \text{ Hz}; f_6 = 2600 \text{ Hz}; f_7 = 201 \text{ Hz en } f_8 = 402 \text{ Hz}$$

en u hoort dan een harmonische toon met een lager timbre dan in Experiment 3.7.0 en een 1 Hz zweving.

Experiment 3.7.2

Aan het 7-tonen complex in Experiment 3.7.0 kunt u toevoegen de dubbeltoon bijdrage:

$f_7 = 199 \text{ Hz}; f_8 = 398 \text{ Hz}$; met een Extra Multiply Amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$ en u hoort dan een nagenoeg gelijke harmonische toon als in Experiment 3.7.1, met opnieuw een 1 Hz zweving.

Experiment 3.7.3

Als u gebruik maakt van de frequenties:

$$f_0 = 1430 \text{ Hz}; f_1 = 1630 \text{ Hz}; f_2 = 1830 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2230 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2430 \text{ Hz en } f_6 = 2630 \text{ Hz}$$

hoort u een onharmonische toon.

Opmerking

Zoals gerapporteerd is door De Boer en anderen, zijn muzikaal goed getrainde luisteraars in staat om de toonhoogte en haar verschuiving naar een hogere frequentie te onderkennen. Wij ervaren het geluid als nogal ruw.

Experiment 3.7.4

In zijn proefschrift heeft De Boer [A I 1] uitgelegd dat de toonhoogte van Experiment 3.7.3 het beste vergeleken kan worden met de toonhoogte van het harmonisch tooncomplex waarvoor u kunt invullen:

$$f_0 = 1421 \text{ Hz}; f_1 = 1624 \text{ Hz}; f_2 = 1827 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2233 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2436 \text{ Hz en } f_6 = 2639 \text{ Hz}$$

en dan hoort u een harmonische toon.

Opmerking

Hier is – in overeenstemming met eerdere resultaten – de toonhoogte gelijk aan 203 Hz, de eerste harmonische in deze reeks.

Experiment 3.7.5

Aan het 7-tonen complex in Experiment 3.7.4 kunt u een dubbeltoon bijdrage toevoegen:

$f_7 = 203 \text{ Hz}; f_8 = 406 \text{ Hz}$; met een Extra Multiply Amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$ waardoor u het 9-tonen complex samenstelt:

$$f_0 = 1421 \text{ Hz}; f_1 = 1624 \text{ Hz}; f_2 = 1827 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2233 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2436 \text{ Hz}; f_6 = 2639 \text{ Hz}; f_7 = 203 \text{ Hz en } f_8 = 406 \text{ Hz}$$

en u hoort dan een constante harmonische toon met een lager timbre dan in Experiment 3.7.4, dus geen zweving.

Opmerking

Daarom zullen wij in het onharmonisch 7-tonen complex van Experiment 3.7.3 proberen te zoeken naar deze toonhoogte door middel van het toonhoogte traceer mechanisme. Dat bestaat eruit dat u een dubbeltoon aan het tooncomplex gaat toevoegen. Dit zal nu dus hier gebeuren met de te verwachten toonhoogte van 203 Hz.

In Experiment 3.7.6 zullen we beginnen met de dubbeltoon van 203 en 406 Hz, omdat we de toonhoogte van 203 Hz kunnen verwachten die De Boer heeft voorspeld.

En als hij het juist heeft, zult u geen zweving horen bij deze dubbeltoon test.

Experiment 3.7.6

Aan het 7-tonen complex in Experiment 3.7.3 kunt u de dubbeltoon bijdrage toevoegen:

$f_7 = 203 \text{ Hz}$; $f_8 = 406 \text{ Hz}$; met een Extra Multiply Amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$ waardoor u het 9-tonen complex samenstelt:

$$f_0 = 1430 \text{ Hz}; f_1 = 1630 \text{ Hz}; f_2 = 1830 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2230 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2430 \text{ Hz}; f_6 = 2630 \text{ Hz}; f_7 = 203 \text{ Hz} \text{ en } f_8 = 406 \text{ Hz}$$

en u hoort dan een onharmonische toon met een lager timbre dan in Experiment 3.7.3. Maar, in plaats van het horen van de verwachte extra intensiteit in de toonhoogte, hoort u duidelijk een 3 Hz zweving.

