

A. qu. 192, 1957

OVER STEREO-AKOESIE

ON SPATIAL BINAURAL HEARING

G. A. SEDEE

s.
cht

OVER STEREO-AKOESIE

9cc

Miss. Utrecht 1957

OVER STEREO-AKOESIE

ON SPATIAL BINAURAL HEARING

WITH A SUMMARY IN ENGLISH

ACADEMISCH PROEFSCHRIFT

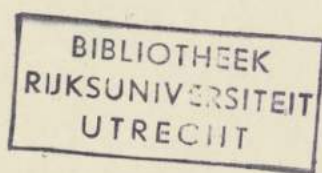
TER VERKRIJGING VAN DE GRAAD VAN DOCTOR
IN DE GENEESKUNDE AAN DE RIJSUNIVERSITEIT TE UTRECHT
OP GEZAG VAN DE RECTOR MAGNIFICUS

DR. L. SEEKLES,
HOOGLERAAR IN DE FACULTEIT DER DIERGENEESKUNDE,
VOLGENS BESLUIT VAN DE SENAAAT DER UNIVERSITEIT
TEGEN DE BEDENKINGEN
VAN DE FACULTEIT DER GENEESKUNDE
TE VERDEDIGEN OP DINSDAG 29 OKTOBER 1957
DES NAMIDDAGS TE 4 UUR 15 PRECIES

DOOR

GIJSBERT ANTON SEDEE

GEBOREN TE BATAVIA



DRUKKERIJ H. J. SMITS - OUDE GRACHT 231 - UTRECHT

OVER STEREO-AKOSIE

ON STEREO-AKOSIE

ON STEREO-AKOSIE

ACADEMIECH PROEFSCHRIFT

IN VERBODEN

IN VERBODEN

IN VERBODEN

Promotor:

PROF. DR. A. A. J. VAN EGMOND

IN VERBODEN

IN VERBODEN

IN VERBODEN

IN VERBODEN

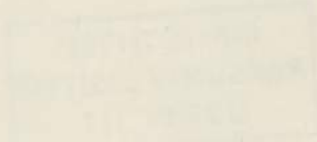
IN VERBODEN

IN VERBODEN

IN VERBODEN

IN VERBODEN

IN VERBODEN



Adres van de promovendus: Wilhelminapark 44 te Utrecht

Aan mijn Ouders

Aan mijn Vrouw

*Dit proefschrift
werd bewerkt in de Keel-, Neus- en Oorheelkundige Kliniek
van de Rijksuniversiteit te Utrecht*

*Het Heinsius-Houboltfonds danken wij
voor de schenking aan de Kliniek van de apparatuur
nodig voor het stereo-akoestisch onderzoek*

*De Directie van de Nederlandse Spoorwegen
danken wij voor de steun en de medewerking
bij het onderzoek*

VOORWOORD

Bij het afsluiten van de voorbereidingen, die verbonden zijn aan de uitgave van dit proefschrift, stel ik er prijs op terug te denken aan al diegenen, die mij geleid en geholpen hebben om deze mijlpaal in mijn leven te bereiken, en om hen te bedanken voor hetgeen zij voor mij gedaan hebben. Mede aan hen draag ik dit proefschrift op.

In de eerste plaats dank ik U, Vader en Moeder, die mij in staat stelden mij te ontwikkelen langs de juiste banen. Gij wist met zorg voor mij de opleidingsinstituten uit te zoeken en de goede maatschappelijke sfeer te scheppen.

Ik denk met dankbaarheid terug aan het Eerste Stedelijk Gymnasium en aan het Vrijzinnig Christelijk Lyceum te 's-Gravenhage. Vooral de herinneringen aan de laatstgenoemde school behoren tot de aangenaamste door het goede contact met de leraren, iets waar ik juist in die jaren grote behoefte aan had.

De tijd door mij doorgemaakt als lid van het Utrechtse Studenten Corps is onvergetelijk. Toen in die jaren de maatschappelijke spanningen — tengevolge van de vijandelijke bezetting — groter werden, kreeg ik ruimschoots de gelegenheid de innerlijke waarden van mensen onder omstandigheden van 'stress' mee te maken en mijzelf daaraan te spiegelen.

Aangezien de politieke situatie tijdens de bezetting het voor mij onmogelijk maakte, om onder leiding van mijn oorspronkelijke leermeesters mijn medische studie aan de Utrechtse Universiteit te voltooien, meende ik iets anders te moeten doen. Ik prijs mijzelf gelukkig, dat ik in staat ben geweest mij ter beschikking te stellen van de Nederlandse Regering in Londen.

De Chef van de Geneeskundige Dienst der Zeemacht buiten het Bezette Gebied, kapitein ter zee arts KETTLITZ, verstrekte mij de opdracht en de mogelijkheden om mijn medische studie aan de London University voort te zetten. Ik blijf hem hiervoor zeer erkentelijk.

Mede dank zij de zeer welwillende medewerking van de Engelse autoriteiten ben ik in de gelegenheid geweest deze opdracht uit te voeren.

De British Medical Council verklaarde zich bereid om genoeg te nemen met mijn examenresultaten zonder nadere schriftelijke bewijzen

omtrent vooropleiding. Zodoende kon ik daar het artsdiploma behalen, hetwelk mij de bevoegdheid geeft de geneeskunde uit te oefenen in het Britse Gemenebest met de daarbij aangesloten landen. In Nederland kon ik direct na de bevrijding alle vereiste examina afleggen met behulp van de kennis aan de London University opgedaan.

Tijdens de actieve vervulling van mijn dienstplicht bij de Koninklijke Marine, zowel in Nederland als in de Oost, ben ik in de gelegenheid geweest een ruime ervaring op te doen.

Hooggeleerde VAN EGMOND, Hooggeachte Promotor, Gij stelde mij in staat mij te wijden aan mijn liefde voor de kleine chirurgie en de zintuigfysiologie. Uw rustig en scherp kritisch inzicht zijn een zeer waardevolle leidraad voor mijn leven geworden. Uw vriendschappelijke adviezen en de vrijheid, die U Uw assistenten geeft om hun enthousiasme uit te leven, scheppen een sfeer, waarin het een genoegen is te mogen werken. Dit geestelijk milieu spiegelt zich af in onze houding tegenover de patiënt en zijn ziekte. Ik ben U zeer erkentelijk voor Uw wetenschappelijke leiding.

Geleerde GROEN, wanneer ik thans zonder al te veel moeite de fysica, betrokken bij de problemen van het labyrint, kan hanteren, dan dank ik dit aan U. Ik heb grote bewondering voor de wijze waarop en de liefde waarmee gij deze kennis in mij en mijn studiegenoten giet. Ik ben U dankbaar voor het onderricht en de steun, welke ik van U mocht ontvangen op dit voor medici zo moeilijke terrein.

Zeergeleerde DE WIT, niet alleen dat ik in mijn Utrechtse jaren veel van U heb mogen leren, reeds eerder — te Soerabaja — stelde U mij in de gelegenheid, op Uw afdeling in het Marine Hospitaal, oor-, neus- en keelziekten te zien. Uw wetenschappelijke kennis en behandelings-techniek zijn voor mij van grote waarde geweest. Voor het meedelen hierin ben ik U erkentelijk.

Geleerde TOLK, Uw bereidwilligheid om mij bij theoretische en technische moeilijkheden ter zijde te staan, is mij vaak tot grote steun geweest. Nooit deed ik tevergeefs een beroep op Uw hulp, waarvoor ik U zeer dankbaar ben.

Mede-assistenten, vrienden en kennissen, die voor mij de bewerking van dit proefschrift hebben mogelijk gemaakt en met wie ik vele jaren een prettige tijd heb doorgemaakt, aan U houd ik een aangename herinnering. Het is immers juist tijdens de omgang met collegae en vrienden, dat inzichten worden bijgeschaafd en gepolijst. De noodzaak tot explicatie en de discussie scherpen de zelfkritiek, welke onontbeerlijk is voor een harmonieuze ontwikkeling van de geest.

De heren VAN KLAVEREN en WOLKERS wil ik hartelijk bedanken voor

hun hulp op het gebied der techniek en voor de verzorging van het tekenwerk en de grafieken.

Mejuffrouw GERRITSEN, U ben ik dank verschuldigd niet alleen voor Uw voortreffelijk werk bij de bewerking van het manuscript, maar vooral ook om Uw volhardend geduld in dit werk naast Uw volle dagtaak.

Tenslotte dank ik alle anderen, die aan het totstandkomen van dit werk hebben bijgedragen.

Lieve DORA, geduldig heb je mij de gelegenheid gegeven veel van onze tijd te besteden aan de bewerking van dit proefschrift. Ik hoop en vertrouw, dat je in de totstandkoming van deze dissertatie een compensatie zal vinden voor de vele opofferingen, die je je getroost hebt.

TO MY BRITISH FRIENDS

As, during the war years, the measures by the enemy authorities made it impossible for me, for many reasons, to proceed normally with my studies at the State University of Utrecht, I joined the Allied Forces by putting myself at the disposal of the Royal Netherlands Navy.

After my arrival in London I was ordered to finish my medical studies and to qualify as soon as possible. The British Medical Council gave me the permission to take part in the preliminary and final examinations in medicine with the favour to prove what my knowledge was worth. The Teaching Staff of St. Mary's Medical School of the University of London offered me every opportunity to prepare myself for these examinations.

During this period of study I enjoyed the kind and for me indispensable help of really everybody at St. Mary's Medical School. Their friendship and assistance have helped me a great deal in my efforts to qualify as a bachelor of medicine in the United Kingdom and to become a licentiate of the Royal College of Physicians of London and a member of the Royal College of Surgeons of England. When a couple of months later the war was over and the occupation of my country had ended, the medical knowledge acquired in London enabled me also to qualify at the State University of Utrecht in the Netherlands. Apart from this medical knowledge, I took with me the memories of two wonderful years in the midst of a people among whom I felt quite at home.

I feel there is no borderline between us other than the North Sea.

INHOUDSOPGAVE

HOOFDSTUK I: INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING	1
HOOFDSTUK II: ENIGE GEGEVENS UIT DE GELUIDSLEER MET BETREKKING TOT DE STEREO-AKOESIE	7
HOOFDSTUK III: ENIGE ANATOMISCHE EN PHYSIOLOGI- SCHE GEGEVENS VAN HET GEHOORZINTUIG MET BETREKKING TOT DE STEREO-AKOESIE	16
HOOFDSTUK IV: PSYCHO-AKOESTISCHE FENOMENEN EN NEUROFYSIOLOGISCHE GEGEVENS	27
HOOFDSTUK V: STEREO-AKOESTISCHE PROEFNEMINGEN BIJ EEN NORMALE GEHOORFUNCTIE	43
EIGEN PROEFNEMINGEN 1	43
Proefopstelling	44
Richtinghoren	45
Afstandhoren	67
HOOFDSTUK VI: STEREO-AKOESTISCHE PROEFNEMINGEN BIJ PATHOLOGISCHE GEHOORORGANEN EN AF- WIJKINGEN IN HET CENTRAAL ZENUWSTELSEL	73
EIGEN PROEFNEMINGEN 2	73
Discussie	89
HOOFDSTUK VII: SAMENVATTING EN CONCLUSIES	91
SUMMARY AND CONCLUSIONS	96
GEBRUIKTE APPARATUUR	101
LITERATUUR	105

HOOFDSTUK I

INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING

Door de gehoorzin staat de mens voortdurend in contact met de wereld om hem heen. Iedere verandering van het geluidspatroon, dat uit die wereld tot hem komt, wekt een reactie in zijn zenuwstelsel op. Deze voortdurende stroom van verschillende geluiden dringt weliswaar niet steeds tot zijn bewustzijn door, maar de reacties blijven invloed uitoefenen, zelfs in de slaap. Overbekend is het verschijnsel, dat men wakker wordt, wanneer de wekker ophoudt te tikken. Minder bekend, maar voor iedereen duidelijk waarneembaar, is de verlammende sensatie, wanneer men een geluidsvrije ruimte binnenstapt. Het plotseling onderbreken van de stroom van geluiden uit een bekende omgeving geeft een beangstigend, onzeker gevoel: een verlies van „grond”.

Zo is de gehoorzin een uitstekend waarschuwingssysteem. Maar om adequaat op de waarschuwingen te reageren moet men kunnen horen waar het geluid vandaan komt. Biologisch gezien is het zinloos om van goed horen te spreken, wanneer men dit vermogen mist. Normaal horen is onafscheidelijk verbonden met het vermogen om *ruimtelijk* te kunnen horen.

Voor het horen van geluid is één oor voldoende, maar om de richting en de afstand van geluidsbronnen te kunnen bepalen zijn beide gehoororganen nodig. Dit berust op het feit, dat de twee gehoororganen door hun verschil in afstand ten opzichte van de geluidsbron en door de schaduwwerking van het hoofd een verschillend geluid ontvangen. Het vermogen om ruimtelijk te horen stelt een mens in staat zowel om zijn plaats te bepalen in de hem omgevende wereld, als om de informaties, die hij daaruit krijgt te onderscheiden naar hun ruimtelijke lokalisatie. Het normale horen is dus niet alleen afhankelijk van een goede functie van ieder oor afzonderlijk, maar ook van de correlatie van de prikkels uit beide gehoororganen in het centrale zenuwstelsel, waardoor het ruimtelijk horen tot stand komt.

Zo oud als de empirische akoestika is — de Oude Grieken maakten er in hun amfitheaters reeds ruim gebruik van — zo jong is de theoretische akoestische wetenschap. Voor de ontwikkeling van de laatste zijn goede elektronische hulpmiddelen nodig, waarmede frequenties, fase-

verschillen, intensiteiten en de tijdrelatie van geluidstrillingen nauwkeurig gemeten en gedoseerd kunnen worden. Vanaf het moment dat de geschikte apparatuur beschikbaar kwam, kon men zich met meer exacte gegevens aan de analyse van het ruimtelijk horen wijden. Het eerste experiment daarover met behulp van elektronische apparatuur is gedaan door ADER in 1881 ter gelegenheid van een tentoonstelling in Parijs. Hij gebruikte een kunsthofd met twee microfoons, gescheiden versterkingsapparatuur en hoofdtelefoons. Men kon zo een opvoering in de Opéra medebeluisteren. In 1933 (27 April) werd het Philadelphia-Washington experiment gedaan. Hierbij werd het geluid van een concertzaal in Philadelphia overgebracht naar een gehoorzaal in Washington op 160 km afstand.

Een getrouwe weergave van de orkestmuziek trachtte men te verkrijgen door middel van vele luidsprekers in de gehoorzaal. Iedere luidspreker was verbonden met een in plaats overeenkomende microfoon in de concertzaal. Het experiment door FLETCHER beschreven slaagde uitstekend. Het bleek zeer goed mogelijk te zijn de ruimtelijkheid van de oorspronkelijke muziek over te brengen, mits de akoestische eigenschappen van beide zalen overeenstemden.

De ruimtelijkheid van geluiden vindt zijn oorsprong daarin, dat geluidsbronnen op verschillende plaatsen gelokaliseerd zijn en dat de omgeving een invloed op het geluid uitoefent. De samenstelling van een geluid in een reflecterende omgeving is dus overal verschillend. De waarneming van de ruimtelijkheid van het geluid door de mens berust op het feit, dat de twee gehoororganen het geluid verschillend ontvangen, omdat zij aan weerszijden van het hoofd zijn geplaatst. Het nauwkeurig overbrengen en getrouw weergeven van de ruimtelijkheid van de muziek ligt geheel in het fysische vlak. Dit wordt een stereofonische weergave genoemd. Het vermogen om de ruimtelijkheid van het geluid waar te nemen ligt echter geheel in het fysiologische vlak. Daarom moet men dit vermogen stereo-akoësie noemen.

Na de eerste wereldoorlog was de belangstelling voor de stereofonie en stereo-akoësie sterk toegenomen. De zeer hoge eisen echter, die aan de elektronische apparatuur gesteld moesten worden, zoals bijvoorbeeld een distorsievrije overdracht van de trillingen tussen 10 en 10.000 Hz, leverden aanvankelijk grote technische problemen op.

Het twee-kanalsysteem, waarbij een kunsthofd met oorschelpen het menselijk hoofd vervangt, is het transmissiesysteem, dat de fysische condities voor stereo-akoësie en de meting daarvan het beste handhaaft. Voorwaarde hierbij is echter, dat het geluid van de telefoons in onze gehoorgang als zuiver luchtgeleidingsfenomeen afgeleverd wordt.

