

HET OOR ALS GERAFFINEERDE MICROFOON

Wat geschiedenis

De wereld van het geluid ervaren we via onze oren. Via het oor worden geluidsgolven hoorervaringen, in de vorm van bijvoorbeeld spraak en muziek, maar ook van herrie en lawaai. Esthetisch en emotioneel geeft het ook heel tegenstrijdige indrukken door.

Van alle zintuigen is het oor het "intellectueelste". In de wereld van de antieken gold het oor als de zetel van het geheugen. Voor Paracelsus betekenden grote oren, dat je niet alleen goed kon horen, maar dat je ook een uitstekend geheugen en een scherp verstand had.

In de beschaafde wereld van de Chinezen, de Grieken en de Romeinen nam muziek plus wat over akoestiek bekend was een hoge positie in bij wetenschap en filosofie. Ling Lun werd uit China naar Europa gestuurd, om kennis te vergaren over de correcte toonschaal; Pythagoras van Samos ("Alles is getal") en zijn volgelingen ontwikkelden tussen 600 en 350 v. Chr. de eerste muzikale notenreeks, men ontdekte de harmonie en ontwikkelde een theorie over kosmische "sferenmuziek".

Huygens (1629-1695), die vaststelde, dat intervallen de logaritmische toonrelaties aangeven, leverde een even interessante bijdrage als de eerste onderzoekers, die zich met de anatomie van het oor bezighielden. Hippocrates (ca. 460-370 v. Chr.), de grondlegger van de empirische medicijnenstudie, ontdekte het trommelvel, Eristratos (300-240 v. Chr.) de gehoorzenuw en Galen uit Pergamon (129-199 n. Chr.) de zenuwoverdracht van prikkels.

Daarna waren het o.a. Marin Mersenne (1588-1648), die in zijn "Harmonie universelle" meettechnisch vaststelde, wat de geluidssnelheid ongeveer is. Na hem bevestigden Borelli en Viviani in Italië dit.

Andreas Vesalius (1514-1564) beschreef o.m. het middenoor met twee van de drie gehoorbeentjes en het ovale en ronde venster. Het derde gehoorbeentje, de stijgbeugel, werd door Ingrassia (1510-1580) ontdekt.

Bartolomeo Eustachio (1520-1574) ging in op de luchtverbinding tussen middenoor en keel, de naar hem genaamde buis van Eustachius (tuba auditiva of oortrompet).

Gabriele Falloppia (1523-1562) beschreef als anatoom trommelvel, slakkehuis en evenwichtsorgaan en gaf ze hun namen. Pas veel later toonde Meckel (1756-1803) aan, dat het slakkehuis met vloeistof is gevuld.

In de 19e eeuw waren het vooral Lord Raleigh (1842-1919) met zijn "Theory of Sound", Fourier (1768-1830) met zijn fundamenteën voor de harmonische analyse, Hermann von Helmholtz (1821-1894) met zijn "Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik" met in zijn kielzog mensen als Rutherford, Ewald en von Békésy tot in onze eeuw, die belangrijke bijdragen aan de theorie van het horen lever-

den.

De beginselen van de elektro-akoestiek hebben we te danken aan lieden als Alexander Graham Bell (1847-1922), Thomas Alva Edison (1847-1931), Emil Berliner, Johann Philipp Reis (1834-1874), Lee de Forest (die in 1907 de radiobuis uitvond) en William Shockley (de bedenker van de transistor). Een pionier op het gebied van de psycho-akoestiek tenslotte was Harvey Fletcher.

Oog en oor als waarnemingszintuigen

Het oor was duizenden jaren voor alles de poort, waardoor de communicatie van mens tot mens plaatsvond. Voor de ontwikkeling van de spraak vormde het oor als klankanalysator een onmisbare schakel.

In de 16e eeuw, na de uitvinding van de boekdrukkunst, verloor het oor zijn grote betekenis als belangrijkste medium om gedachten, kennis en wetenschap over te dragen.

Tegenwoordig, mee onder invloed van de TV, de film, video en het stripverhaal, geldt het oog als het edelste zintuig. Over deze verschijnselen van een eenzijdiger communicatie via het gedrukte woord en het beeld vallen interessante cultuurkritische discussies te voeren.

Het oog is in vergelijking met het oor actiever: het kan bewegen, fixeren, ronddwalen, verstolen blikken en het kan ook worden gesloten, iets wat we met onze oren normaal niet kunnen, tenzij we ze met doppen of gehoorbeschermers tijdelijk dichtmaken.

Normaal is het oor voortdurend open, steeds bereid om informatie van alle kanten te verzamelen, in bepaalde gevaarlijke situaties ook te waarschuwen, zelfs als we slapen. Soms zou ik willen, dat ik mijn oren op natuurlijke wijze kon afsluiten of even uitschakelen.