Experiment 3.7.7

Als u de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangt door de dubbeltoon:

$$f_7 = 202 \text{ Hz}; f_8 = 404 \text{ Hz}$$

hoort u hetzelfde timbre als in Experiment 3.7.6, maar met een zweving van 2 Hz.

Experiment 3.7.8

Als u de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangt door: $f_7 = 201 \text{ Hz}$; $f_8 = 402 \text{ Hz}$ hoort u een zweving van 1 Hz.

Experiment 3.7.9

Als u de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangt door: $f_7 = 200 \text{ Hz}$; $f_8 = 400 \text{ Hz}$ verdwijnt de zweving volledig.

Experiment 3.7.10

Als u de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangt door: $f_7 = 199 \text{ Hz}$; $f_8 = 398 \text{ Hz}$ keert de zweving die u hoort weer terug naar 1 Hz.

Opmerking

Daar geen enkele onderzoeker ook maar één spoor kan vinden van een verschuiving in de toonhoogte bij deze zwevingsexperimenten is de enige mogelijke conclusie die we kunnen trekken, dat de toonhoogte, welke door in muziek-perceptie getrainde luisteraars wordt waargenomen en als zodanig wordt gerapporteerd, feitelijk een illusie is.

De werkelijke toonhoogte blijft onveranderd 200 Hz, hetgeen het kleinste frequentieverschil is in de onharmonische toonreeks.

3.8. Infrageluid kan ‘gehoord’ worden volgens het kwadrateerprincipe

Experiment 3.8.0

Als u gebruik maakt van de dubbeltoon frequenties:

$$f_0 = 600 \text{ Hz en } f_1 = 610 \text{ Hz}$$

denkt u een toon te horen van 605 Hz met een vibrato van 10 Hz.

Opmerking

Dit wordt gewoonlijk verklaard als het zwevingeffect van de combinatie van de twee dicht bij elkaar gelegen frequenties. Maar zo werkt het niet. Dit kan aangetoond worden in de volgende reeks experimenten.

Experiment 3.8.1

Als u gebruik maakt van de tripletfrequenties:

$$f_0 = 600 \text{ Hz; } f_1 = 610 \text{ Hz en } f_2 = 620 \text{ Hz}$$

hoort u nog steeds een toon van 610 Hz met een zweving in de vorm van een 10 Hz vibrato.

Experiment 3.8.2 – 3.8.3

Als u de frequentie $f_1 = 610$ Hz verandert in de frequentie 609 Hz of 611 Hz creëert u het triplet:

$$f_0 = 600 \text{ Hz; } f_1 = 609 \text{ Hz (of } f_1 = 611 \text{ Hz) en } f_2 = 620 \text{ Hz}$$

en u hoort dan een toon van 610 Hz met een 10 Hz vibrato, maar dat vibrato bezit wel een extra zweving van 2 Hz.

Experiment 3.8.4 – 3.8.5 – 3.8.6

Maar als u één van de volgende combinaties toevoegt aan het triplet in Experiment 3.8.2 of 3.8.3:

$$f_3 = 580 \text{ Hz en } f_4 = 590 \text{ Hz}$$

$$\text{of: } f_3 = 590 \text{ Hz en } f_4 = 630 \text{ Hz}$$

$$\text{of: } f_3 = 630 \text{ Hz en } f_4 = 640 \text{ Hz}$$

hoort u dat die extra 2 Hz zweving is veranderd in een 1 Hz zweving.

Opmerking

U moet zich ook realiseren dat de enige frequentie die hierbij gemoduleerd kan worden de 10 Hz ‘grondtoon’ is.

Experiment 3.8.7

Aan het triplet in Experiment 3.8.2 of 3.8.3 kunt u nog een triplet toevoegen:

$$f_3 = 700 \text{ Hz}; f_4 = 710 \text{ Hz} \text{ en } f_5 = 720 \text{ Hz}$$

u hoort dan dat, afgezien van een verandering in het timbre, ook de extra 2 Hz zweeping in het 10 Hz vibrato veranderd is in een zweeping van 1 Hz.

Opmerking

De combinatie van de vier verschilfrequentie bijdragen van 9; 2 maal 10 en 11 Hz resulteert in een signaal van 10 Hz met een zweeping van 1 Hz. Dus gehalveerd ten opzichte van de zweeping in Experiment 3.8.2 of 3.8.3.