De praktische moeilijkheden hieraan verbonden maken dit systeem buiten het laboratorium echter voorlopig ongeschikt voor algemeen gebruik. Men heeft daarom getracht om met behulp van luidsprekers en reflectievrije wanden een bevredigend resultaat in dezelfde richting te bereiken. De toepassing van de laatste methode vindt men voornamelijk in theaters. Vroeger waren tekst en muziek illustratief. Thans is het geluid een onderdeel van het gebeuren en de toehoorder wordt erin opgenomen. Men dient echter voor ogen te houden, dat de eerder genoemde twee-kanalenmethode essentieel verschillend is van de laatste methode. Bij de twee-kanalenmethode brengt de waarnemer zijn „hoofd” op een plaats in de ruimte, waar het oorspronkelijke geluid zich bevindt. Met deze apparatuur zet hij zijn gehoororganen als het ware „op steeltjes” (kunsthoofd, versterkers, verbindingskabels en hoofdtelefoons). Maar bij de methode toegepast in de theaters moet de *illusie* van ruimtelijkheid opgeroepen worden met behulp van intensiteitsverschillen tussen rechter- en linkerzijde. Door deze vaak te wisselen wordt de aandacht „heen en weer” getrokken en dit geeft een *impressie* van ruimtelijkheid. Voor het transport van de trillingen worden wel twee kanalen gebruikt, maar het is geen stereofonische overdracht van het geluid. Er kan dus geen stereo-akoestische waarneming van het oorspronkelijke geluid op volgen. Bij alle methoden, welke gebruik maken van luidsprekers, tracht men in de omgeving, waarin men luistert en die eigen fysische constanten heeft, een andere ruimte te scheppen, die echter andere typische constanten heeft, namelijk die, waar de microfoons zich bevinden. De hierdoor opgeroepen conflicten moeten overstemd worden door accentuering van bepaalde grootheden en wel voornamelijk van de intensiteit. Het is duidelijk, dat dit een verwringing van het oorspronkelijke geluidsbeeld met zich mede brengt.

In het begin van deze eeuw hebben de militaire instanties de stereo-akoësie gebruikt om met behulp van grote luisterapparaten vliegtuigen op te sporen. Deze methode is obsoleet geworden, omdat de snelheid van de vliegtuigen zo is toegenomen, dat deze niet meer verwaarloosbaar is in verhouding tot de voortplantingssnelheid van het geluid. De interpretatie van een richting komt nu steeds te laat en schept een conflictsituatie met de indrukken van het gezichtsvermogen. Deze conflictsituaties treden in het dagelijks leven reeds veelvuldig op, zodat men meer in het algemeen genomen kan zeggen, dat in het moderne verkeer het gehoororgaan veel van zijn waarde als richtingbepaler voor waarschuwingssignalen gaat verliezen.

Wanneer wij de literatuur betreffende het ruimtelijk en richtinghoren

nagaan, vinden wij een groot aantal publikaties op dit gebied. Samenvattende overzichten zijn onder anderen gegeven door VAN GILSE (1930), KRAUS (1950), KIETZ (1953) en VAN DER VEER (1957). De stereo-akoestische proefnemingen berustten meestal daarop, dat een geblinddoekte proefpersoon bij directe waarneming van de geluidsbron moest aangeven, waar deze bron zich bevond. Hierbij kon de proefpersoon voor de richtingbepaling gebruik maken van het totaal aan informatie, te verkrijgen uit een geluid in een eindige ruimte met vele reflecterende vlakken, en rondom een hoofd. Het bleek steeds, dat de richting zeer nauwkeurig aangegeven kon worden.

Juist door de moeilijkheid om de bijdragen van de verschillende parameters van het geluid te ontrafelen, is in de loop van de geschiedenis iedere parameter reeds aangewezen als de voornaamste factor voor de verklaring van het richtinghoren. Wij geven hieronder de verschillende opvattingen weer:

1. de theorie van het verschil in intensiteit tussen de oren (KREIDL en GATSCHER);
2. de theorie van het verschil in de samenstelling van het geluidsspectrum in de twee oren;
3. de theorie van het verschil in de tijd van de aankomst van trillingen in de twee gehoororganen (VON HORNPOSTEL en WERTHEIMER);
4. de theorie van het verschil in fase van de trilling in de twee gehoororganen (LORD RAYLEIGH);
5. combinaties van twee of meer van bovengenoemde theorieën (o.a. REICH en BEHRENS).

Thans is de meest gebruikelijke opvatting, dat zowel het tijdsverschil tussen linker- en rechteroor als ook het intensiteitsverschil in alle frequenties bepalend is (VON BÉKÉSY). Deze is verschillend van de theorie, volgens welke voor de lage tonen alleen fase-(tijd)-verschil van belang is en voor de hoge tonen alleen het intensiteitsverschil (RANKE).

In al deze theorieën is de oorzaak van het richtinghoren gezocht in het verschil in samenstelling van het geluid bij aankomst in de beide organen van Corti. De verschillende onderzoekers hebben meestal één der onder 1° tot 5° genoemde factoren als oorzaak van het verschijnsel onderzocht en daaruit hun conclusies getrokken. In de proefnemingen, welke hier beschreven zullen worden, is een zodanige proefopstelling gekozen, dat alle factoren, die tot de stereo-akoësie kunnen bijdragen, afzonderlijk of in verschillende combinaties konden worden gebruikt. Wij hoopten hierdoor een bijdrage te kunnen leveren tot een beter inzicht in het werkingsmechanisme van de stereo-akoësie. Uiteindelijk komt de stereo-akoësie niet in de perifere gehoororganen, maar in het

centrale zenuwstelsel tot stand. Dit is een zijde van het ruimtelijk horen, die, van de medische kant gezien, nadere aandacht verdient. De mogelijkheden, welke de stereo-akoësie in zich sluit, en de nauwkeurigheid waarmee richting geschat kan worden, zijn als methode van onderzoek nog niet voldoende tot hun recht gekomen.

Het belang van deze facetten van het ruimtelijk horen heeft ons ertoe gebracht een onderzoek in te stellen naar de nauwkeurigheid van schatting van de stereo-akoësie. Wij hebben de volgende vragen als probleemstelling aangenomen:

- a) Op grond van welke informatie kan een mens ruimtelijk horen?
- b) Hoe groot is de nauwkeurigheid van richting- en afstandbepalen van een normaal individu?
- c) Wat is de invloed van pathologische toestanden hierop?
- d) Wat zijn de consequenties van onze bevindingen voor de bestaande opvattingen?

Ruimtelijk horen heeft twee facetten. Men kan onderscheid maken tussen:

- A) het vermogen van een waarnemer om te horen uit welke richting een geluid komt: het richtinghoren, en
- B) het vermogen van een waarnemer om met behulp van zijn gehoor de afstand van de geluidsbron tot zichzelf te schatten: het afstandhoren.

Op grond van bekende verschijnselen en theoretische overwegingen gaan wij uit van de hypothese, dat richtinghoren zijn voornaamste grondslag heeft in het tijdsverschil, waarmee een trilling de beide organen van Corti prikkelt. Faseverschillen kan men hierbij als tijdsverschillen opvatten. Bij het afstandhoren is een tijdsverschil alléén niet voldoende voor een juiste bepaling. Het zal later blijken, dat hiervoor de gereflecteerde trillingen noodzakelijk zijn. De waarnemer kan dan het geluid met andere omgevingsgeruisen vergelijken op dezelfde wijze als afstandzien ook het trekken van een vergelijking tussen object en omgeving is. Hieruit blijkt, dat afstandhoren een meer complex gebeuren is dan richtinghoren.

Ter bevestiging van deze opvattingen hebben wij een aantal proefnemingen gedaan om de tijdsverschiltheorie aan de werkelijkheid te toetsen. Hierbij stellen wij voorop, dat de verschillen in de parameters van de geluidstrilling, zoals deze het linker- en het rechteroor binnenkomt, niet alleen behoeven te bestaan uit:

- a) fase- en tijdsverschillen tussen overeenkomstige trillingen van het geluid en verschillen tussen de intensiteit of de spectrale energieverdeling op een bepaald tijdstip, maar ook

- b) veranderingen in bovengenoemde verschillen, als functie van de tijd tengevolge van beweging van de receptoren ten opzichte van de geluidsbron of bij verandering van de geluidsprikkel.

Wij zullen nagaan, welke het effect is van elk dezer invloeden afzonderlijk op de waarneming met normale en pathologische gehoororganen. Hiertoe hebben wij een proefopstelling gemaakt, waarbij de verschillen in de parameters van de geluidstrillingen, welke de trommelvliezen bereiken, op fysisch controleerbare wijze gevarieerd kunnen worden.

Vooraf echter zullen wij de samenstelling van het fysisch substraat buiten het menselijk lichaam nagaan, dat de mogelijkheid tot ruimtelijk horen schept. De problemen, betreffende de voortplanting van het geluid, de veranderingen in de spectrale energieverdeling van de trillingen om het hoofd en het ontstaan van tijdsverschillen aan de twee trommelvliezen is zover opgelost, dat onderzoekers in de laboratoria van de Bell Telephone Company reeds jaren geleden de uitspraak deden: „We know what the equipment can do, not yet what the listener can do.” Ter verduidelijking van ons betoog zullen wij in Hoofdstuk II enkele punten uit de geluidsleer beschouwen voor zover deze van belang zijn voor het fysisch substraat van de stereo-akoësie.

Aangezien het richtinghoren berust op kleine verschillen tussen, en veranderingen in de fysische grootheden van de geluidsgolven, zoals deze aankomen aan de ovale vensters, moeten alle proefnemingen binauraal zijn. Deze verschillen en veranderingen worden ten eerste beïnvloed door de anatomische verhoudingen van het uitwendige en het middenoor, en de verschillen, die kunnen bestaan tussen de twee organen. Deze bijzonderheden worden in Hoofdstuk III behandeld.

Door de omzetting van de mechanische prikkel in een zenuwprikkel in de haarcellen van het orgaan van Corti en door het transport van deze prikkels in de aansluitende zenuwbanen worden de informaties langs de nervi acustici naar het cerebrum nauwkeurig overgebracht. De informaties uit de twee cochleae zijn bijna altijd verschillend, maar vormen juist daardoor de grondslag voor de stereo-akoësie.

Om de waarde van de verschillen tussen de informaties te kunnen bespreken, moet men rekening houden met alle fenomenen van het monaurale horen. Na summatie van al deze verschijnselen in één gehoororgaan wordt dit complex gecorreleerd met een dergelijk complex, dat uit het andere gehoororgaan komt. Hieruit kan de mens zich een beeld vormen van de wereld om zich heen. Wij zullen deze verschijnselen in Hoofdstuk IV bespreken.

HOOFDSTUK II

ENIGE GEGEVENS UIT DE GELUIDSLEER MET BETREKKING TOT DE STEREO-AKOESIE

Eén van de grootheden, die in dit betoog veel zullen voorkomen, is de fase van een trilling. Deze parameter geeft de trillingstoestand op een bepaald moment weer. De fase is de hoek, welke de voerstraal maakt met de positieve horizontale as van een cirkel. Deze hoek wordt dikwijls met φ aangeduid. De fase van een enkele trilling is meestal niet belangrijk; wel komt het er op aan het faseverschil tussen twee trillingen van eenzelfde frequentie en gelijke, of nagenoeg gelijke amplitude te kennen.

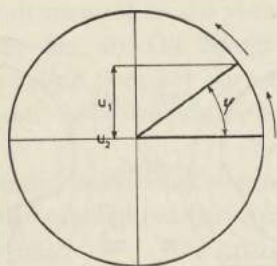


Fig. 1.

Hulpfiguur voor de voorstelling van een faseverschil:

$$U_1 = A \sin (\omega \tau + \varphi)$$

$$U_2 = A \sin \omega \tau$$

In Fig. 1 worden twee dergelijke trillingen in de gebruikelijke hulpvoorstelling afgebeeld. De fase van de eerste is φ , terwijl die van de tweede juist nul is. Het faseverschil is dus φ . Indien wij een sinusoidale trilling op haar weg door de „vrije ruimte” volgen, zullen wij de opeenvolgende punten in verschillende fasen aantreffen. Bij een momentopname van dit golfverschijnsel. blijkt, dat het faseverschil tussen twee punten op afstand l van elkaar gelegen in de voortplantingsrichting, bepaald wordt door de golflengte λ van de trilling.

Het faseverschil is dan $\frac{l}{\lambda} \times 2\pi$ radialen (1 radiaal is $\frac{360^\circ}{2\pi}$, dit is ongeveer 57°).

De voortplantingssnelheid van het geluid is constant voor intensiteiten kleiner dan 120 dB boven het niveau 0,0002 dyne/cm². Zij is echter wel afhankelijk van de stijfheid en van de dichtheid van het medium (NEWTON). In lucht van 760 mm Hg en 0° is de voortplantingssnelheid circa 33.000 cm/sec.

Voor het stereo-akoestisch onderzoek is het van belang de wijzigingen in de geluidsterkte en trillingsvoortplanting in het medium te kennen. Reeds op grond van fysische overwegingen zouden sommige opvattingen omtrent ruimtelijk horen veel van hun kracht kunnen verliezen. Wij zullen daarom enkele belangrijke verschijnselen nader in beschouwing nemen.

Zoals bekend mag worden verondersteld plant de golfbeweging van het geluid zich in de ruimte rechtlijnig voort. Zodra er een obstakel aanwezig is, wordt de golfuitbreiding verstoord. Er ontstaat een geluidsstuwung aan de direct bestraalde zijde en een geluidsschaduw aan de zijde afgewend van dat obstakel. Voor enige geometrisch eenvoudige

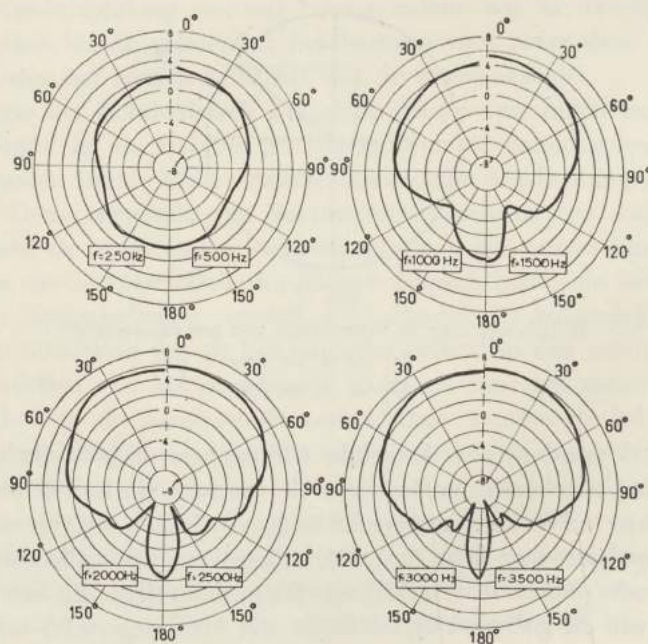


Fig. 2.

Het effect van diffractie om een bol van 21 cm voor de verschillende frequenties.

De toename en vermindering van de geluidsdruk ten opzichte van die in het „vrije veld”, is opgegeven in stappen van 2 dB.

De diagrammen zijn slechts voor de helft weergegeven, omdat de andere helft symmetrisch is (uit MORSE).

voorwerpen is de stuwing en de schaduw berekend. Wij verwijzen hiervoor naar de handboeken der geluidsleer (b.v. MORSE). Wel van belang is het een indruk van de grootte van het effect te hebben. Wij geven de figuren, zoals deze door MORSE berekend en gemeten zijn, in Fig. 2. Hij bepaalde de intensiteiten van trillingen aan de oppervlakte van een bol vergeleken met die in het „vrije veld”. Van bijzonder belang voor ons onderzoek is het effect, dat de geluidsschaduw sterker is naarmate de frequentie hoger is. Het verband tussen de hoek van inval van het geluid en de intensiteitsverhouding van dat geluid aan de twee polen van de bol, kan zeer grillig zijn.

Als men Fig. 2 in ogenschouw neemt, kan men nu reeds voorspellen, dat richtinghoren bij zuivere tonen op grond van intensiteitsverschillen als functie van de hoek van inval, zeer onwaarschijnlijk is, aangezien de curven aangeven, dat voor uiteenlopende azimutwaarden een gelijk intensiteitsverschil bestaat.

In het gebied van de lage tonen (beneden 300 Hz) kan nauwelijks van enige schaduw gesproken worden. Zeer sterk is de schaduwwerking boven 5000 Hz. Hier vindt men tot 25 dB verzwakking ten opzichte van het ongestoorde veld (zie Fig. 3). Dit brengt met zich mede, dat het timbre van een complex geluid door het oor aan de schaduwzijde doffer gewaardeerd wordt dan aan de bestraalde zijde.