Met het oog beheerst de mens de wereld, fixeert hij de doeleinden van zijn handelingen. Het oor daarentegen is als een wachter, het laat de wereld tot de mens doordringen. Vanaf de vijfde maand van de zwangerschap is het binnenoor volledig uitgegroeid. De stervende mens, die niet meer de kracht heeft om de ogen open te houden, hoort nog wel tot de laatste ademtocht.

Het oor is een uiterst subtiel reagerend waarnemingsorgaan. Het kan de kleinste veranderingen in het ons omgevende medium - de lucht - registreren. Die veranderingen kunnen in de orde van grootte van een waterstofatoom zijn.

Fysiologie van het oor

In de onderstaande afbeeldingen zien we een schematische weergave van het gehoororgaan.

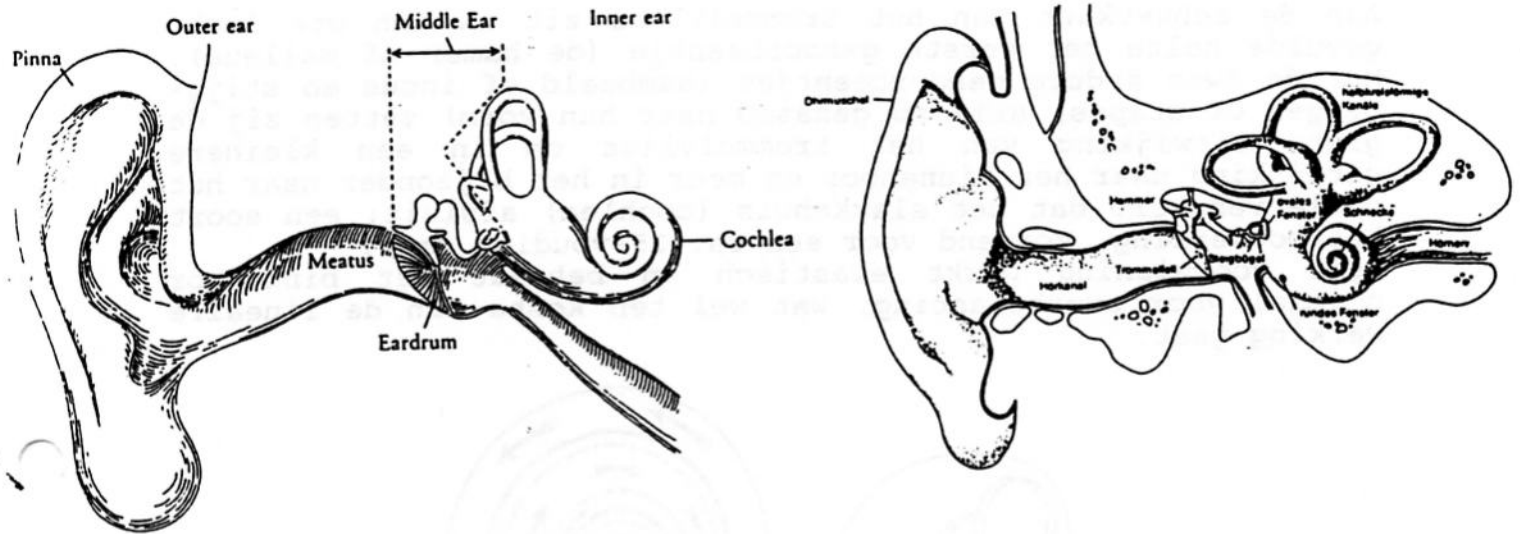


Fig. 1. Tweemaal het schematisch weergegeven oor.

Ons gehoororgaan kan worden verdeeld in het uitwendig oor, het middenoor en het binnenoor. Het uitwendige deel bestaat uit de oorschelp (pinna) en de gehoorgang (meatus). Dit is een ca. 2,7cm lang en 0,7cm diameter kanaal, waardoor een geluidsgolf het trommelvees kan bereiken. Het werkt ongeveer als een breedbandige resonator met een resonantiefrequentie van ongeveer 2.700Hz. Zo'n geluidsgolf brengt het trommelvees in trilling; het fungeert dan als het ongeveer 1 cm² grote, dunne membraan van een microfoon. De afmetingen van de gehoorgang en de eigenschappen van het midden- en binnenoor maken, dat een doorgifte van de frequenties rond de 3,4kHz wordt bevoordeeld: daar is ons oor het gevoeligst.

Het trommelvees sluit ook de gehoorgang van het middenoor af.