Experiment 3.8.8

In het toegevoegde triplet in Experiment 3.8.7 kunt u de frequentie $f_4 = 710$ Hz veranderen in $f_4 = 711$ Hz, zodat dit triplet wordt:

$$f_3 = 700 \text{ Hz}; f_4 = 711 \text{ Hz} \text{ en } f_5 = 720$$

en u hoort dat de extra 1 Hz zweeping in het 10 Hz vibrato opnieuw veranderd is in een zweeping van 2 Hz.

Experiment 3.8.9

Wanneer u vervolgens in Experiment 3.8.8 de fase van f_4 verandert in 180° hoort u dat de 10 Hz zweeping nagenoeg volledig verdwenen is en een niet gemoduleerd 20 Hz vibrato daarvoor in de plaats gehoord wordt.

Opmerking

Dit treedt op omdat de beide verschilfrequenties van 9 Hz en 11 Hz (opgewekt door het 600 + 609 (of 611) + 620 Hz triplet) en dezelfde twee verschilfrequenties van 9 Hz en 11 Hz (opgewekt door het 700 + 709 (of 711) + 720 Hz triplet) – paarsgewijs – praktisch gelijk in amplitude zijn, maar tegengestelde fase bezitten. Zij heffen daarom elkaars bijdragen vrijwel volledig op.

Wat overblijft is de combinatie van twee bijdragen van de verschilfrequenties van 20 Hz, ontstaan uit de combinaties 620 – 600 en 720 – 700 Hz, welke gehoord wordt als een 20 Hz vibrato.

Literatuur

- A 11. De Boer E. (1956) On the “residue” in hearing. Proefschrift; Universiteit van Amsterdam.

Appendix II

De residutoonhoogte en zwevingfenomenen die in de praktijk te horen zijn

Willem Chr. Heerens, Yves Mangelinckx & J. Alexander de Ru

Een directe presentatie van samengestelde geluidsfragmenten
als resultaat van onze experimenten

A II.1 Inleiding

Deze Appendix II en de daaraan gekoppelde geluidsfragmenten, berekend met het programma dat door Yves Mangelinckx is ontworpen, leveren u de mogelijkheid om te luisteren naar de voorspelde residutoonhoogte en zwevingfenomenen, die beschreven zijn in Hoofdstuk 3 van dit boekje.

Voor elk experiment beschreven in Hoofdstuk 3 hebben wij de corresponderende frequenties ingevuld in het rekenprogramma en vervolgens een geluidscomplex fragment samengesteld met een tijdsduur van tien seconden.

U kunt deze verschillende geluidsfragmenten als wavelets downloaden via één van de volgende websites:

<http://www.een-andere-kijk-op-horen.nl/>

of

<http://www.a3ccm-apmas-eakoh.be/>

De fragmenten zijn per onderwerp gegroepeerd in gezipte directories.

In de rapportage van de onderstaande experimenten verwijst bijvoorbeeld de notatie: [Sound E 2 0] naar de te downloaden file (E 2 0.wav) in de lijst van geluidsfragmenten, terwijl E 2 overeenkomt met paragraaf 3.2.

A II.2 Experimenten

3.2. Toonhoogteperceptie in incomplete harmonische geluidscomplexen

Experiment 3.2.0

Als we gebruik maken van de frequenties:

$$f_0 = 200 \text{ Hz}; f_1 = 400 \text{ Hz}; f_2 = 700 \text{ Hz en } f_3 = 900 \text{ Hz}$$

hoort u een harmonische toon in het geluidsfragment:

[Sound E 2 0]

Experiment 3.2.1

Aan de frequenties in Experiment 3.2.0 voegen wij toe:

$$f_4 = 99 \text{ Hz of } f_4 = 101 \text{ Hz, met Extra Multiply Amplitude 2}$$

[hetgeen het testsignaal is voor toonhoogtebepaling]

en u hoort een zweeping van 2 Hz in de geluidsfragmenten:

[Sound E 2 1] respectievelijk [Sound E 2 2]

[20 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent $20:10 = 2$ Hz zweeping]

3.3. Residu toonhoogteperceptie in onharmonische toonreeksen

Experiment 3.3.0

Als we in het rekenprogramma gebruik maken van de frequenties:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1600 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

hoort u in het bijbehorende geluidsfragment een harmonische toon:

[Sound E 3 0]