Daar wij ook bij onze metingen vaak van een witte ruis gebruik gemaakt hebben, geven wij volledigheidshalve nog de verhouding van de

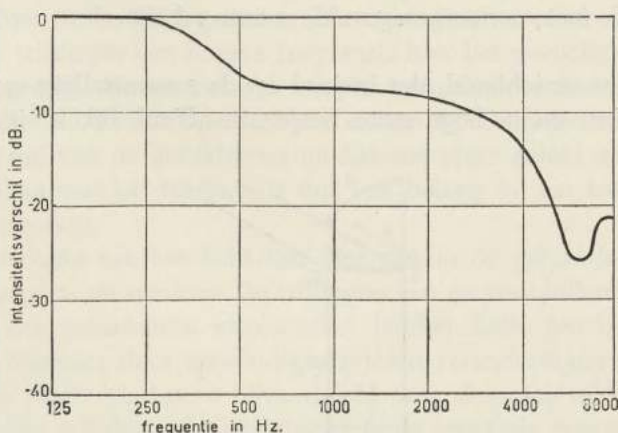


Fig. 3.

De intensiteitsvermindering in een oor, wanneer een bron van zuivere tonen zich aan de andere zijde van het hoofd bevindt
(STEINBERG en SNOW).

totale intensiteiten in linker- en rechteroor als functie van het azimut bij witte ruis weer (zie Fig. 4).

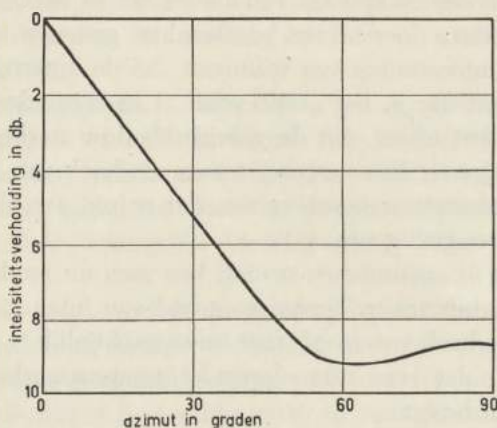


Fig. 4.

De verhouding tussen de intensiteit van een witte ruis in het linker- en rechteroor als functie van het azimut.

Volgens de theorie van HUYGENS ontstaat de buiging van geluidsgolven, doordat iedere massa van het medium op zijn beurt als trillingsbron kan fungeren en trillingen naar alle kanten kan uitzenden. Op deze wijze „vullen” de geluidstrillingen — ook achter objecten — de gehele ruimte en het hangt slechts van de inwerking op elkaar af hoe groot de amplitude van de trillingsbewegingen op de verschillende punten in de met voorwerpen gevulde ruimte zal zijn.

Een ander verschijnsel, dat invloed op de samenstelling van het geluid uitoefent en in hoge mate frequentie-afhankelijk is, is de inter-

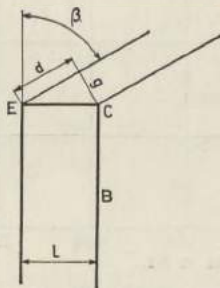


Fig. 5.

Uitdemping van een trilling in een buis ten gevolge van interferentie bij schuine inval van het golfvront.

ferentie in een open pijp. De uitwendige gehoorgang kan opgevat worden als een open pijp en heeft daardoor invloed op de overdracht van de trillingen naar het trommelvlies.

Een geluid, dat scheef in het lumen van een open pijp valt, kan veranderingen ondergaan.

Stel g is het golffront van een trilling en B is een buisvormig lumen met diameter L (zie Fig. 5). Bij C is het golffront g in een bepaalde fase-toestand. Wanneer de lengte d gelijk is aan een halve golflengte, is er in E een fasetoestand, welke juist 180° verschilt met die in C . Door interferentie van de twee trillingen ontstaat er geen trillingsfront in buis B .

Dit gebeurt bij een frequentie waarvan de $\lambda = \frac{1 + 2n}{2} \times L \sin \beta$ (n is nul of een natuurlijk getal).

Wanneer men de invalshoek van het geluid varieert, zal de intensiteit van de trilling in de buis maxima en minima doorlopen. De intensiteitsverzwakking tengevolge van de invalsricting is voor iedere frequentie anders.

De uitbreiding van de trillingen is afhankelijk van de demping in het medium. De demping neemt toe naarmate de frequentie hoger is, want hij is een gevolg van de inwendige wrijving in de materie. Deze wrijving zet bewegingsenergie om in warmte en daarmede is de trilling onhoorbaar geworden. De demping bepaalt dus de afstand, waarover een trilling hoorbaar voortgeplant wordt. Om deze reden kan demping een verandering in het timbre van een geluid veroorzaken. Bij mistig weer worden de geluidstrillingen sterker gedempt naarmate het gehalte aan waterdeeltjes in de lucht groter is (NEWTON). Zoals reeds boven gezegd is, zijn de trillingen van hogere frequentie hier het gevoeligst voor. Dit heeft tot gevolg, dat een bekend complex geluid onder deze omstandigheden doffer klinkt dan op een klare winterdag. De hoge tonen zijn op enige afstand van de geluidsbron uit het complexe geluid gefilterd. De samenstelling van het medium is dus van belang bij het transport van de trillingsgolven.

Naar analogie van het licht kan men ook in de geluidsleer van een frequentiespectrum spreken. De trillingen van de verschillende frequenties door een geluidsbron uitgezonden, hebben ieder een bepaalde intensiteit. Wanneer door uitwendige factoren veranderingen in deze intensiteiten plaats vinden — bijvoorbeeld door demping of reflecties — dan betitelen wij deze als wijzigingen in de spectrale energieverdeling van het geluid.

Wanneer een geluid niet een enkelvoudige sinustrilling is, maar een complex van verschillende trillingen — zoals de geluiden in het dagelijks

leven bijna steeds zijn — blijken de bewegingen van de luchtdeeltjes zeer ingewikkeld te zijn. Op de oscillograaf kan men het zeer complexe karakter van deze geluiden zichtbaar maken. Voor de ontrafeling hiervan is een frequentie-analysator nodig.

Eén van de theoremata van de trillingsleer is het theorema van FOURIER. Dit zegt: elk *periodiek* verschijnsel, hoe complex ook, kan steeds ontleed worden in een *eindig* aantal enkelvoudige sinustrillingen, waarvan de frequenties veelvouden van elkaar zijn, en welke trillingen onderling verschillen in amplitude en fase. De meeste geruisen zijn echter een *aperiodisch* verschijnsel. Ook deze geluiden kunnen ontleed worden volgens het theorema van FOURIER. Nu wordt het aantal enkelvoudige sinustrillingen *oneindig* groot. Het mooiste aperiodische verschijnsel is de „ideaal-witte ruis” — zo genoemd naar analogie van wit licht, dat alle zichtbare golflengten bevat. Deze ruis bevat trillingen van alle hoorbare frequenties, gelijkelijk verdeeld en van gemiddeld gelijke intensiteit.

Slechts zelden vindt de voortplanting van het geluid ongestoord plaats. Meestal bevinden zich in het geluidsveld voorwerpen met afmetingen, welke ten opzichte van de golflengte groot genoemd mogen worden, bijvoorbeeld de wanden van een kamer. De geluidsgolf kan door deze obstakels gereflecteerd worden. De reflecterende eigenschappen van een voorwerp staan in verband met het verschil in ρc -waarde van dat voorwerp en van de lucht op het scheidingsvlak. Hierin vertegenwoordigt ρ de elastische compactheid van de massa van het materiaal, samenhangende met het S.G. en c de voortplantingssnelheid voor geluidstrillingen in die stof. Indien de ρc -waarde van het weerkaatsende materiaal niet veel verschilt van die van lucht, gaat het trillingsfront bijna ongestoord over in het nieuwe medium.

Om een indruk te geven van de grootte van de ρc -waarde van enige stoffen, laten wij hieronder enkele verhoudingswaarden volgen vermeld door TRENDLENBURG.

waterstofgas	11,0
lucht	41,5
trommelvlies bij 800 Hz.	40
trommelvlies bij 200 Hz.	250
water	148000
staal	3940000

(uit: *Gehör, Stimme und Sprache*, RANCKE)

Het trommelvlies heeft bij lage frequenties een grote ρc -waarde ten opzichte van die van lucht. In dit frequentiegebied wordt een gedeelte van de trillingsenergie teruggekaatst. Bij 250 Hz is dit ongeveer 30%. In

de frequenties van het middengebied (van 800 Hz af) zijn de ρ c -waarden van het trommelvlies en lucht vrijwel gelijk: de terugkaatsing is gering (KIETZ). Bij deze frequentie en hoger is de aanpassing van het overbrengingsmechanisme van trommelvlies tot stapesplaat optimaal. De afstraling in de lage frequenties door het trommelvlies werkt er aan mede om de grote energieën van deze trillingen uit de cochlea te weren.

Reflecties zijn van invloed op de intensiteit van het geluid in een ruimte. Daarom is het moeilijk de sterkte van een geluid op een bepaalde plaats te berekenen. Het samenspel van geluidsbron en reflecties bepaalt het akoestisch resultaat. Dit feit is van zeer groot belang voor de auditieve oriëntatie. Reflecties in een ruimte zijn de oorzaak van het begrip nagalmtijd. Dit is de tijd, waarin een trilling heen en weer gereflecteerd wordt in een ruimte. De reflecties mogen niet te vlug uitsterven, want dat maakt een ons bekend geluid zacht en „dun”. Hier staat tegenover, dat de duur van uitsterven, ook wel genoemd de reverberatietijd, niet te lang mag zijn, want dan gaat de ruimte galmen. Dit kan de waarneming van het oorspronkelijke geluid sterk verstoren.

Geluidstrillingen kunnen door reflecties tengevolge van additie en tegenfase zichzelf zodanig beïnvloeden, dat er staande golven ontstaan met „knopen en buiken”. Dit veroorzaakt een wijziging in de samenstelling van het sterktepatroon van het geluid, welke niet overeenkomt met het geluidsveld van de geluidsbron, maar met dat van de galmende ruimte. De geluidsintensiteit in het afgewende oor kan daarbij groter zijn dan in het toegewende oor, bijvoorbeeld, wanneer bij het afgewende oor juist een trillingsbuik aanwezig is.

In het geval, dat een geluidsbron en een receptor zich ten opzichte van elkaar bewegen, zal de frequentie van de geluidsbron schijnbaar veranderen. Naderen de receptor en de geluidsbron elkaar, dan is de waargenomen frequentie gelijk aan de uitgezonden frequentie + het aantal golflengten, dat de afstand tussen beide per seconde kleiner is geworden. Omgekeerd zal de waargenomen toonhoogte lager zijn als de afstand groter wordt tussen de geluidsbron en de receptor

$$\frac{c + w}{c} \times f = f_1.$$

Hierin is f = frequentie van de geluidsbron,

c = voortplantingssnelheid in het medium en

w = de snelheid, waarmee de afstand tussen de waarnemer en de geluidsbron verandert. Deze is positief

bij kleiner wordende afstand tussen geluidsbron en receptor, en negatief bij groter wordende afstand. Dit verschijnsel wordt het DOPPLER-effect genoemd.

Een eenvoudige stereometrische constructie laat zien, dat de bron van een geluid, dat een bekend tijdsverschil en een bekend intensiteitsverschil in twee receptoren opwekt, is gelegen op een cirkel (zie Fig. 6).

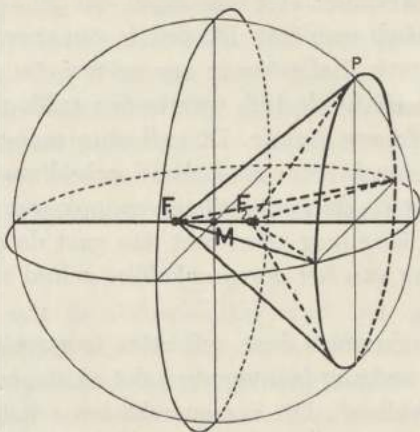


Fig. 6.

Stereometrische figuur van punten met een gelijk verschil tussen PF_1 en PF_2 .

Stel dat de punten F_1 en F_2 twee receptoren voorstellen. Uit de bekende: $PF_1 - PF_2$ is gegeven tijdsverschil en $\frac{(PF_1)^2}{(PF_2)^2} = \frac{I_2}{I_1}$ is gegeven intensiteitsverschil, kan een cirkel geconstrueerd worden op een vlak loodrecht op de as door de receptoren $F_1 F_2$, zodanig dat de as door het middelpunt van de cirkel gaat.

Tijdsverschil en intensiteitsverhouding kunnen dus wel dienen voor een afstandsbeplating, maar niet voor de lokalisatie van de geluidsbron.

Ditzelfde geldt ook voor een bol, waar de receptoren op de polen gelegen zijn. Er moet dus nog verdere informatie uit een ander gegeven verkregen worden (K. DE BOER). Van belang voor het ruimtelijk horen en vooral voor de afstandsbeplating van een geluidsbron zou de parallaxwerking kunnen zijn, welke ontstaat bij beweging. KLENSCH heeft dit verschijnsel beschreven voor het geluid. Het principe is geheel gelijk aan de parallaxwerking voor lichtstralen.

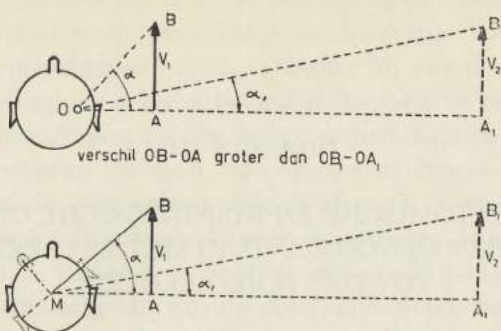


Fig. 7.

De verandering van azimut (α en α_1) is verschillend voor nabij- en verafgelegen geluidsbronnen.

De verandering in intensiteit is ook verschillend.

(Overgenomen van KLENSCH).

Wanneer de geluidsbron zich over een afstand v_1 voortbeweegt (Fig. 7), verplaatst de richtingsindruk voor het nabijgelegen voorwerp zich over een hoek α . Voor de verderafgelegen geluidsbron, die zich over een gelijke afstand v_2 voortbeweegt, is deze hoek α_1 . Deze is kleiner dan α .

Verder verandert de afstand van de geluidsbron tot het oor en daarmee ook de spectrale energieverdeling. Deze wijzigingen in de energieverdeling zijn voor de twee gehoororganen verschillend en hieruit kan de waarnemer informatie verkrijgen.

HOOFDSTUK III

ENIGE ANATOMISCHE EN FYSIOLOGISCHE GEGEVENS VAN HET GEHOORZINTUIG MET BETREKKING TOT DE STEREO-AKOESIE

Het gehoororgaan bestaat uit een mechanisch gedeelte, dat de prikkel voortgeleidt tot in het binnenoor en een gedeelte, waarin de mechanische prikkel in een prikkel voor het zenuwweefsel wordt omgezet en vervolgens voortgeleid tot de cortex cerebri.

De werking van het mechanische gedeelte is van vele factoren afhankelijk. Wij zullen deze nader beschouwen en bepalen, welke invloed zij kunnen hebben op de oorspronkelijke trillingsfiguur en daardoor op het ruimtelijk horen. Ook de normale functie van het neurologische gedeelte kan beïnvloed worden.

Voor de systematische bespreking van deze materie hebben wij het gehoororgaan op de gebruikelijke wijze onderverdeeld in:

- a) het uitwendige oor, d.w.z. de oorschelp en de uitwendige gehoor-gang.
- b) het middenoor, d.w.z. het trommelvlies, de keten van gehoor-beentjes met het ligamentum annulare om de stapesplaat, de middenoorspiertjes, de luchtbel tussen trommelvlies en promon-torium en het ronde venster.
- c) het binnenoor, d.w.z. de ruimte binnen het benig labyrint met het orgaan van Corti, het ganglion spirale en de nervus cochlearis en
- d) de centrale gehoorbanen, welke beginnen bij de intrede van de nervus octavus in de medulla oblongata en die het „centrum” voor de correlatie van de twee gehoororganen passeren.

a) *Het uitwendig oor*

De mens heeft in vergelijking met vele dieren relatief platte oorschelpen, welke weinig of niet bewogen worden bij het horen. Met het toenemen van het hersenvolume is bij de hogere primaten het schedeldak zoveel hoger boven de schedelbasis met het rotsbeen en de oorschelp gekomen, dat het cranium meer geluidsschaduw geeft dan de oorschelpen. Bij deze veranderde anatomische verhoudingen heeft be-

weging van de oorschelpen voor de lokalisatie van een geluidsbron in het horizontale vlak weinig zin. De mens draait zijn hoofd, terwijl een dier alleen zijn oorschelpen beweegt (KRAUS). Bij vele dieren, waarbij de oren zich boven op de schedel bevinden, kunnen de beweegbare oorschelpen voor het aftasten van de ruimte dienen. Er zijn echter verschillende dieren, waarbij de oren zich weliswaar boven op de schedel bevinden, maar de oorschelpen vrijwel afwezig of weinig beweeglijk zijn, b.v. zeehonden. Niettemin kunnen deze dieren zeer goed richting-horen, zoals blijkt, wanneer er jacht op hen wordt gemaakt.