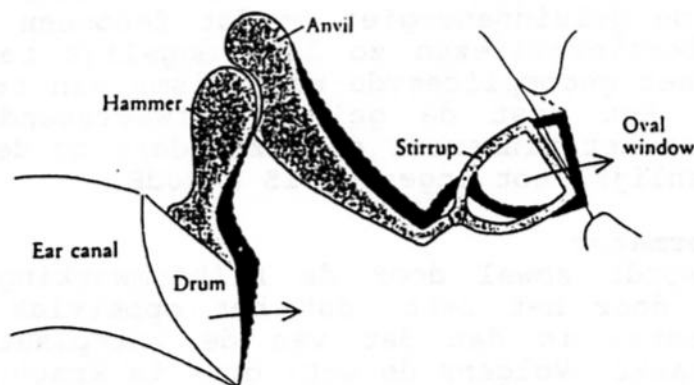


Fig. 2. Schematische weergave van het middenoor

Aan de achterkant van het trommelvlies zit in een met lucht gevulde holte het eerste gehoorbeentje (de hamer of malleus). Met de twee andere gehoorbeentjes (aambeeld of incus en stijgbeugel of stapes, alle zo genaamd naar hun vorm) zetten zij de grote uitwijking van het trommelvlies om in een kleinere uitwijking naar het binnenoor en meer in het bijzonder naar het ovale venster, dat het slakkehuis (cochlea) afsluit: een soort hefboomwerking, zorgend voor een ca. 15-voudige druk. Deze voorziening werkt elastisch en behoedt het binnenoor normaal voor overbelasting, wat wel ten koste van de lineaire werking gaat.

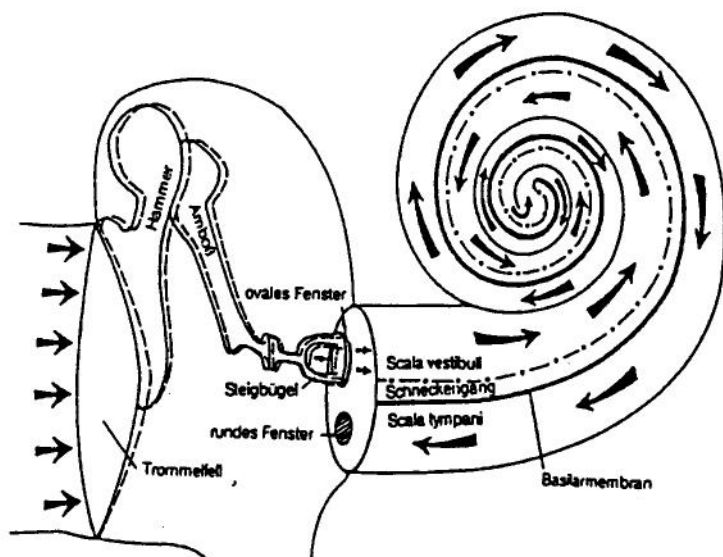


Fig. 3. Schematische voorstelling van het binnenoor.

Bij het normale hoorproces moet het geluid van de lucht in de gehoorgang overgaan in de vloeistof van het binnenoor. Gewoonlijk reflecteert het grensvlak tussen lucht en vloeistof het grootste deel van de geluidsenergie. Om dat fenomeen te overtroeven en de reflectieverliezen zo laag mogelijk te houden, bedacht de natuur het gecompliceerde mechanisme van trommelvel en gehoorbeentjes. Het past de geluidsgolfweerstand van de lucht aan op die van het binnenoor en vermindert zo de reflectieverliezen aanzienlijk: tot ongeveer 15 à 20dB.

Het oor als transformator

De drukverhoging wordt zowel door de hefboomwerking van de gehoorbeentjes als door het feit, dat het oppervlak van het trommelvel veel groter is dan dat van de voetplaat van de stijgbeugel veroorzaakt. Volgens de wet: druk is kracht gedeeld door oppervlak, is de druk op het ovale venster al groter dan die op het trommelvel. Zo beschikt het oor over een akoestische transformator.

De gehoorbeentjes worden door spiertjes op hun plaats gehouden. Door het spannen van deze spiertjes kan het doorgeven van een trilling worden gedempt. Het vormt een bescherming van het binnenoor als de trilling een te grote amplitude krijgt, wat zich bij hoge geluidsniveaus voordoet. De zodanig bereikbare verzwakking bedraagt 10 à 20dB. Voor ontluchting en drukaanpassing is het middenoor via de buis van Eustachius (tuna Eustachii) met de keel verbonden en wordt van daaruit bij elke slikbeweging gelucht.

Wie zwaar verkouden is, weet maar al te goed wanneer deze functie hapert.

Dat dit zo is, weet iedereen, die regelmatig vlieggreizen maakt en pas na wat slikken van de "druk op de oren" wordt verlost, die een kortstondige doofheid bij de landing kan veroorzaken.