Experiment 3.3.1

Als we in Experiment 3.3.0 de middelste frequentie veranderen van:

$$f_1 = 1600 \text{ Hz in } f_1 = 1600,5 \text{ Hz}$$

waardoor het triplet verandert in:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1600,5 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

hoort u dezelfde harmonische toon als in Experiment 3.3.0, maar met een 1 Hz zweeping in het geluidsfragment:

[Sound E 3 1]

[10 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent $10:10 = 1$ Hz zweeping]

Experiment 3.3.2

Als we in Experiment 3.3.0 de middelste frequentie veranderen van:

$$f_1 = 1600 \text{ Hz in } f_1 = 1599,5 \text{ Hz}$$

waardoor het triplet verandert in:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1599,5 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

dan hoort u dezelfde harmonische toon als in Experiment 3.3.0, maar opnieuw met een 1 Hz zweving in het geluidsfragment:

[Sound E 3 2]

[10 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent $10:10 = 1$ Hz zweving]

3.4. Toevoeging van harmonischen en hun invloed op zwevingfenomenen

Experiment 3.4.0

Aan het triplet in Experiment 3.3.2 voegen we nog twee andere harmonische frequentiebijdragen toe:

$$f_3 = 1200 \text{ Hz}; f_4 = 2000 \text{ Hz}$$

waardoor we het 5-tonen complex samenstellen:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1599,5 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}; f_3 = 1200 \text{ Hz}; f_4 = 2000 \text{ Hz}$$

u hoort dan een harmonische toon met een 0,5 Hz zweving in het geluidsfragment:

[Sound E 4 0]

[5 dippen tellen bij een 10 sec. geluidsfragment betekent $5:10 = 0,5$ Hz zweving]

Experiment 3.4.1

Aan het triplet in Experiment 3.3.2 voegen we twee andere harmonische frequentiebijdragen toe:

$$f_3 = 1000 \text{ Hz en } f_4 = 1200 \text{ Hz in plaats van: } f_3 = 1200 \text{ Hz en } f_4 = 2000 \text{ Hz}$$

en u hoort dan opnieuw een harmonische toon met een 0,5 Hz zweving, maar met een ander timbre in het 5-tonen geluidsfragment:

[Sound E 4 1]

Experiment 3.4.2

Aan het triplet in Experiment 3.3.2 voegen we twee andere harmonische frequentiebijdragen toe:

$$f_3 = 2000 \text{ Hz}; f_4 = 2200 \text{ Hz in plaats van: } f_3 = 1000 \text{ Hz}; f_4 = 1200 \text{ Hz}$$

en u hoort dan opnieuw een harmonische toon met een 0,5 Hz zweving, maar wel met een ander timbre in het 5-tonen geluidsfragment:

[Sound E 4 2]

Opmerking

Indien u het moeilijk vindt om een 0,5 Hz zwevingfrequentie te onderscheiden en te tellen, kunnen we ook bijvoorbeeld gebruik maken van:

$$f_1 = 1601 \text{ Hz} \text{ of } f_1 = 1599 \text{ Hz}$$

alle zwevingfenomenen zullen dan verdubbelen in frequentie.

De zweving in het triplet: $f_0 = 1400 \text{ Hz}$; $f_1 = 1601 \text{ Hz}$; $f_2 = 1800 \text{ Hz}$ zal dan gehoord worden als 2 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 4 3]

terwijl door het toevoegen van twee extra frequenties: $f_3 = 1200 \text{ Hz}$ en $f_4 = 2000 \text{ Hz}$ we het 5-tonen complex samenstellen:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1601 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz};$$

$$f_3 = 1200 \text{ Hz}; f_4 = 2000 \text{ Hz}$$

en de 2 Hz zweving zal dan veranderen in 1 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 4 4]

3.5. Verandering van de zwevingfrequentie door toevoeging van een laagfrequente stimulus

Experiment 3.5.1

Als we gebruik maken van het triplet:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz}; f_1 = 1600,5 \text{ Hz}; f_2 = 1800 \text{ Hz}$$

dan hoort u een harmonisch tooncomplex met een zweving van 1 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 5 1]

Experiment 3.5.2

Aan het triplet in Experiment 3.5.1 voegen we toe het testsignaal:

$$f_3 = 100 \text{ Hz met Extra Multiply Amplitude 2}$$

[hetgeen in dit geval het testsignaal is voor toonhoogtebepaling]

u hoort dan dat het vorige tooncomplex – dat een zweving had van 1 Hz – veranderd is in een tooncomplex met een veel lager timbre en met een zweving van 0,5 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 5 2]