Toch is de aanwezigheid van de oorschelpen voor het richtinghoren voor de mens wel van belang. VAN GILSE en ROELOFS hebben dit aangetoond door de conchae van de oren zodanig op te vullen met was, dat de schelpen glad met het hoofd verliepen. De proefpersonen konden de geluidsbron dan niet meer juist lokaliseren. Zowel JONGKEES en GROEN (1946) als KIETZ deden proeven, waarbij zij buisjes in de gehoorgangen staken. Deze pijpjes waren even breed als de gehoorgang en van zodanige lengte (6 cm), dat wel de oorschelpen hun functie verloren, maar niet zo lang, dat de buisjes veel veranderingen in intensiteit of frequentiespectrum van het aangeboden geluid veroorzaakten. Genoemde onderzoekers deden ook proeven, waarbij de oorschelpen tegen het hoofd aangedrukt werden. Onder beide omstandigheden verloren de proefpersonen het onderscheidingsvermogen of een geluidsbron vóór of achter hen in de ruimte gelegen was. Erger nog, het geluid werd ook achter het hoofd gelokaliseerd, wanneer de geluidsbron zich vóór het hoofd bevond. De proefpersoon hield bij deze proeven de ogen gesloten om te voorkomen, dat hij de geluidsbron achter zich projecteerde, omdat hij hem niet zag. De verklaring, dat de waarnemer de bron achter zich hoorde, berust op het feit, dat de concave zijde van de oorschelpen de van vóór komende geluidstrillingen, vooral de hoge tonen, in de gehoorgang stuwt en de convexe zijde van de oorschelpen het geluid van de dorsale zijde komend tegenhoudt. Deze afscherpende werking heeft een vermindering van intensiteit van hoge tonen tot gevolg (zie Hoofdstuk II). Dit geldt alleen in een ruimte met reflecties en met complexe geluiden. De mens heeft door ervaring geleerd, dat er een verschil in klankelement — dat wil zeggen het gehalte aan boventonen — bestaat tussen geluid, dat van vóór en dat van achter het vlak door de oorschelp komt (RANKE). Hoe meer dit vlak, waarin de oorschelp ligt, naar achteren wijst, des te sterker wordt de geluidsbron naar achteren gelokaliseerd. Als aan beide zijden de oorschelp tegen het hoofd ligt of als er geen oorschelp bestaat, ondergaat de waarnemer de sensatie, dat de geluidsbron recht achter hem gelegen is. Op grond hiervan is het begrijpelijk,

dat de hoge tonen — tussen 2000 en 4000 Hz — een zeer belangrijke informatie in de vóór-achter waardering geven. Als later gebruik gemaakt zal worden van een kunsthoofd, zal terdege rekening gehouden moeten worden met de functie van de oorschelpen. KIETZ heeft kunstmatige oorschelpen aan de oorpijpjes gemaakt. Hiermede bootste hij de fysiologische toestand na en bevond nu, dat de vóór-achter waardering veel beter was.

De reflecterende eigenschappen van de conchae hebben wij vergeleken met die van karton door middel van gelijke luidheidsschattingen. Wij kwamen daarbij tot de conclusie, dat er weliswaar een geringe verhoging van de geluidsintensiteit aan de aanwezigheid van de conchae te danken is, maar niet in die mate als de oppervlakte van de conchae zou doen verwachten. Wij achten daarom de afschermende werking van de schelpen van groter invloed op de intensiteiten in het geluidsveld dan de geluidsstuwende werking.

Dat men toch beter kan horen, wanneer men de hand achter het oor houdt, is algemeen bekend. Vooral de grijsaard met een discantdoofheid maakt hiervan gebruik. Hij maakt de schelp zodoende groter en holler. Afgezien van een geringe vermeerdering van de totale geluidsdruk aan het trommelvees worden juist de hoge tonen van het frequentiespectrum beter in de gehoorgang gestuwd (KREIDL en GATSCHER, VAN GILSE). Door de vergroting van de oorschelp met de hand nemen de intensiteiten van de hogere frequenties ten opzichte van de lagere toe. Dit doet de spraakinformatie stijgen. Zo „verstaat” de grijsaard de aangeboden geluidsprikkel beter. Het wel of niet waarnemen van de hoge tonen in één oor zou dus van invloed op het ruimtelijk horen kunnen zijn. De verschillen in intensiteit en spectrale energieverdeling tussen de gehoororganen, die op deze en hierna te bespreken wijzen ontstaan, zijn op het richtinghoren van invloed, indien de factor intensiteitsverschil hiervoor van belang is.

Het volume (lengte en diameter) van de gehoorgang, noch zijn vorm schijnen een merkbare invloed uit te oefenen op de gehoorfunctie. Een gehoorgang, bijna geheel gevuld met cerumen of bijna afgesloten door andere oorzaken, heeft een nagenoeg even goede akoestische functie als een normale open gehoorgang, tenminste zo lang er nog maar enig lumen bestaat in de gang naar het trommelvees, dat zich vrij moet kunnen bewegen (VAN DISHOECK, DE WIT, LÜSCHER). Dit feit is welbekend uit de oorheelkundige praktijk. Het plotseling ontstaan van een slechthorendheid geeft het moment aan, waarop het lumen juist geheel afgesloten is.

De resonantie van de gehoorgang met de normale afsluiting van het

middenoorsysteem ligt bij ongeveer 3000 Hz. Dit is experimenteel vastgesteld door von Békésy (1932) en door WIENER en ROSS (1947) (zie Fig. 8). Zij maten het verschil in geluidsintensiteit aan de buitenzijde van de gehoorgang en aan het trommelvlies. De conditie van de bijholten in het mastoïd, de middenoorspiertjes en de luchtbel in het middenoor zijn van invloed op de resonantie.

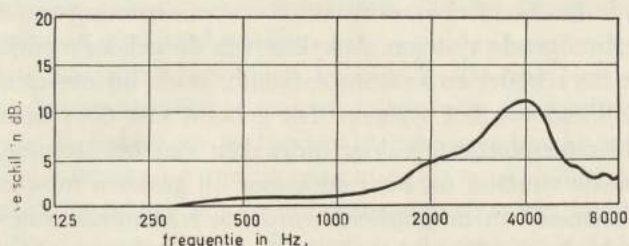


Fig. 8.

Verhouding tussen geluidsdruk aan het trommelvlies en aan de ingang van de gehoorgang in decibels.

(Overgenomen van WIENER en ROSS).

Door FLEMING en von Békésy zijn eveneens dergelijke waarden gevonden. LITTLER blies de gehoorgang aan over de tragus zoals dat bij een orgelpijp geschiedt. Ter contrôle deed hij dit ook in een met waterstofgas gevulde ruimte (de voortplantingssnelheid in waterstofgas is viermaal zo groot als in lucht). De verschillende media in aanmerking genomen vond hij, dat de resonantie van de gehoorgang weer in hetzelfde frequentiegebied lag als hierboven vermeld. Verder schijnen de gehoorgangen voor het gehoor geen andere functie te bezitten dan bescherming van het zeer gevoelige zintuigapparaat, zowel tegen directe beschadiging door geweld, als tegen uitdroging en temperatuursverschillen van de omgevende lucht.

b) Het middenoor

Het trommelvlies, de drie gehoorbeentjes en het ligamentum annulare om de stapesplaat, de middenoorspiertjes, het ronde venster en de luchtbel worden — op grond van hun werking — tot het middenoor gerekend. Zij bezitten de fysiologische functie om de energie van de geluidstrillingen in de lucht op geschikte wijze over te dragen op het met vloeistof gevulde binnenoor. De impedantie van dit laatste systeem is zeer veel groter dan de impedantie van de trillende lucht-

kolom in het uitwendige oor. Het middenoor-mechanisme heeft onder andere de functie om de twee impedanties bij elkaar aan te passen.

De werking van het middenoor-mechanisme wordt beïnvloed door de toestand waarin zich de verschillende weefsels en gewrichten bevinden, en bovendien door de aanspanningstoestand van de beide middenoor-spiertjes. Bij pathologische toestanden kunnen de eigenschappen van dit trillende systeem gewijzigd zijn. Zwelling van het endotheel en het onderliggende bindweefsel veroorzaakt een vermeerdering van de massa van het overbrengende systeem. Ankylose van de gehoorbeentjes onderling en met de schedel en een stapesfixatie, zoals bij otosclerose, verhogen de stijfheid van het systeem. Dit gebeurt ook door aanspanning van de middenoorspiertjes en door indrukken van het trommelvees na resorptie van de zuurstof uit het middenoor bij gesloten tuba Eustachii. Met het toenemen van de stijfheid wordt de transmissie van de hoge tonen bevorderd (VAN DISHOECK). Impedantie-verhoging echter belemmert de overdracht van de tonen uit het spraakgebied (TRÖGER).

Perforaties in het trommelvees verstoren de gehoorfunctie lang niet altijd. Het is zelfs de vraag of het akoestisch belangrijk is, dat het trommelvees een gaaf, afsluitend membraan is. Het is wel noodzakelijk, dat er in het middenoor een luchtbel aanwezig is, die een akoestische scheiding teweeg brengt tussen de aandrijvende trilling in de gehoorgang en één der twee vensters van het binnenoor (WULLSTEIN).

Van ongeveer 800 Hz af is het trommelvees „doorzichtig” voor geluidstrillingen, dat wil zeggen, dat het trommelvees dezelfde eigenschappen als lucht bezit voor deze trillingen. Tussen de 800 Hz en 3000 Hz vertoont het trommelvees tezamen met de gehele overbrengingsketen van gehoorbeentjes en spieren geen impedantieverschil van enige betekenis met die van lucht (zie Hoofdstuk II). Er heeft in dit gebied een optimale energie-overdracht op het membraan plaats en hiermede op de keten van gehoorbeentjes.

Men neemt aan, dat bij gemiddelde intensiteiten (60 dB) de gehoorbeentjes als een eenheid trillen. Deze eenheid is afhankelijk van de koppeling door banden tussen de gehoorbeentjes. Het blijkt nu, dat de stijfheid van de gewrichtskoppelingen groot genoeg is om een getrouwe trillingsoverdracht in dit intensiteitsgebied te waarborgen. Ankylose van de gehoorbeentjes onderling kan dus niet van grote invloed op de stijfheid van het systeem zijn en vooral niet in het gebied onder 60 dB.

De gehoorbeentjes hebben een draaipunt, dat samenvalt met het zwaartepunt van de massa's (BÁRÁNY, E.). Een lineaire trilling van de schedel kan dus geen oscillaties van de keten van gehoorbeentjes tot gevolg hebben. Zo komt het dat lopen, kauwbewegingen en eigen

spraak bij gesloten tubae Eustachii, een minimale invloed op het gehoororgaan uitoefenen. Hier staat tegenover, dat ankylose van het korte been van het aambeeld of van de hamerkop met het rotsbeen of een stapesfixatie wel van invloed zijn op de trillingsoverdracht, namelijk door een stijfheidstoename en door verplaatsing van het draaipunt. Bij verstoring van de eenheid van zwaartepunt en draaipunt zal immers de invloed van trillingen langs beengeleiding toenemen. Onder deze omstandigheden zal ook de samenstelling van het frequentiespectrum bij de overdracht gewijzigd worden.

Indien intensiteitsverschillen belangrijk zijn voor het richtinghoren, dient onder ogen gezien te worden in hoeverre de getrouwe intensiteitsweergave in linker- en rechteroor in gevaar gebracht wordt door een ongelijke aanspanning van de spieren in de twee middenoren. Afhankelijk van de spanning van de musculus stapedius kan de stapesplaat om verschillende assen draaien. Bij matige aanspanning is de as een raaklijn aan de elliptiforme voetplaat en evenwijdig aan de korte as. De andere zijde van de ellips maakt dan de grootste uitslag. De zuigerwerking en vloeistofverplaatsing is maximaal. Wanneer de tonus van de middenoorspiertjes en vooral die van de musculus stapedius groot is, valt de draaiingsas van de stapesplaat nagenoeg samen met de lange as van de ellips. De plaat draait nu vrijwel om zijn eigen middellijn en de zuigerwerking is minimaal (zie Fig. 9) (von Békésy). De positie van de draaiingsas kan zich ook hiertussen bevinden.

Ongelijke aanspanning van de musculus stapedius in linker- en rechteroor zou hierdoor een invloed kunnen uitoefenen op de interaurale verschillen van het geluidsspectrum.

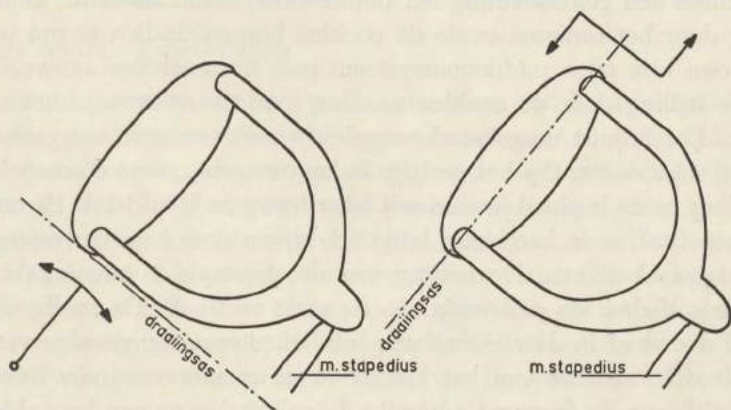


Fig. 9.

Verplaatsing van de draaiingsas van de stapes bij aanspanning van de middenoorspiertjes en een schematische voorstelling van de vloeistofverplaatsing.

Het is voor ons onderzoek niet van belang om in te gaan op het vraagstuk of de spieren van het middenoor door aanspanning de stijfheid van de keten van gehoorbeentjes vergroten en dus betere geleiding geven voor de hogere tonen (VAN DISHOECK), of dat de aanspanning van de musculus stapedius de uitslagen verkleint en op deze wijze het binnenoor beschermt tegen tonen van grote intensiteit, of dat de musculus tensor tympani de stijfheid van het trommelvlies vergroot en daardoor de reflectie van lage tonen versterkt, of dat de middenoorspieren het draaipunt ten opzichte van het zwaartepunt verplaatsen (VON BÉKÉSY). *Wel staat vast, dat de spanning van de spieren beslist een invloed heeft op de trillingsoverdracht.* Dit is merkbaar bij uitval van de musculus stapedius (Bell'se paralyse). Door de uitval van deze spier krijgt de patiënt last van sterke geluiden (hyperacusis).

Het is bekend, dat de muscoli tensores tympani willekeurig aangespannen kunnen worden en zelfs wel éézijdig. Deze aanspanning veroorzaakt een duidelijke vermindering van het gepercipieerde geluid. Verder bestaat er een „tic” van de musculus tensor tympani; deze is zelfs meestal eenzijdig. Om deze redenen staat het helemaal niet vast, dat de spanning van de middenoorspiertjes in linker- en rechteroor steeds gelijk is (JEPSEN). De ongelijkheid zou een aanzienlijke invloed op de stereo-akoësie kunnen hebben, wanneer de ontstane intensiteitsverschillen van de orde van grootte van de diffractiegevolgen zijn.

c) *Het binnenoor*

Wanneer een geluidstrilling het middenoorsysteem aandrijft, komt de trilling door het foramen ovale de cochlea binnen. Indien er om welke reden dan ook geen middenoorsysteem met trommelvlies aanwezig is, gaat de trilling door de cochlea van het ronde venster naar het ovale venster. Dit is juist omgekeerd vergeleken met een gehoororgaan met normaal middenoor. Op het geringe belang van de „porte d'entrée” van de trilling in de cochlea komen wij later terug in Hoofdstuk IV en VI.

De vloeistoffen in het benig labirint drijven door hun beweging het orgaan van Corti aan. De trilling van de stapesplaat veroorzaakt een lopende golf door de perilymfe van de scala vestibuli. De snelheid van de golf neemt af in de richting van het helicotrema tengevolge van de bijzondere constructie van het kanaal en de membranen (VON BÉKÉSY). Afhankelijk van de frequentie bereikt de golfsuitslag na een bepaalde afstand een maximum waarde om direct daarna uit te doven (VON BÉKÉSY).