Het binnenoor bevat behalve het gehoororgaan ook het evenwichtsorgaan. In het gehoororgaan, achter de voetplaat van de stijgbeugel, die de trillingen rechtstreeks overdraagt aan het ovale venster bevindt zich het ongeveer 2 3/4 windingen tellende spiraalvormige slakkehuis (of cochlea), dat aan het andere uiteinde wordt afgesloten door het ronde venster. Het slakkehuis, dat is ingebed in het rotsbeen, is een met een alkalische vloeistof gevulde opgerolde buis van ongeveer 3cm lengte met een geleidelijk van 0,9cm tot 0,3cm geringer wordende doorsnee.

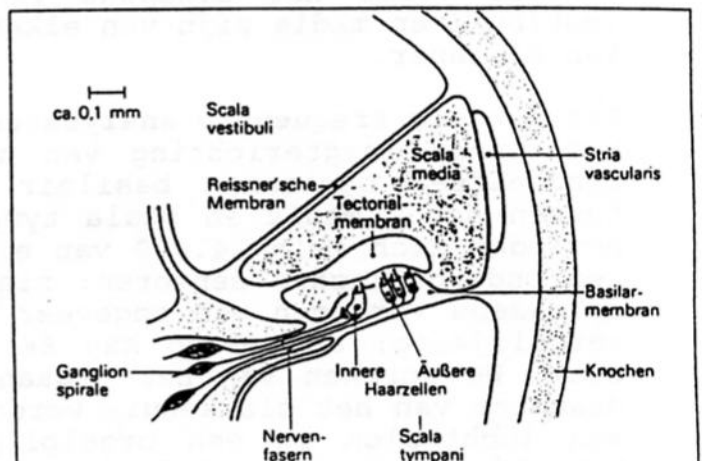
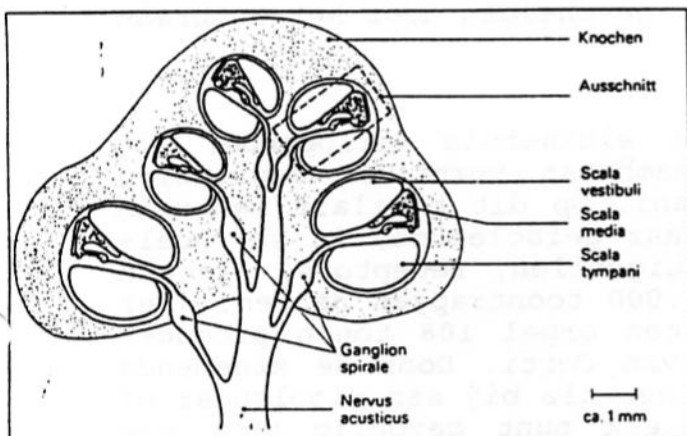


Fig. 4. Links een grove schematische doorsnee door het slakkehuis. De spiraalvormige windingen bevat diverse kanalen; dit is er eentje uit het bovenste kanaal. Rechts een dwarsdoorsnee door een winding in het slakkehuis. Het zich op het basilaire membraan bevindende orgaan van Corti bevat de haarcellen.

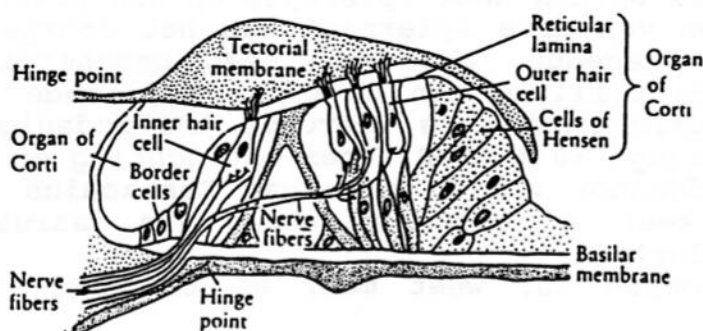


Fig. 5. Een andere kijk op het basilair membraan en de omringende structuren.

Deze buis is onderverdeeld in drie kanalen, genaamd scala vestibuli, scala media en scala tympani. De scala vestibuli en tympani zijn met perilymfe gevuld, de scala media bevat endolymfe. Perilymfe bevat veel natrium ionen, terwijl de scala media kaliumrijk is. Via het helicotrema staan scala vestibuli en scala tympani met elkaar in verbinding. Via het ovale venster werkt de stijgbeugel op de scala vestibuli; het ronde venster vormt het eindpunt van de scala tympani. De scala vestibuli en media zijn van elkaar gescheiden door het membraan van Reissner.

Het oor als frequentie analysator

Het in de lengterichting van het slakkehuis verlopende, uit bindweefsel bestaande basilair membraan vormt de begrenzing tussen scala media en scala tympani. Op dit basilair membraan bevinden zich zo'n 24.000 van elkaar geïsoleerde, in steuncellen ondergebrachte sensoren: zintuigcellen, receptoren, die een oplossend vermogen van ongeveer 3.000 toontrapjes hebben. (Ter vergelijking: een piano kan 84, een orgel 108 tonen produceren). We spreken van het orgaan van Corti. Door de afnemende diameter van het slakkehuis wordt net als bij een vioolsnaar of een luchtkolom in een orgelpijp elk punt gevoelig voor een bepaald frequentiegebied.