Experiment 3.5.3

Aan het triplet in Experiment 3.5.1 voegen we toe het testsignaal:

$$f_3 = 200 \text{ Hz met Extra Multiply Amplitude } \geq \sqrt{2} = 1,4142$$

en u hoort dan dat het vorige harmonisch tooncomplex veranderd is in timbre, maar de zweving van 1 Hz niet is veranderd in geluidsfragment:

[Sound E 5 3]

3.7. Is toonhoogteverschuiving in een onharmonisch tooncomplex met equidistante frequenties een illusie?

Experiment 3.7.0

Als we gebruik maken van de frequenties van het 7-tonen complex:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz; } f_1 = 1600 \text{ Hz; } f_2 = 1800 \text{ Hz; } f_3 = 2000 \text{ Hz; } f_4 = 2200 \text{ Hz; } f_5 = 2400 \text{ Hz en } f_6 = 2600 \text{ Hz}$$

hoort u een harmonische toon in het geluidsfragment:

[Sound E 7 0]

Experiment 3.7.1

Aan het 7-tonen complex in Experiment 3.7.0 voegen we toe de dubbeltoon bijdrage:

$f_7 = 201 \text{ Hz; } f_8 = 402 \text{ Hz;}$ met een Extra Multiply Amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$ waardoor wij het 9-tonen complex samenstellen:

$$f_0 = 1400 \text{ Hz; } f_1 = 1600 \text{ Hz; } f_2 = 1800 \text{ Hz; } f_3 = 2000 \text{ Hz; } f_4 = 2200 \text{ Hz; } f_5 = 2400 \text{ Hz; } f_6 = 2600 \text{ Hz; } f_7 = 201 \text{ Hz en } f_8 = 402 \text{ Hz}$$

en u hoort dan een harmonische toon met een lager timbre dan in Experiment 3.7.0, maar met een 1 Hz zweving in het geluidsfragment:

[Sound E 7 1]

Experiment 3.7.2

Aan het 7-tonen complex in Experiment 3.7.0 voegen wij toe de dubbeltoon bijdrage:

$f_7 = 199 \text{ Hz; } f_8 = 398 \text{ Hz;}$ met een Extra Multiply Amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$ en u hoort dan een nagenoeg gelijke harmonische toon als in Experiment 3.7.1, met opnieuw een 1 Hz zweving in het geluidsfragment:

[Sound E 7 2]

Experiment 3.7.3

Als wij gebruik maken van de frequenties:

$$f_0 = 1430 \text{ Hz}; f_1 = 1630 \text{ Hz}; f_2 = 1830 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2230 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2430 \text{ Hz en } f_6 = 2630 \text{ Hz}$$

hoort u een onharmonische toon in het geluidsfragment:

[Sound E 7 3]

Opmerking

Zoals gerapporteerd is door De Boer en anderen, zijn muzikaal goed getrainde luisteraars in staat om de toonhoogte en haar verschuiving naar een hogere frequentie te onderkennen. Wij ervaren het geluid als nogal ruw.

Experiment 3.7.4

In zijn proefschrift heeft De Boer [A II 1] uitgelegd dat de toonhoogte van Experiment 3.7.3 het beste vergeleken kan worden met de toonhoogte van het harmonisch tooncomplex waarvoor we kunnen invullen:

$$f_0 = 1421 \text{ Hz}; f_1 = 1624 \text{ Hz}; f_2 = 1827 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2233 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2436 \text{ Hz en } f_6 = 2639 \text{ Hz}$$

welke een 203 Hz grondtoon heeft. En dan hoort u een harmonische toon in het geluidsfragment:

[Sound E 7 4]

Opmerking

In overeenstemming met eerdere resultaten is hier de toonhoogte gelijk aan 203 Hz, de eerste harmonische in deze reeks van zeven hogere harmonischen.