Men mag stellen, dat de fysische omstandigheden in de twee cochleae

en de vloeistoffen constant zijn, al zijn zij niet geheel identiek. De looptijd van de trilling in het binnenoor is voor de waarneming van een trilling van bepaalde frequentie beiderzijds gelijk. Dit is van groot belang voor de stereo-akoësie. De plaats op het basilair membraan kan dan gewijzigd zijn, maar hier past het centraal zenuwstelsel zich na verloop van zekere tijd aan (DAVIS en GALAMBOS).

Om de haarcellen van het orgaan van Corti bevinden zich de dendrieten van het eerste (perifere) neuron. Het ganglion spirale bevat circa 30.000 bipolaire cellen. Vanuit deze cellen gaan de axonen tot in de medulla. Evenals bij alle andere sensibele zenuwen ligt het eerste ganglion van deze hersenzenuw dus perifeer.

Volgens DAVIS is de capaciteit van het akoestisch systeem aan één zijde, met 23.500 haarcellen en 30.000 bipolaire ganglioncellen, geschikt om 340.000 verschillende tonen over te brengen, wanneer men toonverschillen zowel in intensiteit als in frequentie in aanmerking neemt. Op grond hiervan is het noodzakelijk, dat enige ganglioncellen tezamen de geluidsprikkel gecodeerd overbrengen. Aan deze moeilijkheid wordt door de zenuw op de volgende wijze tegemoet gekomen. In rusttoestand is er een constante stroom van actiepotentialen. Deze regelmaat verandert bij prikkeling van een zenuwcel. Het overbrengen van een signaal blijkt neer te komen op een frequentie-modulatie van deze actiepotentialen. Voor de tijdrelatie is geen codering nodig. Deze informatie wordt overgebracht door het begin van een actiepotentialaal.

De axonen van de cellen in het ganglion spirale vormen tezamen de nervus cochlearis. Deze hersenzenuw, gelegen in de canalis acusticus internus, geleidt de prikkels centraalwaarts.

d) *De centrale gehoorbanen*

Nadat de zenuw uit de porus acusticus in de schedelholte te voorschijn is gekomen, treedt hij even verder in de medulla oblongata op de grens met de pons cerebri in. Hij voert met zich de centripetale vezels van het eerste neuron. In de medulla splitsen de vezels van de nervus acusticus zich (zie Fig. 10). Een deel gaat naar het ganglion dorsale, gelegen in het tuberculum acusticum, een ander deel gaat naar het ganglion ventrale. Een andere mogelijkheid is, dat iedere axon zich splitst, zodat de uitloper van een ganglioncel effect heeft in beide kernen. Synapsen markeren de overgang van het eerste naar het tweede neuron.

Uit of door de ventrale kern komen vezels, die naar de contralaterale zijde gaan en die het corpus trapezoïdeum vormen. Een ander deel der

vezels gaat rechtstreeks naar de colliculus posterior van het corpus quadrigeminum van de andere zijde. Weer een ander deel slingert zich om het corpus restiforme heen en kruist dan over (Held'se bundel). Uit het ganglion dorsale ontspringen de striae acusticae profundae (SPIEGEL en SOMMER). Beide systemen — Held'se bundels en striae acusticae profundae — verenigen zich aan de contralaterale zijde in de oliva superior (SPIEGEL en SOMMER). Hier begint voor zeer vele banen een nieuw neuron.

Dat de cochleaire prikkels van de beide zijden reeds in de olijf geëördineerd zijn is bevestigd door proeven, waarbij de gehoorbanen op verschillende plaatsen doorgesneden werden (KAKESHITA, loc.cit. SPIEGEL). Wanneer de gehoorbanen perifeer van de olijf doorgesneden worden, valt één zijde uit. Bij doorsnijding aan één zijde en centraal van de olijf wordt het geluid slechts 6 dB zwakker waargenomen (NEFF). Van de olijf uit trekken de gehoorbanen verder door de lemniscus lateralis naar het corpus quadrigeminum posterius. Sommige vezels eindigen hier. Andere vezels vervolgen hun weg om te eindigen in het corpus geniculatum mediale.

De colliculus inferior (het corpus quadrigeminum posterius) zou zeer belangrijk zijn voor de auditoire reflexen en de toniserende functie van het gehoor (R. CAJAL). Bij de vleermuizen bijvoorbeeld is deze colliculus zeer groot (ARIËNS KAPPERS et al., 1946), evenzo bij de walvissen (REIJSENBAACH DE HAAN, 1956). Voorbeelden van auditoire reflexen zijn bijvoorbeeld de cochleo-palpebrale reflex en de vlucht- of alarmreflex. De toniserende functie van het gehoor blijkt, wanneer er een plotselinge uitval plaats heeft. Dit gebeurt, wanneer het gehoororgaan uitgeschakeld wordt door het afsluiten van de gehoorgangen of wanneer de proefpersoon een reflectievrije en geluidsvrije ruimte binnenkomt.

Indien wij één kanaal van het stereo-akoestische apparaat, zoals wij dat bij onze proeven gebruiken, uitschakelen, gaat de staande en geblinddoekte proefpersoon wankelen en hij vertoont de neiging naar die zijde te vallen waar de telefoon is uitgeschakeld.

De verbindingen tussen de colliculus inferior en de efferente vezels naar de spieren zijn nog niet goed bekend. Evenmin is dit het geval met de reflexbanen naar de middenoorspiieren en naar de spieren van de oorschelpen en hals. Nog minder weten wij van de banen naar de huid: kippenvel en gevoel van koude bij krassende geluiden. Wel weten wij, dat bij caviae en katten de schakelingen voor de reflexbanen zeer laag in de medulla liggen. SPIEGEL en KAKESHITA hebben bij katten en caviae de schors, de corpora geniculata en de corpora quadrigemina in afzonderlijke proeven geëxstirpeerd. De dieren bleken zelfs in het laatste geval

reflexen, op geluidsprikkels behouden te hebben. Dit zou erop wijzen, dat het coördinatiecentrum voor het richtinghoren meer caudaal gezeteld is dan de corpora quadrigemina inferiora. Bij van één zijde komend geluid maakten de dieren een adequate vluchtbeweging naar de andere zijde (SPIEGEL en SOMMER).

De colliculus superior wordt in de literatuur aangewezen als het coördinatie-centrum voor het akoestische en optische systeem. Volgens SNIDER en TOWELL (1944) zou ook de vermis cerebelli verband houden met het cochleaire systeem. HAMPSON (1949) meende ook een samenhang met het akoestische systeem aangetoond te hebben. De werking is nog niet duidelijk.

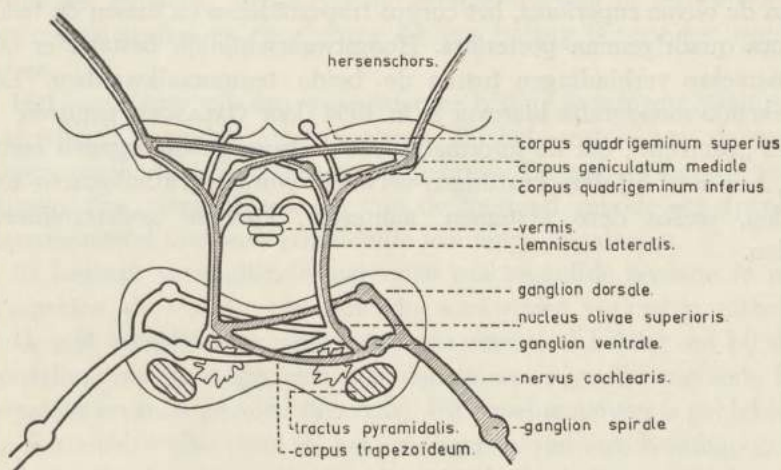


Fig. 10.

Schematische voorstelling van de cochleaire banen (grotendeels overgenomen van SPIEGEL en SOMMER).

Vanuit het corpus geniculatum kan men de radiatio acustica (capsula interna) naar de temporaalkwab vervolgen.

KAKESHITA (loc. cit. SPIEGEL) vermeldt, dat het verwijderen van de cortex aan één zijde bij katten slechts „geringe” gehoorsvermindering veroorzaakt. Hetzelfde vindt DAVIS, en bovendien, dat deze voor elke zijde van gelijke grootte is. Centrale doofheid tengevolge van een cortex-aandoening kan dus alleen bij tweezijdige beschadiging ontstaan. Bij de mens is in enkele gevallen hetzelfde na een neurochirurgische ingreep waargenomen (GREINER). WILEY vond, dat na totale verwijdering van de

akoestische hersenschors, dressuur met richtinghoren mogelijk was. Vrijwel alle akoestische effecten zijn reeds op zeer laag niveau volledig voorbereid. De hogere kernen en de cortex cerebri dienen vermoedelijk alleen voor associatie en interpretatie van het gebodene. Het is dus noodzakelijk, dat het niveau van de wekreflexen zeer laag ligt.

In de medulla liggen de kernen van de hersenzenuwen in de bodem van het vierde ventrikel. Ventraal hiervan verlopen de gekruiste sensibele banen uit het lichaam. Weer ventraal hiervan liggen de gekruiste pyramidebanen. Door deze topografie kenmerken medullalesies zich door een gelijktijdig bestaan van homolaterale hoofdzenuw- en contralaterale extremiteitsverlammingen.

Kruisingen van de gehoorbaan over het mediaanvlak vinden plaats tussen de olivae superiores, het corpus trapezoïdeum en tussen de beide corpora quadrigemina posteriora. Hoogstwaarschijnlijk bestaan er ook rechtstreekse verbindingen tussen de beide temporaalkwabben. Een uitstekende monografie hierover is in 1954 door GALAMBOS gegeven.

Een „centrum”, dat de informaties uit de twee gehoororganen correleert, kan in of bij deze kruisingen verwacht worden. Pathologische toestanden, welke deze systemen aantasten, kunnen gedetermineerd worden.

HOOFDSTUK IV

PSYCHO-AKOESTISCHE FENOMENEN EN NEUROFYSIOLOGISCHE GEGEVENS

In de voorgaande hoofdstukken hebben wij de eigenschappen en gedragingen van geluidstrillingen in lucht en in het middenoor in beschouwing genomen. Thans zullen wij nagaan welke fenomenen plaats hebben vanaf het moment, dat de fysische prikkel overgaat in een prikkel voor het zenuwweefsel en voor zover dit van belang is voor het ruimtelijk horen.

Het waarden van een waargenomen trilling is een psychisch proces, dat volgens bepaalde regels verloopt. Bij het „meten” van de waarden maakt men van deze regels gebruik. De sensaties en de reacties daarop zijn sterk afhankelijk van de toestand van de proefpersonen, daarom neemt men een gemiddelde van enige bepalingen.

Er bestaan verschillende methoden om eenzelfde sensatie te meten. Aangezien de via de verschillende werkwijzen verkregen uitkomsten vaak niet vergelijkbaar zijn, is het van essentieel belang om bij de beoordeling van de opgegeven waarden te weten, welke methode bij de bepaling ervan is gevolgd (STEVENS). Uit proefnemingen is gebleken, dat de sensaties, welke men bij het waarnemen van enkelvoudige geluidstrillingen heeft, niet evenredig zijn met de intensiteit en de frequentie van die geluidstrillingen aan het trommelvlies. De maatschaal voor de waardering van waargenomen trillingen is een andere dan die voor de fysische grootte van die trilling. Het is uitermate belangrijk zich van de verschillen in deze maatstaven voortdurend bewust te zijn. Fysische begrippen als frequentie en amplitude van een trilling moeten onderscheiden worden van sensaties zoals toonhoogte en luidheid. Voor de fase van een trilling bestaat er in het psychische vlak geen equivalent. Deze wordt als zodanig niet waargenomen; wel echter de uitwerking van verschillen tussen fase-toestanden. Aan de andere kant bestaan er biologische processen zoals adaptatie, contrastwerking en opmerkzaamheid, die van groot belang zijn voor de waarneming, zonder dat men hiervoor een maat kan aangeven.

Bij het aftasten van het gehoororgaan met geluidstrillingen van verschillende frequentie en amplitude, vinden er behalve een toonperceptie

met een bepaalde luidheid, ook nog andere biologische processen plaats, welke onafscheidelijk verbonden zijn met het horen. Deze komen bij de lage intensiteiten, die in de kliniek bij de gebruikelijke gehoorfunctie-bepalingen toegepast worden, meestal niet tot uiting. Als voorbeeld van zo'n biologisch proces noemen wij de distorsie. Deze is in een normaal gehoororgaan bij de intensiteiten van een drempelaudiogram van geen belang of zelfs afwezig. Bij supraliminaire gehoorproeven daarentegen, waarbij gewerkt wordt met intensiteiten van 60 dB boven de drempel en hoger, kan het effect belangrijk zijn.

Zoals wij in de inleiding reeds mededeelden, zullen eerst de fundamentele eigenschappen van het monaurale horen nader beschouwd worden om later de verschillen tussen de oren, waarop het ruimtelijk horen berust, beter te kunnen begrijpen.

Deze fundamentele eigenschappen zijn het waarnemen van:

- a) toonhoogte,
- b) luidheid en
- c) het vermogen om kleine verschillen in frequentie, intensiteit en tijdrelatie van twee trillingen te horen. Hiermede hangt onder andere het waarnemen van het timbre en de samenstelling van complexe geluiden samen.

Verder bestaan er een aantal fenomenen, die steeds samengaan met horen:

- d) maskering en contrastwerking,
- e) adaptatie,
- f) vermoeidheid, dat wil zeggen reversible uitputting en
- g) akoestische illusies.

Tenslotte een aantal fenomenen, die bij het horen soms plaats vinden:

- h) recruitment en
- i) distorsies.

De perceptie van een sinusoidale trilling — met bepaalde frequentie en amplitude — betekent, dat wij een gehoorsensatie ondergaan, waarvan een toonhoogte en een luidheid zijn verbonden.

a) Geluidstrillingen met verschillende frequenties horen wij als tonen met verschillende toonhoogten. De toonhoogteschaal loopt over een zeer groot gebied parallel met de frequentieschaal (STEVENS, VOLKMAN EN NEWMAN). Alleen bij frequenties boven 6000 Hz neemt de toonhoogte minder snel toe dan de frequentie.

b) Wanneer de amplitude van een waargenomen geluidstrilling voldoende verandert, hoort men een verandering in luidheid van die toon. De amplitude en daarmee de energie kan zo klein worden, dat men de toon niet meer waarneemt. De kleinste energie van een trilling, die door een grote groep normaalhorenden in 50 % van de aangeboden gevallen nog juist als toon wordt waargenomen, wordt de gehoordrempel genoemd (Fig. 11). Daar de amplitude van een trilling in een kwadratische verhouding staat tot de energie van die trilling, geldt dezelfde definitie voor beide grootheden.

Uit proeven waarbij enige prikkels gegeven worden, die afzonderlijk niet, maar snel opeenvolgend gegeven wél waargenomen worden, blijkt, dat het orgaan van Corti deze zeer kleine geluidstrillingen wel degelijk omzet in een zenuwprikkel en transporteert, maar dat het cerebrum de kleine signalen afzonderlijk niet tot een sensatie verwerkt. Pas wanneer door additie van een aantal subliminaire prikkels de waarnemingsdrempel overschreden wordt, geeft dit aanleiding tot een sensatie. Toch kunnen bij complexe geluiden deze subliminaire trillingen extra informatie betekenen, zoals b.v. echo's bij ruimtelijk horen.

Om een indruk te geven van de grootte der fysiologische bewegingen van de stapesplaat bij kleine geluidssterkten, vermelden wij de volgende cijfers:

Een trilling van 1000 Hz met een intensiteit van $0,002 \text{ dyne/cm}^2$ wordt door normaal horende mensen waargenomen als een geluid van 20 dB sterkte. De uitslag van de stijgbeugelplaat is in dit geval $10 \times 3 \times 10^{-8} \text{ mm} = 30 \text{ \AA}$. Dit is in de orde van grootte van $6 \times$ de diameter van een waterstofmolecuul (WILSKA). Hiermede vergeleken is de grootte van de zintuigcel (12μ) en van een rood bloedlichaampje (7μ of wel $70.000 \text{ \AA}$) reusachtig. Het oplossend vermogen van een goede microscoop gaat tot $6000 \text{ \AA}$. Men veronderstelt wel eens, dat het menselijk gehoor minder scherp is dan dat van dieren. De gehoordrempel tussen 1000 en 6000 Hz ligt bij de normale mens monoraal 76 dB onder 1 dyne/cm^2 . Binauraal ligt de gehoordrempel nog 3 dB lager. Het geruis van de Brownse beweging van moleculen is 85 dB onder 1 dyne/cm^2 . Dit verschilt 6 dB met de binaurale waarneming. Het menselijk oor heeft in dit frequentiegebied een vrijwel maximale gevoeligheid.