In het binnenoor worden de geluidstrillingen uitgesorteerd in elkaar overlappende frequentiegebieden. De bewuste stereocilien - submicroscopische haarvormige cellen - kregen begrijpelijk genoeg de naam van haarcellen. Er zijn buitenste en binnenste haarcellen. De buitenste zijn in drie rijen geplaatst, de binnenste slechts in één.

Over het orgaan van Corti ligt een gelei-achtige massa uitgesmeerd: het tectoriaalmembraan. Het is aan de binnenwand van het slakkehuis bevestigd en raakt de cilies van de haarcellen, waarmee het in redelijk vaste verbinding staat. De stria vascularis, een vaatrijk gebied, bevindt zich aan de buitenste begrenzing van de scala media. Het gaat hier om de energievoorziening van het slakkehuis, die tevens de kaliumionen concen-

tratie van de endolymfe op peil houdt.

De receptoren op het orgaan van Corti vormen als secundaire zenuwcellen zelf geen voortzettingen van dergelijke zenuwen. Ze staan wel met zenuwvezels in verbinding, die in ganglionspiralen wortelen; die spiralen zijn op hun beurt spiraalvormig in het slakkehuis opgerold.

De zenuwcellen van deze ganglions zijn bipolaire cellen. Hun ene tak gaat naar de receptorcellen, hun andere naar de nervus acusticus van het centraal zenuwstelsel. De in- en uitwendige haarcellen worden apart door zenuwen verzorgd. De inwendige haarcellen bevatten veel zenuwen; elke haarcel heeft waarschijnlijk zijn eigen zenuw. Daarentegen zijn de voor de buitenste haarcellen werkzame zenuwvezels sterk vertakt. Het leeuwedeel van de vezels uit de nervus acusticus komt daarom van de inwendige haarcellen.

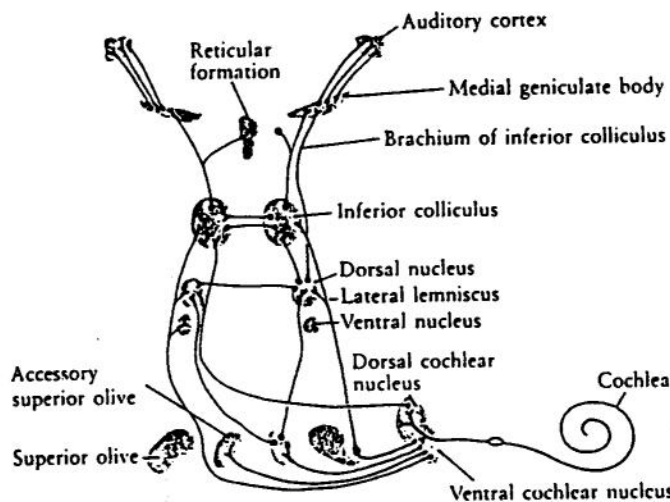


Fig. 6. De zenuwbanen van de haarcellen met hun "schakelkasten" uit de cochlea naar de centrale hoorzenuw.

Behalve door de beengeleiding, die zoals gezegd alleen bij het horen van de eigen stem een wezenlijke rol speelt, geschiedt de geluidsoverdracht vanuit de luchtleiding van de gehoorgang via het trommelvel en de gehoorbeentjes naar de perilymfe van het binnenoor. De veelgehoorde theorie, volgens welke hogere frequenties door beengeleiding het binnenoor bereiken, is intussen ontkracht.

Elke groep cellen met zijn eigen reeks elektrisch vurende neuronen maakt een frequentie-analyse van het geluid, dat dit vuren veroorzaakt. Op hun beurt worden de ontstane impulsen door zenuwen doorgegeven.

Elke frequentie stimuleert een zintuigcel

De perilymfe uit de scala vestibuli, het ronde venster als drukcompensator, de scala media met het basilair membraan en

het membraan van Reissner dienen voor de verdere verwerking van het geluid. De trillingen in deze onderdelen van het binnenoor leiden tot de vorming van zwerfgolven, die van de stijgbeugel (stapes) naar het helicotrema verlopen.

De amplitudes van deze zwerfgolven worden eerst groter en worden later gedempt, totdat ze geheel zijn afgevlakt. Dit gebeurt op basis van de natuurkundige eigenschappen van de door deze zwerfgolven doorlopen substanties.