Experiment 3.7.5

Als we aan het 7-tonen complex van Experiment 3.7.4, bestaande uit opeenvolgende hogere harmonischen, de dubbeltoon frequenties toevoegen:

$$f_7 = 203 \text{ Hz}; f_8 = 406 \text{ Hz}; \text{ met een Extra Multiply Amplitude van } \sqrt{6} = 2,449$$

waardoor we het 9-tonen complex samenstellen:

$$f_0 = 1421 \text{ Hz}; f_1 = 1624 \text{ Hz}; f_2 = 1827 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2233 \text{ Hz}; \\ f_5 = 2436 \text{ Hz}; f_6 = 2639 \text{ Hz}; f_7 = 203 \text{ Hz en } f_8 = 406 \text{ Hz}$$

dan hoort u een constante harmonische toon, dus geen zweving, met een lager timbre dan in Experiment 3.7.4 in het geluidsfragment:

[Sound E 7 5]

Opmerking

Daarom zullen wij in het onharmonisch 7-tonen complex van Experiment 3.7.3 proberen te zoeken naar deze toonhoogte door middel van het toonhoogte traceer mechanisme. Dat bestaat eruit dat u een dubbeltoon aan het tooncomplex gaat toevoegen. Dit zal nu dus hier gebeuren met de te verwachten toonhoogte van 203 Hz.

In Experiment 3.7.6 zullen we beginnen met de dubbeltoon van 203 en 406 Hz, omdat we de toonhoogte van 203 Hz kunnen verwachten die De Boer heeft voorspeld.

En als hij het juist heeft, zult u geen zweving horen bij deze dubbeltoon test.

Experiment 3.7.6

Als we aan het 7-tonen complex van Experiment 3.7.3 een dubbeltoon toevoegen:

$f_7 = 203 \text{ Hz}; f_8 = 406 \text{ Hz};$ met een Extra Multiply Amplitude van $\sqrt{6} = 2,449$

waardoor we het 9-tonen complex samenstellen:

$f_0 = 1430 \text{ Hz}; f_1 = 1630 \text{ Hz}; f_2 = 1830 \text{ Hz}; f_3 = 2030 \text{ Hz}; f_4 = 2230 \text{ Hz};$

$f_5 = 2430 \text{ Hz}; f_6 = 2630 \text{ Hz}; f_7 = 203 \text{ Hz}$ en $f_8 = 406 \text{ Hz}$

en u hoort dan een onharmonische toon met een lager timbre dan in Experiment 3.7.3. Maar, in plaats van het horen van de verwachte extra intensiteit in de toonhoogte, hoort u duidelijk een 3 Hz zweving in het geluidsfragment:

[Sound E 7 6]

Experiment 3.7.7

Als we de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangen door de dubbeltoon:

$f_7 = 202 \text{ Hz}; f_8 = 404 \text{ Hz}$ hoort u een zweving van 2 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 7 7]

Experiment 3.7.8

Als we de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangen door de dubbeltoon:

$f_7 = 201 \text{ Hz}; f_8 = 402 \text{ Hz}$ hoort u een zweving van 1 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 7 8]

Experiment 3.7.9

Als we de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangen door de dubbeltoon:

$f_7 = 200 \text{ Hz}; f_8 = 400 \text{ Hz}$ verdwijnt de zweving volledig in het geluidsfragment:

[Sound E 7 9]

Experiment 3.7.10

Als we de dubbeltoon in Experiment 3.7.6 vervangen door de dubbeltoon:
 $f_7 = 199$ Hz; $f_8 = 398$ Hz keert de zweving die u hoort weer terug naar 1 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 7 r]

Opmerking

Daar geen enkele onderzoeker ook maar één spoor kan vinden van een verschuiving in de toonhoogte bij deze zwevingsexperimenten is de enige mogelijke conclusie die we kunnen trekken, dat de toonhoogte, welke door in muziek-perceptie getrainde luisteraars wordt waargenomen en als zodanig wordt gerapporteerd, feitelijk een illusie is.

De werkelijke toonhoogte blijft onveranderd 200 Hz, hetgeen het kleinste frequentieverschil is in de onharmonische toonreeks.

3.8. Infrageluid kan ‘gehoord’ worden volgens het kwadrateerprincipe

Experiment 3.8.0

Als we gebruik maken van de dubbeltoon frequenties:

$$f_0 = 600 \text{ Hz}; f_1 = 610 \text{ Hz}$$

denkt u een toon te horen van 605 Hz met een vibrato van 10 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 8 0]

Opmerking

Dit wordt gewoonlijk verklaard als het zwevingeffect van de combinatie van de twee dicht bij elkaar gelegen frequenties. Maar zo werkt het niet. Dit kan aangetoond worden in de volgende reeks experimenten.