Aan de andere kant kan een amplitude zo groot worden, dat de waarnemer een prik- of zelfs pijnsensatie krijgt. Bij 120 dB is de amplitude 10^6 groter. De uitslag van de stapesplaat is dan maximaal 10^{-3} mm .

Wanneer wij de trillingsenergie van de verschillende akoestische niveau's uitzetten in een grafiek (zie Fig. 11) blijkt, dat de drempelge-

voeligheid en de lijnen van gelijke luidheden variëren met de frequentie. De toename van de luidheid gaat echter niet gelijk op met de toename van de intensiteit (FLETCHER).

De pijndrempel en de gehoordrempel kruisen elkaar in de zeer lage (10 Hz) en zeer hoge tonen (20.000 Hz). Von Békésy heeft het gebied van de kruising voor de zeer lage tonen onderzocht. Er ontstond eerst een pijnsensatie en later pas een gehoorsensatie. Deze twee sensaties kon hij goed onderscheiden door middel van het vermogen om de richting van de geluidsbron te horen. De druksensatie van pijn geeft geen richtingsindruk, de geluidssensatie wel.

Om de eigenschappen van de gehoororganen beter te doen uitkomen heeft men grafieken gemaakt, waarin de fysische verhoudingen, de gehoorfunctie of de luidheidswaarderingen meer op de voorgrond komen.

In Fig. 11 is een grafiek getekend, waarbij de geluidsdruk van de aangeboden prikkel is gemeten vanaf het druk-niveau $0,0002 \text{ dyne/cm}^2$. Boven dit internationaal vastgestelde nulniveau spreekt men van dB absoluut.

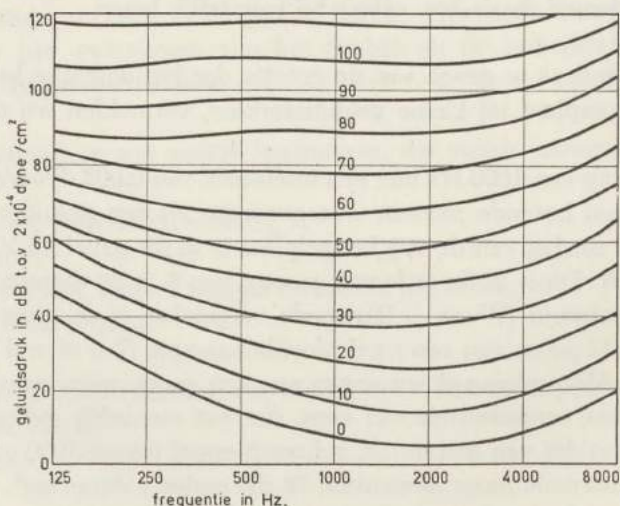


Fig. 11.

De gehoordrempel als functie van de frequentie.

De isofoonlijnen zijn aangegeven met hun waarden in het midden van de grafiek (overgenomen van von Békésy).

Ten behoeve van de kliniek, waar gebruik gemaakt wordt van de gehoordrempel als een maatstaf voor de gehoorsfunctie, is de grafiek zodanig vervormd, dat de gehoordrempel uit Fig. 11 tot een rechte lijn is geworden (zie Fig. 12). In deze grafiek zijn nu niet de geluidsdrukken

ten opzichte van $0,0002 \text{ dyne/cm}^2$ uitgezet, maar hier geeft de nullijn de kleinste geluidsdrukken aan, die door een groot aantal normaal horende proefpersonen in 50 % der aangeboden gevallen juist als toon worden waargenomen. Bij 1000 Hz valt deze waarde samen met $2 \times 10^{-4} \text{ dyne/cm}^2$. Ten opzichte van deze gehoordrempel worden de supraliminaire geluidsintensiteiten uitgedrukt in decibels. Wanneer men de luidheid van tonen van verschillende frequenties vergelijkt, blijkt, dat het mogelijk is curven van gelijke luidheid te maken: isofone lijnen. Uit het verloop van deze lijnen is te zien, dat in de lage en hoge audio-frequenties de luidheid sneller toeneemt dan de geluidsdruk.

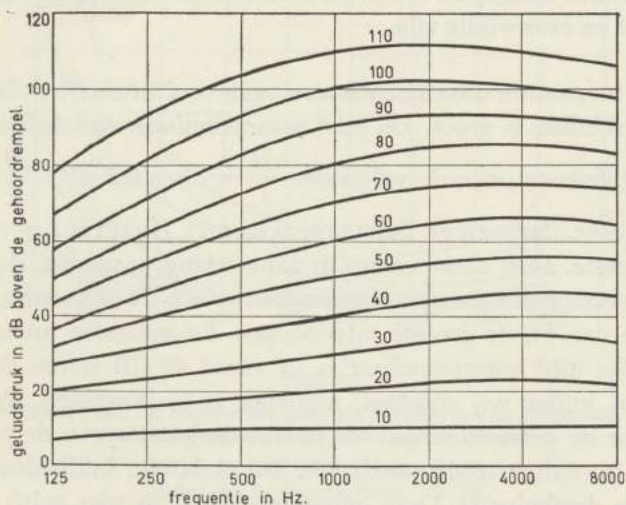


Fig. 12.

Grafiek met de gehoordrempel als nullijn en met isofoonlijnen (FLETCHER en MUNSON).

Uit Fig. 12 kunnen wij zien, dat een lineaire versterking of verzwakking — dit is een evenwijdige verschuiving omhoog of omlaag van de toppen van de amplituden in een complex geluid, b.v. een ruis — een geheel andere luidheidsbalans voor de waarneming zal opleveren. Een bepaald niveau, voorgesteld door een horizontale rechte lijn, kruist bij lagere intensiteiten vele krommen: de lage tonen worden relatief zwak waargenomen. Naarmate het geluid sterker wordt, worden de lagere tonen verhoudingsgewijs luider gewaardeerd dan de tonen uit het spraakgebied. Dit betekent, dat bij lineaire versterking de lage tonen onevenredig versterkt worden. Dit fenomeen is ook duidelijk zichtbaar in Fig. 12. Bij de constructie van elektro-akoestische hulpmiddelen, zowel voor het ruimtelijk horen als voor de spraakaudiometrie, is dit van

groot belang. Het is een ieder bekend, dat bij grotere versterking in het radiotoestel de lage tonen gaan overheersen, bij terugdraaien van de volumeregeling blijven de tonen uit het middengebied het langste hoorbaar.

Als men er naar streeft, dat een natuurgetrouwe luidheidsbalans blijft bestaan bij alle versterkingsgraden, dus dat de verhoudingen in de spectrale energieverdeling constant blijven, zal de versterking in iedere frequentie anders moeten zijn. Bij de grote versterkingen van een omroepsysteem is het voor de verstaanbaarheid noodzakelijk de lage tonen terug te dringen. Met een apparatuur, waarbij de intensiteit bij alle versterkingsgraden aangepast is aan de luidheidsbalans zouden alle isofoonlijnen recht en evenwijdig zijn.

c) Het monaurale discriminatievermogen voor intensiteit-, frequentie- en tijdsverschillen is groot. De juist waarneembare verschillen, als verhouding opgegeven, zijn de volgende: $\frac{\Delta I}{I} = \text{circa } 0,2 \text{ dB}$, $\frac{\Delta f}{f} = 3\%$, $\Delta t = 10 \mu\text{sec}$. (SHOWER en BIDDULPH, SCHMIDT). Hierin is I = intensiteit, f = frequentie. Men dient echter in aanmerking te nemen, dat het discriminatievermogen voor geluidsintensiteiten aan de gehoordrempel veel geringer is dan bij de grotere intensiteiten. De relatieve intensiteitstoename, welke juist waarneembaar is, is vanaf 40 dB boven de gehoordrempel en luider vrij constant, namelijk 10 % (KNUDSEN). Van 40 dB sterkte naar de gehoordrempel toe neemt de grootte van de juist waarneembare intensiteitstrede steeds toe. De scala van luidheden verschilt dus van de decibelscala. Deze onregelmatigheid is niet gelijk voor alle frequenties. De grootte van de treden neemt extra toe in de lage frequenties (zie Fig. 13).

Het menselijk gehoororgaan is het gevoeligst voor monaurale intensiteitsverschillen in het gebied boven 500 Hz. De grootste breedte van het „hoorveld”, dat wil zeggen het grootste verschil tussen de energiewaarden van de gehoordrempel en de pijngrens, ligt bij 2000 Hz. De energiehoeveelheid bij de pijngrens is 10^{12} maal zo groot als aan de drempel. Bovendien is in dit gebied het aantal luidheidstreden het grootst (FLETCHER).

In ditzelfde gebied bereikt het discriminatievermogen voor toonhoogteverschillen ook zijn maximumwaarde. De juist waarneembare verschillen in toonhoogte — monuraal en bij successieve waarneming — zijn o.a. onderzocht door SHOWER en BIDDULPH. Zij vonden, dat de toonhoogtestappen in het gebied van lage frequenties een constant blijvend aantal trillingen bedroegen (2 Hz). Boven de 700 Hz echter stonden de

toonhoogtestappen in een bepaalde verhouding tot de frequentie:

$$\frac{\text{waarneembaar frequentieverschil}}{\text{frequentie}} = \text{ongeveer } 3 \text{ }^0/_{00}.$$

Voor het dagelijks leven is het horen van de hoge tonen van groot belang. Het stelt ons in staat boventonen te horen. En het zijn juist deze, welke een geluid zijn natuurlijke en direct herkenbare karakter (timbre) geven, b.v. iemands stem.

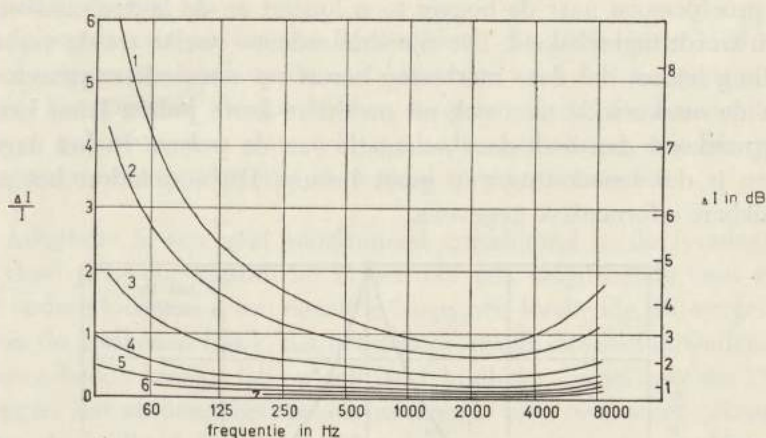


Fig.13.

De grootte van de toonsterktetrede als functie van de frequentie en van de intensiteit (overgenomen van RIESZ).

- Curve 1 luidheidsniveau 5 dB.
- Curve 2 luidheidsniveau 10 dB.
- Curve 3 luidheidsniveau 20 dB.
- Curve 4 luidheidsniveau 30 dB.
- Curve 5 luidheidsniveau 40 dB.
- Curve 6 luidheidsniveau 60 dB.
- Curve 7 luidheidsniveau 80 dB.

d) Waarneming van een toon gaat samen met maskering in andere toengebieden. Onder maskering verstaat men het verschijnsel, dat zich doet gelden als aan één oor tegelijkertijd twee sinusoidale trillingen, waarvan de frequenties f_1 en f_2 niet te ver uiteen liggen (1 à 2 octaven), worden aangeboden. Het blijkt, dat de gehoordrempel van f_2 — de trilling met hogere frequentie — omhoog is gegaan. Anders gezegd: de frequentie f_1 had een maskerende werking op de frequentie f_2 (WEGEL en LANE). De graad van maskering hangt samen met de intensiteit van de trilling f_1 en van het frequentieverschil tussen f_1 en f_2 . Bij intensiteiten van 60 dB in de 1500 Hz zône kan er een maskering van 20 dB in één octaaf hogere frequenties plaats hebben. De maskerende werking naar

de zijde van de lagere frequenties is gering (WEGEL en LANE). Dit type maskering berust waarschijnlijk op een inbeslagname van functionele elementen van de cochlea door de lagere toon. Dit blijkt ten eerste uit het feit, dat er toch nog gedurende korte tijd in dat gebied een maskering blijft bestaan al is de lagere toon niet meer aanwezig (nawerking). Ten tweede dat de maskering niet zo sterk is als bij die luidheid zou behoren, indien de lagere toon zeer kort duurt. Ten derde dat het een moment duurt, voordat de hogere toon onhoorbaar wordt, wanneer de proefpersoon naar de hogere toon luistert en de lagere, maskerende toon wordt ingeschakeld. Dit zijn drie redenen, welke tot de veronderstelling leiden, dat deze maskering berust op een perifeer proces. Men kan de maskerende toon ook uit meerdere korte pulsen laten bestaan. Hij maskeert dan toch door summatie van de pulsen. In het dagelijks leven is deze maskering van groot belang. Hij vermindert het aantal bruikbare informatieve gegevens.

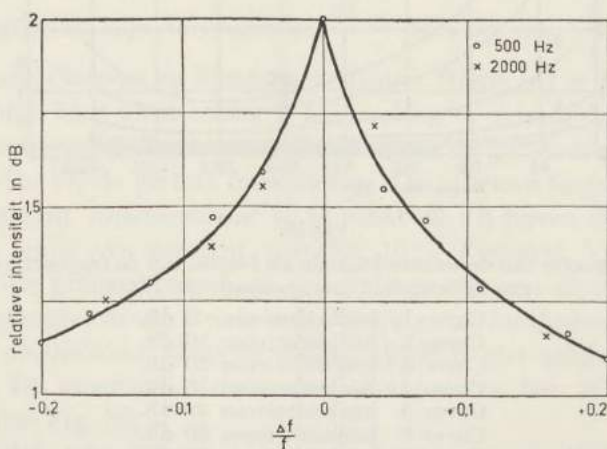


Fig. 14.
Centrale additie bij binaurale presentatie
van twee tonen (von Békésy).

Van een complex geluid worden de frequenties alleen geanalyseerd, als deze verder dan een kritische bandbreedte uit elkaar liggen. Indien dit niet het geval is, kan het neurale systeem de frequenties niet uiteenrafelen. De componenten geven echter wel aanleiding tot zwevingen en frequentie-modulaties (R. M. VERSTEEGH, 1954). Dit is te betitelen als „centrale maskering” (ruisaudiometrie van LANGENBECK). Van de perifere en de centrale maskering is de perifere maskering verreweg de belangrijkste. Het effect van de perifere maskering in het toegewende oor kan gedeeltelijk gecompenseerd worden door informatie uit het afgelegen

oor. Bij de binaurale maskeringsproeven van WEGEL en LANE moet de toon in het maskeringsoor ongeveer 60 dB luider zijn dan in het proefoor om effect te hebben. Dit is evenveel als bij overhoren. Met andere woorden, binauraal maskeren lukt alleen door middel van overhoren. Het adderen van de zenuwprikkels bij binaurale proeven daarentegen gelukt zeer goed. Wanneer gelijke frequenties in beide organen werden gegeven addeerden deze tot tweemaal de luidheid van een monaurale waarneming. Waren de frequenties ongelijk, dan was de additie slechts gedeeltelijk (zie Fig. 14).

Uit de proefnemingen van von Békésy bleek, dat 1000 Hz en 1100 Hz centraal nog gecorreleerd werden en addeerden tot $1,4 \times$ de monaurale luidheid. FLETCHER en MUNSON hebben aangetoond, dat de waarneming met twee gehoororganen even luid is als de waarneming met één gehoororgaan en een prikkel met twee maal zo grote intensiteit.

e) Adaptatie is een veel voorkomend verschijnsel in de fysiologie. HooD deed proeven, waarbij hij in één oor een langdurende toon gaf en het andere toonstoten van dezelfde frequentie toediende. Bij vergelijking van de luidheden bleek, dat het gehoororgaan, dat de aanhoudende toon aangeboden kreeg, zich op een lager luidheidsniveau instelde. Dat wil zeggen, dat als aangehouden en pulserende toon even sterk gekozen werden, de luidheid in het oor, dat de continue toon kreeg, kleiner werd. De mate van adaptatie was afhankelijk van de intensiteit en de duur van het geluid. De adaptatie van het gehoororgaan is volledig in twee minuten (zie Fig. 15).