Tussen de plaats van oorsprong bij de stijgbeugel en het eindpunt van de golfbeweging op weg naar het helicotrema ontstaat zo noodzakelijkerwijs ergens een maximum van de trilling. Dit maximum wordt voor elke frequentie op een ander punt gevormd. Bij hoge frequenties dicht in de buurt van de stijgbeugel, bij lage dicht bij het helicotrema. De stimulans van de zintuigcellen vindt vooral plaats in de buurt van dat maximum. Dus: elke frequentie stimuleert een andere - zijn eigen - zenuwcel.

Dit is meteen de verklaring van het feit, dat het oor een lang aangehouden toon als aangenaam ervaart, wanneer deze van vibrato - dus van een modulatie rond de grondtoonfrequentie - is voorzien. Dan wordt namelijk niet slechts één zenuwcel geactiveerd maar een groepje burens ook. Dat is minder vermoeiend.

Overigens ervaart het oor slechts vibratofrequenties tussen 5 en 8 Hz met fluctuaties van ± 20 tot ± 80 cents als esthetisch optimaal. Vibrato van minder dan 5 Hz maakt de intonatie onzuiver en vibrato van meer dan 8 Hz zorgt voor een overmaat aan opwindings.

Elektrische eigenschappen van het oor

De opname van prikkels door de haarcellen, het transductieproces dus, geschiedt door het aftasten van de toppen van de ciliën overeenkomstig de relatieve bewegingen tussen het basilair membraan en het tectoriaal membraan. De overdracht van de prikkels door het zenuwstelsel gebeurt in de vorm van elektrische impulsen, waarbij het aantal impulsen maatgevend is voor de luidsterkte. Bij hoge geluidsniveaus worden ongeveer 1.000 impulsen per seconde gegeven.

Interessant is ook het volgende elektrische fenomeen: de meting van potentiaalverschillen in het binnenoor met behulp van een microfoonelectrode leert, dat de scala media ten opzichte van de scala vestibuli een sterker positief potentiaal heeft ($>80\text{mV}$). De stria vascularis en het orgaan van Corti daarentegen vertonen een negatief potentiaal. Deze potentiaalverdeling geldt voor het oor in rusttoestand.

Wanneer het oor geluid ontvangt, treden verdere potentialen op: het microfoon- en het zenuwaktiepotentiaal. Het eerstgenoemde ontleent zijn naam aan het feit, dat het zich indien het aan het ovale venster wordt gemeten, gedraagt als de uitgangsspanning van een microfoon: het geeft precies het verloop van de geluidsdruk weer. Dit microfoonpotentiaal volgt de prikkels

zonder enige vertraging en bezit geen aanspreektijd (refractieertijd). Het kent geen meetbare drempel en lijdt niet onder vermoeidheidsverschijnselen. Waarschijnlijk stelt het microfoonpotentiaal de buiten de cellen af te leiden som van de receptorpotentialen van alle gestimuleerde haarcellen voor.

Omdat de bestandspotentialen een groot potentiaalverschil tussen de endolymferuimte en het binnenste van de receptorcellen van tenminste 150mV veroorzaken, leiden de door het afschermen van de ciliën veroorzaakte weerstandsveranderingen aan het membraan tot een in- en uitstroom van ionen en op die manier tot een receptorpotentiaal.

Dat is ook de inhoud van de accuhypothese. Het receptorpotentiaal van de individuele haarcellen heeft een ontlading van de transmitter aan de basale pool van de cel tot gevolg. Deze bewerkstelligt op zijn beurt de prikkeling van de naar het centrale zenuwstelsel leidende zenuwvezel.

Zenuwvezels en karakteristieke frequentie

Elke zenuwvezel komt van een enkele inwendige haarcel. Omdat bepaalde plekken in het slakkehuis zijn toegewezen aan bepaalde frequenties wordt iedere zenuwvezel door een heel bepaalde frequentie optimaal gestimuleerd: de karakteristieke frequentie.

Om een zenuwvezel met een niet-karakteristieke frequentie te activeren, zijn dienovereenkomstig hogere geluidsdrukken nodig. Daarmee worden niet slechts de betreffende vezels krachtiger gestimuleerd, maar worden ook de aanpalende vezels geactiveerd. Op het vlak van de primaire zenuwvezels wordt de geluidsprikkel in zijn frequentiecomponenten ontleed. De afzonderlijke componenten stimuleren de bij hun passende vezels. In de daarop volgende hogere stations van de hoorbaan gedragen de neuronen zich anders.

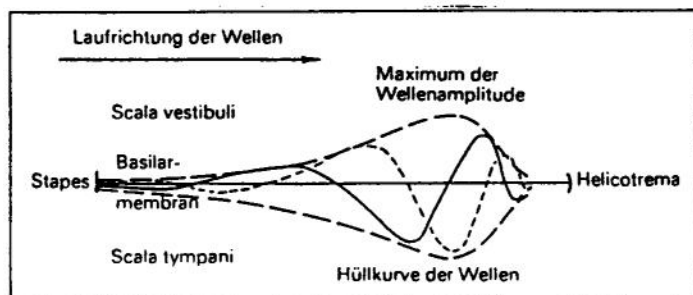


Fig. 7. Schematisch beeld van de hoorbaan.