Experiment 3.8.1

Als we gebruik maken van de tripletfrequenties:

$$f_0 = 600 \text{ Hz}; f_1 = 610 \text{ Hz en } f_2 = 620 \text{ Hz}$$

hoort u nog steeds een toon van 610 Hz met een zweving in de vorm van een 10 Hz vibrato in het geluidsfragment:

[Sound E 8 1]

Experiment 3.8.2 – 3.8.3

Als we de frequentie $f_1 = 610$ Hz veranderen in de frequentie $f_1 = 609$ Hz of $f_1 = 611$ Hz creëren we het triplet:

$$f_0 = 600 \text{ Hz}; f_1 = 609 \text{ Hz (of } f_1 = 611 \text{ Hz) en } f_2 = 620 \text{ Hz}$$

en u hoort dan een toon van 610 Hz met een vibrato van 10 Hz, maar dat vibrato bezit wel een extra zweving van 2 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 8 2] respectievelijk [Sound E 8 3]

Experiment 3.8.4 – 3.8.5 – 3.8.6

Maar als we één van de volgende combinaties toevoegen aan het triplet in Experiment 3.8.2 of 3.8.3:

$$f_3 = 580 \text{ Hz en } f_4 = 590 \text{ Hz}$$

$$\text{of: } f_3 = 590 \text{ Hz en } f_4 = 630 \text{ Hz}$$

$$\text{of: } f_3 = 630 \text{ Hz en } f_4 = 640 \text{ Hz}$$

hoort u dat die extra 2 Hz zweving is veranderd in een 1 Hz zweving in de geluidsfragmenten:

[Sound E 8 4]; [Sound E 8 5] respectievelijk [Sound E 8 6]

Opmerking

U moet zich ook realiseren dat de enige frequentie die hierbij gemoduleerd kan worden de 10 Hz ‘grondtoon’ is.

Experiment 3.8.7

Aan het triplet in Experiment 3.8.2 of 3.8.3 kunnen wij nog een triplet toevoegen:

$$f_3 = 700 \text{ Hz}; f_4 = 710 \text{ Hz en } f_5 = 720 \text{ Hz}$$

u hoort dan dat, afgezien van een verandering in het timbre, ook de extra 2 Hz zweving in het 10 Hz vibrato veranderd is in een zweving van 1 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 8 7]

Opmerking

De combinatie van de vier verschilfrequentie bijdragen van 9; 2 maal 10 en 11 Hz resulteert in een signaal van 10 Hz met een zweving van 1 Hz. Dus gehalveerd ten opzichte van de zweving in Experiment 3.8.2 of 3.8.3.

Experiment 3.8.8

In het toegevoegde triplet in Experiment 3.8.7 kunnen we de frequentie $f_4 = 710$ Hz veranderen in $f_4 = 711$ Hz, zodat dit triplet wordt:

$$f_3 = 700 \text{ Hz}; f_4 = 711 \text{ Hz en } f_5 = 720$$

en u hoort dan dat de extra 1 Hz zweving in het vibrato van 10 Hz opnieuw veranderd is in een zweving van 2 Hz in het geluidsfragment:

[Sound E 8 8]

Experiment 3.8.9

Wanneer wij vervolgens in Experiment 3.8.8 de fase van de frequentie f_4 veranderen in 180° hoort u dat de 10 Hz zweving nagenoeg volledig verdwenen is en een niet gemoduleerd 20 Hz vibrato daarvoor in de plaats gehoord wordt in het geluidsfragment:

[Sound E 8 9]

Opmerking

Dit treedt op omdat de beide verschilfrequenties van 9 Hz en 11 Hz (opgewekt door het 600 + 609 (of 611) + 620 Hz triplet) en dezelfde twee verschilfrequenties van 9 Hz en 11 Hz (opgewekt door het 700 + 709 (of 711) + 720 Hz triplet) – paarsgewijs – praktisch gelijk in amplitude zijn, maar tegengestelde fase bezitten. Zij heffen daarom elkaars bijdragen vrijwel volledig op.

Wat overblijft is de combinatie van twee bijdragen van de verschilfrequenties van 20 Hz, ontstaan uit de combinaties 620 – 600 en 720 – 700 Hz, welke gehoord wordt als een 20 Hz vibrato.

Literatuur

- A II 1. De Boer E. (1956) On the “residue” in hearing. Proefschrift; Universiteit van Amsterdam.