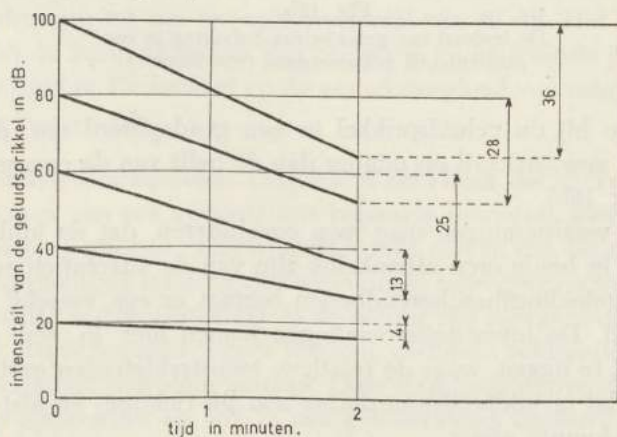


Fig. 15.

Adaptatie van een langaanhoudende toon ten opzichte van een kortdurende van dezelfde frequentie (800 Hz) (HooD).

Op deze wijze zal men in een zaal, waar een normaal conversatiegeruis van ongeveer 60 dB bestaat, een adaptatie van circa 25 dB verkrijgen. Bij een éénzijdig gehoorverlies is de adaptatie in dat oor veel geringer.

Von Békésy deed proeven, waarbij hij de prikkel in een geadapteerd oor verdubbelde. De sensatie werd dan echter niet tweemaal zo groot (Fig. 16a).

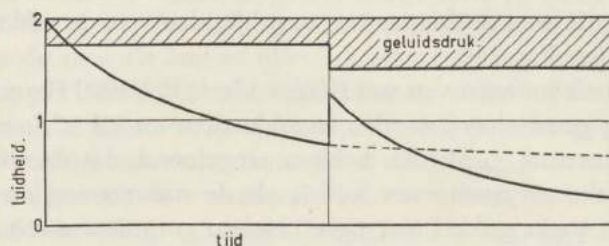


Fig. 16a.

De invloed van geluidsdruk-verdubbeling in een geadapteerd gehoororgaan (von Békésy).

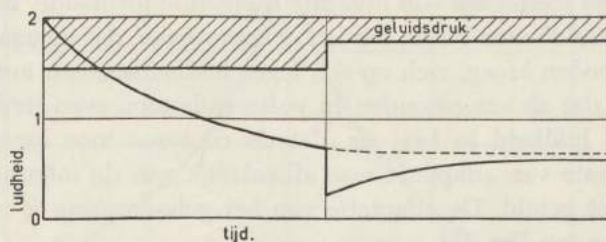


Fig. 16b.

De invloed van geluidsdruk-halvering in een geadapteerd gehoororgaan (von Békésy).

Halveerde hij de geluidsprikkel in een geadapteerd oor, dan werd de luidheid gewaardeerd op minder dan de helft van de oorspronkelijke waarde (Fig. 16b).

Uit deze waarnemingen mag men concluderen, dat de luidheidsveranderingen in beide oren afhankelijk zijn van de adaptatietoestand. Bij éénzijdige geleidingshardhorendheden bestaat er een verschil in adaptatietoestand. De intensiteitswisselingen komen hier in een gevoeligheidsgebied te liggen, waar de relatieve toonsterktetreden groter zijn.

Dit verschil in luidheidswaardering zou bij richting- en afstandhoren van invloed kunnen zijn.

f) De reversibele uitputting (vermoeidheid) is een ander proces dan de adaptatie. Het belang hiervan voor het ruimtelijk horen ligt in het

feit, dat bepaalde frequentiegebieden (tussen 2000 en 6000 Hz) sneller uitputbaar zijn dan andere.

g) Onder de akoestische illusies rangschikt men het fenomeen van BROCA. Hierbij lijkt de toonhoogte van een lage toon nog lager te worden, als de intensiteit toeneemt. De toonhoogte wordt hoger als het een hoge toon betreft, die luider wordt. In het overgangsg gebied, omstreeks 2000 Hz, kan men beide verschijnselen vinden (STEVENS). Bij complexe geluiden is het fenomeen van deze toonhoogteveranderingen bij zuivere tonen niet waar te nemen. Hiervan zal dus geen storende invloed op het richtinghoren uitgaan. Een andere akoestische illusie ontstaat, wanneer een ruis wordt toegevoegd aan een toon van constante frequentie en intensiteit. De proefpersoon krijgt hierbij de indruk, dat de oorspronkelijke toon hoger wordt. Dit is nader onderzocht door TOLK en GRAVENDEEL. De toonhoogte-verandering bleek echter een illusie te zijn.¹⁾ Het verschijnsel zou anders een slechte invloed op het ruimtelijk horen kunnen uitoefenen.

h) Onder „recruitment” — HUIZING noemt het regressie — verstaan wij het meer dan normale toenemen van de luidheidssensatie bij een bijzonder type van slechthorendheid. Deze patiënten horen een toon van b.v. 80 dB even luid als een normaalhorende, terwijl de gehoordrempel van de patiënten op de 40 dB lijn lag.

De scala van luidheidswaarderingen, die zich bij de normaalhorende uitstrekt over een intensiteitsverschil van 80 dB, is bij deze patiënten samengedrongen tot een intensiteitsverschil van 40 dB. Het is duidelijk, dat hierbij de luidheidsbalans van complexe en variërende geluiden geheel gewijzigd is. De invloed op de nauwkeurigheid van ruimtelijk horen zou groot kunnen zijn.

i) Distorsieverschijnselen. Distorsie is het effect, dat zich doet gelden, wanneer men aan een systeem een bepaalde beweging toevoegt, waarbij dit systeem een beweging afgeeft, welke niet in een bepaalde rekenkundige verhouding staat tot de toegevoegde beweging en in vorm daarmee identiek is (Hoofdstuk II). In de natuur zijn energie-overbrengende systemen, die in het geheel geen distorsie vertonen, zeldzaam. Er kunnen wel distorsievrije gedeelten bestaan. Door de a-lineaire overdracht in een versterker-apparaat en ook in ons gehoororgaan ontstaan er boven tonen van de aangeboden enkelvoudige trilling. Laat men op een a-lineair systeem twee frequenties f_1 en f_2 inwerken, dan ontstaan er harmonischen $2f_1$, $2f_2$, $3f_1$, $3f_2$ enz., maar ook verschiltonen ($f_1 - f_2$),

¹⁾ persoonlijke mededeling.

$2(f_1 - f_2)$ enz. en somtonen $(f_1 + f_2)$, $2(f_1 + f_2)$ enz. Er zijn dus tonen bijgekomen, welke oorspronkelijk niet aanwezig waren. De distorsieprodukten worden gebruikt bij het stemmen van muziekinstrumenten. Bij intensiteiten kleiner dan 80 dB absoluut blijken in het middenoor geen distorsieprodukten te ontstaan (von Békésy, 1934). Indien dat wel zo was zou het trommelvlies een deel van deze trillingen afstralen en dit zou meetbaar zijn met een sondemicrofoon.

Uit de elektrofysiologische proeven is bekend, dat de distorsieprodukten bij metingen reeds aanwezig zijn tijdens het transport in de zenuw. Zij moeten dus in de cochlea gevormd zijn en wel, nadat de tonen in hun componenten gesplitst zijn (STEVENS). Volgens SCHOUTEN, LICKLIDER en SIX is het binnenoor de belangrijkste bron voor distorsie en wel reeds vanaf het niveau van 60 dB boven de gehoordrempel. Bij 80 dB en daarboven begint ook het middenoor meetbare distorsieprodukten op te leveren.

Een trilling van 250 Hz 40 dB boven de gehoordrempel geeft aanleiding tot vorming in het gehoororgaan van harmonischen, waarvan de energie van de trillingen van 500 en 1000 Hz tezamen 15 dB is. Dit is een geluidssterkte van betekenis. Bij eenzijdig of tweezijdig gelijkvormige slechthorendheden kan dit van grote invloed op het richtinghoren zijn.

De klankkleur, welke een geluid zijn specifieke herkenbaarheid verleent, noemt men ook wel timbre; deze wordt bepaald door plaats en sterkte van de boventonen. Met andere woorden: de configuratie van de spectrale energieverdeling geeft een geluid zijn natuurlijke en eigen karakter („overtone structure”). De complexe trilling, welke de stapesplaat aandrijft, kunnen wij ons voorstellen als een golf waarop hogere frequenties gemoduleerd zijn. Opvallend is echter, dat met elektronische hulpmiddelen de toppen van de amplituden kunnen worden afgesneden, zonder dat dit aan de informatie van het signaal veel afbreuk doet. Indien daarentegen de toppen gehandhaafd blijven, maar de middenbaan van de trilling wordt geëlimineerd, heeft het signaal bijna alle informaties verloren.

LICKLIDER vermeldde in 1944, dat „peak-clipping” van de spraak kan worden gedaan zonder verlies van verstaanbaarheid. De informatie van de trillingen ligt blijkbaar niet in de toppen van de amplituden, maar in de tijdrelatie van de doorgangen door de nullijn.

Binauraal zijn er ook reeds vele proefnemingen gedaan. K. DE BOER schreef in zijn these (1940), dat men „bij de overschakeling van monauraal naar binauraal het wegvallen van een zekere beklemming waarnam”. Nog frappanter is deze sensatie, wanneer men van stereo-akoës-

tisch luisteren omschakelt naar het waarnemen van hetzelfde signaal in beide gehoororganen. Om begripsverwarring te voorkomen stellen wij eerst vast, dat *binauraal* alleen wil zeggen, dat er voor de waarneming twee gehoororganen zijn gebruikt.

De waarneming kan zijn:

a) een sensatie van ruimtelijk horen. Dit is de normale functie van de gehoorzin of

b) het bepalen van de invloed, die de gehoororganen op elkaars functie uitoefenen. Dit is niet meer dan een uitbreiding van de proeven ter bestudering van de fundamentele eigenschappen van het gehoororgaan aan één zijde. Bovendien heeft dit soort horen uitsluitend in het laboratorium plaats. Verschillende voorbeelden hiervan zijn in het voorgaande reeds beschreven. Op het verschil tussen richtinghoren en lateraliseren wordt hier met klem gewezen. Bij dit laatste verschijnsel gaat het uitsluitend om intensiteitsverschillen tussen de beide oren. Daarom hoort lateraliseren in groep b) thuis.

Tot groep b) behoren ook de proefnemingen om te bepalen hoe groot de waarneembare interaurale verschillen zijn. Deze geven geen sensatie van ruimtelijkheid. Het interaurale intensiteitsverschil, dat juist waarneembaar is, heeft de constante waarde van 0,2 dB voor frequenties boven 2000 Hz bij een geluidssterkte van 45 dB boven de gehoordrempel. Onder 2000 Hz neemt dit interaurale intensiteitsverschil steeds meer toe tot 0,8 dB bij 250 Hz. (SCHMIDT, 1955).

Het interaurale tijdsverschil, dat juist waarneembaar is, is 10 μ sec. bij lage frequenties tot 1000 Hz. Hierboven moet het tijdsverschil tussen de oren steeds groter worden om waarneembaar te zijn (GARNER en WERTHEIMER, SCHMIDT).

KIETZ (1953) ging na hoe de richtingsindruk was, wanneer prikkels met een bepaald tijdsverschil aan de stapesplaat arriveerden. Hij nam aan, dat de akoestisch werkzame afstand tussen de stapesplaten 21 cm was. Hij vond met klikgeluiden de volgende waarden:

<i>Tijdsverschil in seconden</i>	<i>Richtingsindruk alleen afhankelijk van tijdsverschil</i>
0	midden = azimut
3×10^{-5}	juist uit het midden = 3° opzij = 1 cm verschil in de twee afstanden: geluidsbron tot cochlea.
16×10^{-5}	15° op zij
31×10^{-5}	30° op zij
63×10^{-5}	90° op zij
63 tot 120×10^{-5}	90° op zij
120×10^{-5}	gescheiden impulsen van links en rechts.

Bij richtinghoren op grond van een tijdsverschil in de aankomst van de trilling in de twee oren is de afstand tussen de twee oren en de refractaire periode voor een zenuwfibril van belang.

Voor olifanten en muizen en voor zoogdieren in een medium met grote voortplantingssnelheid, b.v. de potvis en de dolfijn, zouden de refractaire perioden dan zeer sterk uiteen lopen. Hiervoor kunnen wij in de literatuur geen bevestiging vinden.

De fysiologische eigenschappen van het zenuwweefsel kunnen wij apart in beschouwing nemen.

Zoals voor elk prikkelbaar en prikkelgeleidend weefsel, bestaat er ook voor de haarcellen van het orgaan van Corti en de bipolaire ganglioncellen van het perifere gehoororgaan een drempelwaarde, onder welke geen reactie plaats heeft maar waarboven wel. Deze drempel ligt echter veel lager dan de drempel van waarneming. Dit blijkt uit het feit, dat enige subliminaire prikkels na summatie toch een waarneming opleveren. Het is dus best mogelijk, dat subliminaire prikkels in een lage akoestische kern medewerken aan een stereo-akoestische indruk. De hogere cerebrale functies leggen de beperkende factor aan de waarneming op.

De prikkelgeleiding in de zenuwweefsels heeft tijd nodig. De snelheid van voortgeleiding is groot en van de orde van grootte van 1000 cm/sec. Bij de synapsen echter verliest de prikkel veel tijd bij het overgaan van één neuron op een ander. Deze tijd bedraagt niet alleen gemiddeld 0.5 milliseconde, maar is bovendien afhankelijk van de intensiteit van de prikkel (KEMP en ROBINSON, 1937). Hiermede vergeleken is het juist waarneembare, interaurale tijdsverschil van 30 μ sec. zeer klein (6%).

Voordat de prikkel in de zenuwfibril voortgeleid wordt, is er tijd nodig geweest voor de trillingsgolf in de vloeistof om de cochlea te doorlopen vanaf de stapesplaat. Zelfs voor trillingen van hoge frequentie, welke in de basaalwinding gepercipieerd worden, is de looptijd nog 0,1 milliseconde. De snelheid, waarmee de trillingsgolf zich in de cochlea voortplant, is niet constant, maar neemt af naar het helicotrema toe, zo sterk zelfs, dat de looptijd, welke zo'n golf nodig heeft om van het ovale venster tot de top van de cochlea te komen, 5 milliseconde is. Von Békésy (1933) heeft hiervoor de volgende proefnemingen gedaan. Aan nemend dat de toonhoogtewaarneming gebonden was aan een bepaalde plaats op de basilair membraan, schakelde hij door uitputting in één cochlea de hoge tonen uit en in de andere de lage. Gaf nu een geluidsbron, die op gelijke afstand van beide oren stond, tegelijk een hoge en een lage toon af, dan nam de proefpersoon een duidelijk tijdsverschil

tussen de twee tonen waar. Dit is het verschil in tijd van aankomst van de twee trillingen bij hun lokalisaties op de basilair membraan. Voor het richtinghoren is dit soort tijdsverschil niet van belang, omdat het daar om vergelijking tussen twee gelijke frequenties gaat.

Met het bijeenvoegen van de looptijd van de golf in de cochlea en de prikkelvoortgeleiding in de zenuw heeft men nog niet de tijd, welke verloopt tussen beweging van de stapesplaat en de actiepotentiaal in de zenuw: de latentietijd. Alvorens een reactie van de haarcel is opgebouwd moet de mechanische prikkel van de zintuigcel enige tijd duren. Deze opbouwtijd neemt ongeveer 0.2 milliseconden in beslag (TASAKI, 1953). Deze tijd zou enigszins afhankelijk van de intensiteit zijn.

DAVIS vond, dat zuurstofgebrek van invloed op de latentietijd was. Volgens GISSELSON was ook de bloeddruk of beter de aanwezigheid van acetylcholine van invloed op deze tijd. Lange prikkeltijden verschoven de opbouw en afbraak van de acetylcholine. Dit zou volgens DERBYSHIRE en DAVIS een verklaring van de adaptatie kunnen zijn. Zolang dit voor de beide gehoororganen in gelijke mate geldt, gaat hiervan geen invloed uit op de stereo-akoësie.

Ten gevolge van de beweging van de basilair membraan ontstaan er actiepotentialen. Is deze beweging naar de scala vestibuli, dan ontstaat een negatieve golf op de rustspanning van de nervus octavus; is de beweging in tegengestelde richting, dan geeft dit geen aanleiding tot een actiespanning (TASAKI, 1953). VON BÉKÉSY wees er met nadruk op, dat de fase in verband staat met bewegingen van de basilair membraan en niet met die van de stapesplaat!