In bovenstaande afbeelding is een vereenvoudigd schema van een naar de luisterschors in de hersenen voerende hoorbaan. Terwille van de overzichtelijkheid zijn slechts de banen van het linker oor getekend. Een pijlpunt symboliseert telkens de omschakeling naar een volgend neuron.

De primaire vezels verdwijnen eerst in de nucleus cochlearis, die in een ventrale en een dorsale kern is onderverdeeld. Vanuit het ventrale gedeelte voert een ventrale baan naar het

olijvencomplex aan dezelfde en de tegenoverliggende kant. De zenuwcellen van het olijvencomplex bevatten dus ingangen van beide oren.

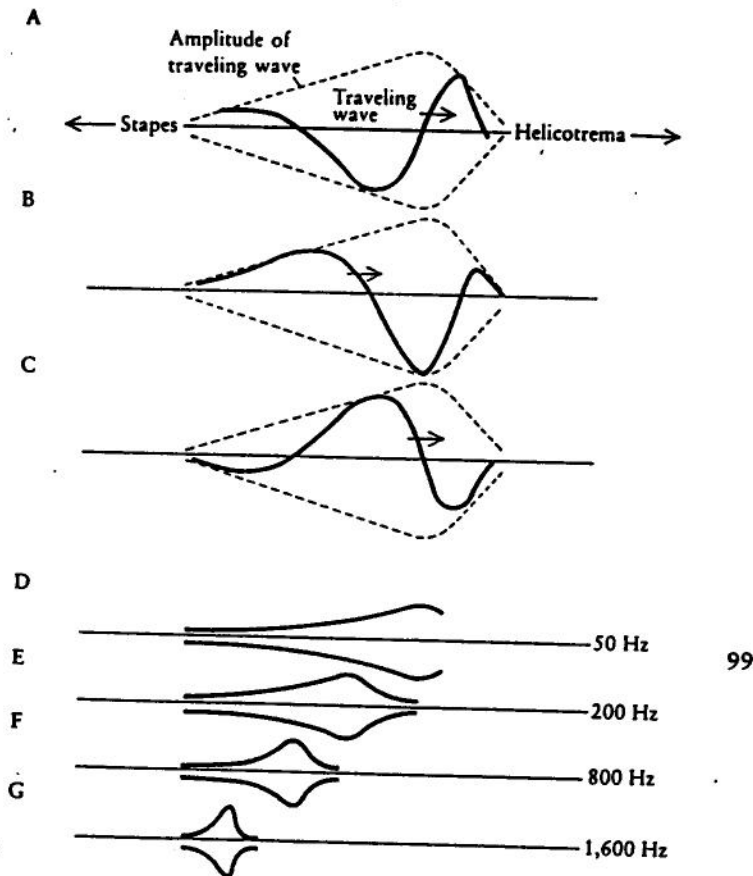


Fig. 8. Amplitudes van verschillende geluidsgolven, die langs het basilaire membraan lopen met verschillende frequenties.

Op dit niveau doet zich voor het eerst de mogelijkheid voor om de akoestische signalen, die op beide oren inwerken te vergelijken. Dat gebeurt met name in de nucleus accessorius, die verantwoordelijk is voor ons vermogen om ruimtelijk te horen. Van de nucleus cochlearis dorsalis gaat een dorsale baan uit. De vezels kruisen elkaar aan de andere kant en worden in de laterale luskern van de tegenoverliggende kant omgeschakeld. Aan het eind bestaat de baan uit vijf à zes neuronen. Wel zijn er nog meer, niet in het schema opgenomen omschakelingen. In tegenstelling tot de nervus acusticus, die aanspreekt bij eenvoudige prikkels zoals zuivere tonen, reageren de neuronen van de hogere niveau's van de hoorbaan anders. Hier kunnen op basis van krachtiger wederkerige schakelpatronen de geluidsprikkels ook tot stremmingen van de neuronen leiden. De neuronen van de nog hogere niveau's van de hoorbaan reageren alleen nog op complexe geluidspatronen, zoals amplitude- of

frequentiegemoduleerde tonen of klanken. Weer andere neuronen reageren op het begin van een geluidsprikkel, nog andere op het eind daarvan, mogelijk terwille van de bepaling van de tijdsduur. Als vuistregel geldt: hoe hoger het niveau waarop het neuron zich bevindt, des te complexer geluidsmonsters zijn nodig om het te stimuleren. Voor de verwerking van de door het neuronennetwerk geleverde informatie zorgen de hersens.

Waarom een dameskoor soms schrill klinkt

Het oor is geen lineaire transducent; net als zijn elektroakoestische soortgenoten wekt het combinatietonen op. Aan een toon van 3000Hz en een tweede van 4000Hz, beide van behoorlijk grote luidsterkte, voegt het oor een derde toe: de 1e orde verschiltoon van 1000Hz. Onder bepaalde omstandigheden treden zelfs derdemachts verschiltonen op: $2f_2 - f_1$, waarbij f_1 en f_2 de frequenties van de primaire tonen zijn.

Niet zelden bevat de zang van een dameskoor hoogfrequente componenten met een hoog geluidsniveau. Dat kan makkelijk ongewenste verschiltonen in het oor veroorzaken, waarvan men de muziekinstallatie niet de schuld mag geven.

Het oor heeft nog een andere, even merkwaardige als interessante en vooral voor dirigenten ergerlijke eigenschap: lang aangehouden, luide tonen kunnen gelijktijdig waargenomen zachtere tonen dusdanig beïnvloeden, dat het oor ze als "vals" ervaart.

De plaatselijke belasting van het basilair membraan door een continuïtoon van 800Hz ten opzichte van een kwint hogere toon voert tot een verlaging van de waargenomen toon van 7%: dat is meer dan een interval van een kleine seconde.

Het menselijk oor is weliswaar een hoogst gevoelig orgaan met een groot oplossend vermogen en een enorm dynamisch bereik: volmaakt in de zin van de HiFi gedachte is het niet.

PAS OP VOOR OVERDOSERING

♣ Lawaaivervuiling: geen bijkomstigheid

Waarmee we bij het thema lawaaivervuiling zijn. Er zijn tal van alledaagse aanslagen op ons gehoor: overkomende straaljagers en reclamevliegtuigjes, knetterende brommers en - misschien in mindere mate - Muzak, het geluidsdecor in warenhuizen, winkelcentra, passages, maar ook in liften, restaurants en via telefooncentrales. In agressiever vorm ook in kledingzaken, die tieners en twens willen lokken. En natuurlijk voor wie zich daar vrijwillig aan wil blootstellen: in disco's en tijdens house-parties bijvoorbeeld.

De gevaren daarvan zijn niet denkbeeldig, want bij overdosering kan gehoorbeschadiging optreden: men wordt min of meer doof, verliest het contact met de omgeving, met de medemens en

vereenzaamt, raakt geïsoleerd. Daarvan zijn dramatische gevallen bekend. Niet voor niets dragen werkers met luchtboren en -hamers, op luchthavenplatforms en artilleristen gehoorbeschermers.

Zover hoeft het niet eens te komen, om geluid als hinderlijk te ervaren. Het blijft merkwaardig, dat middelbare scholieren kunnen leren en denken terwijl voortdurend Radio 3 luid klinkt. Lawaai is dusdanig belangrijk in het milieu, dat in 1966 de UNESCO al een bepaling uitvaardigde, waarin het recht op stilte is vastgelegd. In ons milieurecht is stilte nog niet opgenomen als te beschermen goed naast grond, water en lucht.

Gehoorstoringen komen in gradaties voor. Iemand, die langdurig in een omgeving met (te)veel lawaai heeft vertoeft, merkt bij aankomst in een stille omgeving, dat hij wat dovig is (invloed van de gehoordempers in het middenoor), als de belasting zwaarder was, kan hij een hoge fluittoon horen. Bij hoge geluidsdrukken treden namelijk in het oor vervormingen op, waarbij combinatietonen ontstaan, die men subjectief waarneemt, maar die objectief niet aanwezig zijn. In dramatischer gevallen treedt doofheid op, vallen bepaalde frequentiegebieden uit, of blijft een permanente fluittoon "hoorbaar".

Wat gebeurt bij permanente gehoorbeschadiging? Het is dan, alsof de "stammen" van het gehoorcellenbos als bij een storm worden geveeld. Met een elektronenmicroscopie gemaakte foto's illustreren dit.

De narigheid is, dat regeneratie nauwelijks mogelijk is en dat ook operatief ingrijpen vooralsnog onmogelijk is.

Risico's

Om het risico op gehoorbeschadiging te vermijden, heeft de arbeidsinspectie normen opgesteld voor het maximaal geluidsniveau, dat per dag toelaatbaar is zonder dat blijvende gehoorbeschadiging optreedt. Deze tabel ziet er zo uit:

continu geluidsniveau	maximale verblijfsduur
80dB(A)	8 uur per dag
83	4
86	2
89	1
92	30 minuten
95	15
98	alleen met gehoorbeschermers

De pijngrens ligt zoals we straks zullen zien bij 120dB, een niveau, dat tijdens popconcerten binnen, in disco's en tijdens house-parties graag wordt overschreden en waaraan sommige gebruikers van Disc- en Walkmans zich graag blootstellen.

Literatuur:

R. Klinke: "Physiologie des Hörens" uit "Grundriss der Sinnesphysiologie" (Springer Verlag)