In de nervus cochlearis zijn tot ongeveer 3000 Hz de actiepotentialen gesynchroniseerd met de trillingen van de lucht. In de hoge frequenties wisselen enkele fibrillen elkaar af, omdat de refractaire periode van iedere fibril omstreeks 1 milliseconde bedraagt. Toch blijft in de nervus cochlearis een zeer goede synchronisatie met de frequentie van de prikkel bestaan. Hierbij merkt STEVENS op, dat bij geringe geluidsintensiteit de frequentie in de fibrillen scherp afgestemd is. Bij grotere intensiteiten reageren zij op frequentiebanden. Verder nam hij ook waar, dat de frequenties van de actiepotentialen terug vielen van 500 tot 200 à 100 Hz, indien de tijdsduur van een sinusoidale trilling langer dan 200 milliseconden was. In de hogere neuronen wordt het aantal pieken van de actiepotentialen steeds geringer, totdat in de schors het verband geheel verloren is gegaan (ADES).

Indien er in de lemniscus lateralis, waarin fibrillen uit beide cochleae verlopen, nog synchronisatie met de geluidstrilling zou bestaan, zou een stereo-akoestische proefneming een tijdsverschil tussen actiepotentialen

uit banen van het linker- en rechtergehoororgaan aan het licht moeten brengen. Dit hebben wij in de literatuur niet vermeld gevonden.

Uit de metingen met frequentie-modulatie van R. M. VERSTEEGH weten wij, dat het cerebrum geen toonhoogte-analyses kan uitvoeren, wanneer de trilling niet minimaal 65 milliseconden duurt. In geruisen duren de trillingen van de afzonderlijke frequenties vaak korter. Het cerebrum is dus veel te traag voor een analyse in kleine tijdverschillen. In het dierenrijk is de stereo-akoësie als bron van informatie voor een adequate alarmreactie ouder dan het toongehoor. Dit laatste dient een ander doel en heeft zijn grootste hoogte bereikt in de menselijke spraak. Hieruit mag men reeds concluderen, dat de waarnemingen uit de twee gehoororganen met elkaar gecorreleerd zijn, voordat een grote hoeveelheid informatie door entropie in de schakelingen verloren is gegaan. De nieuwgevormde gegevens omtrent de richting en afstand van geluidsbronnen moeten naar de cortex cerebri gevoerd worden.

HOOFDSTUK V

STEREO-AKOESTISCHE PROEVEN BIJ EEN NORMALE GEHOORSFUNCTIE

Eigen proefnemingen I

Bij de experimenten om de factoren, die het ruimtelijk horen bewerkstelligen, te bepalen, maakten wij gebruik van een kunsthoofd. Hiertoe werd een houten schedel gemaakt van de afmetingen van een menselijk hoofd. Hierbinnen waren twee microfoons bevestigd op een plaats, waar bij de mens de rotsbeenderen liggen. De microfoonmembranen bevonden zich aan het mediale einde van gangen, die aan hun laterale zijden uitmondten in kunstmatige oorschelpen. Deze waren gemaakt van lood, geplet in anatomisch model en bekleed met flanel. De afstand van de microfoonmembranen was, evenals de afstand van de gehoor- gangen bij het menselijk hoofd, 21 cm. Aan elk van de twee microfoons was een elektronisch versterkingsapparaat met telefoon verbonden. De microfoon aan de rechterzijde van het kunsthoofd was verbonden met

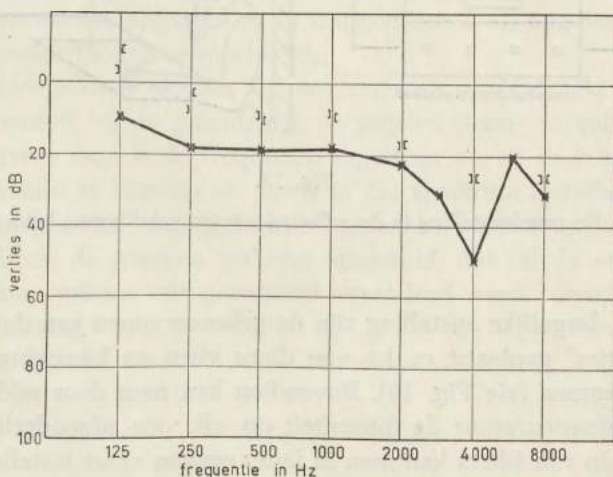


Fig. 17.

Karakteristiek van de trillingsoverdracht van de
stereo-akoestische installatie.

de telefoon op het rechteroor van de waarnemer en de linkermicrofoon met de telefoon op het linkeroor van de waarnemer. De overdrachtskarakteristiek van microfoon tot en met telefoon was recht tot 2000 Hz. Omstreeks 4000 Hz was er een verlies van 30 dB onder deze lijn (Fig. 17). De curve werd bepaald door middel van audiometrie bij normale proefpersonen met tussenschakeling van bovenbeschreven apparatuur.

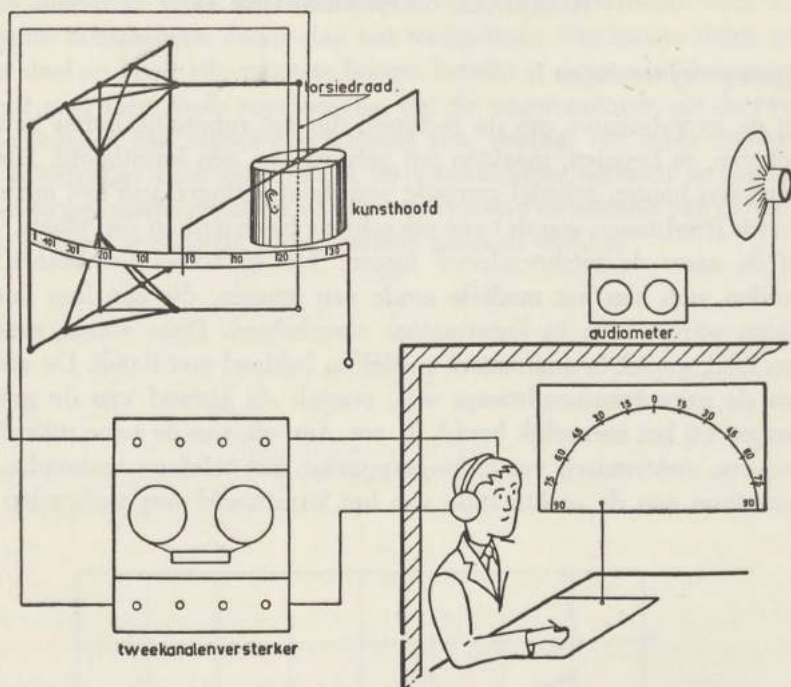


Fig. 18.

De proefopstelling in de reflectie-vrije en geluidsarme kelder.

Bij een dergelijke opstelling zijn de gehoororganen van de waarnemer op „steeltjes” geplaatst en los van diens visus en bewegingen van het hoofd gekomen (zie Fig. 18). Bovendien kan men door middel van de versterkingsapparatuur de intensiteit op elk oor afzonderlijk regelen. Met behulp van filters kan men in ieder orgaan apart instellen welk gedeelte van het frequentiespectrum doorgelaten zal worden. Door de afstand tussen de „oorschelpen” twee maal zo groot te maken (groot kunsthoofd) kan het effect van een dergelijke afstandsvergroting op de ge-

waarwording bestudeerd worden. Hiertoe wordt een derde microfoon bevestigd op de ooras, zodanig dat de afstand tussen de microfoonopeningen tweemaal zo groot is als bij het standaardkunsthofd.

De twee versterkingskanalen kunnen met een stereofonische bandopnemer verbonden worden. Het gehoorde geluid kan op deze wijze vastgelegd worden.

Het kunsthofd is opgespannen tussen twee torsiedraden, zodat het kan oscilleren om de verticale as. Dit is van belang voor de proeven ter bepaling van de invloed van periodiek veranderlijke parameters. Deze invloed kan nagegaan worden door het kunsthofd te laten oscilleren ten opzichte van de geluidsbron met een bekende variatievorm, waarvoor de sinusvormige draaibeweging gebruikt zal worden. Op deze wijze kan het kunsthofd over een regelbare amplitude en met een van te voren instelbare frequentie heen en weer draaien. De gewenste frequentie is te bereiken door het traagheidsmoment van het kunsthofd te variëren.

Een deel der proeven werd in de geluidsarme en reflectievrije kelder van de oorheelkundige kliniek gedaan. Deze proefnemingen gelden als metingen in het „vrije veld”. Ook werden er proeven gedaan in een omgeving met reflecties om de invloed van weerkaatsende vlakken op de stereo-akoesie na te gaan.

Op twee meter afstand van het kunsthofd hangt een luidspreker op gelijke hoogte met de microfoons. Deze geluidsbron zendt trillingen van gewenste frequentie en intensiteit uit. Bij het begin van de proef moet de intensiteit langzaam en in stappen van 1 dB opgevoerd worden om overgangstrillingen te voorkomen.

Als geluidsprikkels worden zuivere tonen en ruis gebruikt. Van beide is de intensiteit bij de geluidsbron te regelen (toon- en ruisgenerator). Bij de zuivere toon is de frequentie regelbaar en bij de bandruis is de frequentieband in breedte en plaats in het spectrum instelbaar. Zo kan van een „witte ruis” een „bandruis” gemaakt worden (octaafband).

Wij hebben de proeven zodanig opgesteld, dat bij de verschillende experimenten telkens één parameter veranderd werd, terwijl de andere constant bleven.

Een overzicht van deze proeven moge hier volgen:

Alle proeven werden genomen in een geluidsarme en reflectievrije ruimte.

No. Ia. De geluidsbron en het kunsthoofd staan stil.

Het geluid is een continue, zuivere toon.

De onderzoeker stelt in:

- a) de frequentie en
- b) de intensiteit van de toon
- c) de stand van het kunsthoofd ten opzichte van de geluidsbron.

De waarnemer geeft veranderingen van het azimut aan. Hiervoor staan hem ter beschikking de informaties uit:

- a) de intensiteitsverschillen en
- b) de faseverschillen tussen de twee oren.

No. Ib. De geluidsbron staat stil; het kunsthoofd maakt een sinusoidale draaibeweging om zijn verticale as.

Het geluid is een continue, zuivere toon.

De onderzoeker stelt in:

- a) de frequentie
- b) de intensiteit van de toon
- c) de middenstand van het kunsthoofd ten opzichte van de geluidsbron, de amplitude om deze middenstand en de slingerperiode van het kunsthoofd.

De waarnemer geeft het moment aan, waarop hij de beweging van de geluidsbron ten opzichte van het kunsthoofd niet meer waarneemt.

Hiervoor staan hem ter beschikking de informaties uit:

- a) de intensiteitsverschillen en
- b) de faseverschillen tussen de twee oren
- c) de variaties van a) en b) tengevolge van de oscillaties van het kunsthoofd.

No. IIa. De geluidsbron en het kunsthoofd staan stil.

Het geluid is een „witte ruis”.

De onderzoeker stelt in:

- a) de intensiteit van de ruis
- b) de stand van het kunsthoofd ten opzichte van de geluidsbron.

De waarnemer geeft veranderingen van het azimut aan. Hiervoor staan hem ter beschikking de informaties uit:

- a) de verschillen in de totale geluidsenergie tussen de oren

- b) de verschillen in de spectrale energieverdeling en
- c) de tijdrelatie van de trillingen in de twee oren.

No. IIb. De geluidsbron staat stil; het kunsthoofd maakt een sinusoidale draaibeweging om zijn verticale as.

Het geluid is een „witte ruis”.

De onderzoeker stelt in:

- a) de intensiteit van de ruis
- b) de middenstand van het kunsthoofd ten opzichte van de geluidsbron, de amplitude om deze middenstand en de slingerperiode van het kunsthoofd.

De waarnemer geeft het moment aan, waarop hij de beweging van de geluidsbron ten opzichte van het kunsthoofd niet meer waarneemt.

Hiervoor staan hem ter beschikking de informaties uit:

- a) de verschillen in de totale geluidsenergie tussen de oren
- b) de verschillen in de spectrale energieverdeling
- c) de tijdrelatie van de trilling in de oren en
- d) de variaties van a), b) en c) ten gevolge van de oscillaties van het kunsthoofd.

No. IIIa. De geluidsbron en het kunsthoofd staan stil.

Het geluid is een bandruis.

De onderzoeker stelt in:

- a) de middenfrequentie
- b) de intensiteit van de bandruis en
- c) de stand van het hoofd ten opzichte van de geluidsbron.

De waarnemer geeft veranderingen van het azimut aan. Bij grote benadering staan hem hiervoor alleen ter beschikking de informaties uit:

- a) de intensiteitsverschillen en
- b) de tijdrelatie van de trilling in beide oren.

Wij zeggen hier: „bij benadering”, omdat het frequentiespectrum van de bandruis altijd enige breedte heeft. De spectrale energieverdeling in beide gehoororganen mogen wij gelijk noemen.

No. IIIb. De geluidsbron staat stil; het kunsthoofd maakt een sinusoidale draaibeweging om zijn verticale as.

Het geluid is een bandruis.

De onderzoeker stelt in:

- a) de middenfrequentie
- b) de intensiteit van de bandruis en
- c) de middenstand en beweging van het kunsthoofd ten opzichte van de geluidsbron.

De waarnemer geeft het moment aan, waarop hij geen beweging van de geluidsbron ten opzichte van het kunsthoofd meer waarneemt. Hiervoor staan hem ter beschikking de informaties uit:

- a) de intensiteitsverschillen
- b) de tijdrelatie van de trilling in beide oren en
- c) de variatie van a) en b) ten gevolge van de oscillaties van het kunsthoofd.

De overwegingen om de experimentele omstandigheden op de manier te kiezen als in dit overzicht gegeven, waren de volgende: In proef No. *Ia* waarborgden de zuivere tonen, dat er een gelijke frequentie in beide kunstoren was, wanneer geluidsbron en kunsthoofd stilstonden. Wanneer — zoals in proef No. *Ib* — het kunsthoofd oscilleert om zijn verticale as, waarbij de snelheid van de microfoons ten opzichte van de geluidsbron periodiek verandert, kan het Doppler-effect van belang worden. Dit zou zich als een sinusvormige frequentie-modulatie moeten uiten (VERSTEEGH). Wij moesten daarom bij de proeven No. *Ib*, *IIb*, en *IIIb* de slingerfrequentie van het kunsthoofd zodanig kiezen, dat de bijdrage van de zijde van een frequentie-modulatie niet waarneembaar was (blz. 55). Wel blijft in proef No. *Ib* de periodieke verandering van de intensiteits- en faseverschillen tussen de twee oren waarneembaar. Een tijdsverschil tussen rechter en linkeroor bestaat er niet bij een continue, zuivere toon, tenminste wanneer de „overgangstrilling” wordt voorkómen door de toon vanaf de gehoordrempel langzaam in stappen van 1 dB in intensiteit te doen toenemen.

In de proeven No. *IIa* en *IIb* werd gebruik gemaakt van een „witte ruis” als geluidsprikkel. De hier gebruikte „witte ruis” is een signaal, dat een frequentiespectrum heeft, waarin alle frequenties van 100 tot 8000 Hz, statistisch juist verdeeld, aanwezig zijn met gemiddeld gelijke energie. Deze geluidsprikkel bevat zeer vele kort durende toonstoten en iedere nieuwe toonstoot geeft aanleiding tot een golffront. Dank zij deze eigenschappen komt er uit de twee gehoororganen een reeks informaties omtrent de tijdrelaties van de trillingen in de twee cochleae.

Bij een ruis is het faseverschil tussen de trillingstoestanden in de twee gehoororganen niet waarneembaar, zoals bij een zuivere toon, omdat de samenstellende componenten van de ruis ieder voor zich minder trillingen omvatten dan nodig zijn voor een separate frequentiewaarneming. Hiervoor zijn volgens GARNER (1949) minstens 8 golven nodig.

Voor de proeven No. *IIIa* en No. *IIIb* werd als geluidsprikkel de bandruis gebruikt. Met deze keuze werd de tijdrelatie van de trillingen in het rechter- en linkeroor gehandhaafd, maar het verschil in geluids-

spectrum tengevolge van diffractie geëlimineerd. Een bandruis is een signaal met de voordelen van een witte ruis zonder de nadelen van brede frequentiespectra, welke door intensiteitsverschillen tussen rechter- en linkeroor in de hogere frequentiegebieden een duidelijke richtingsgewaarwording zouden kunnen geven. Het zal blijken, dat de octaaf-bandruis alleen in het lage frequentiegebied – tot ongeveer 1500 Hz – bruikbaar is. Voor hogere waarden heeft de bandruis weer dezelfde bezwaren als de witte ruis. Reeds binnen het octaaf kan worden waargenomen, dat er een verschil bestaat tussen de spectrale energieverdeling in het linker- en rechteroor. Fig. 19 illustreert de geschematiseerde grafiek van de spectrale energieverdeling van de in de proeven gebruikte signalen.

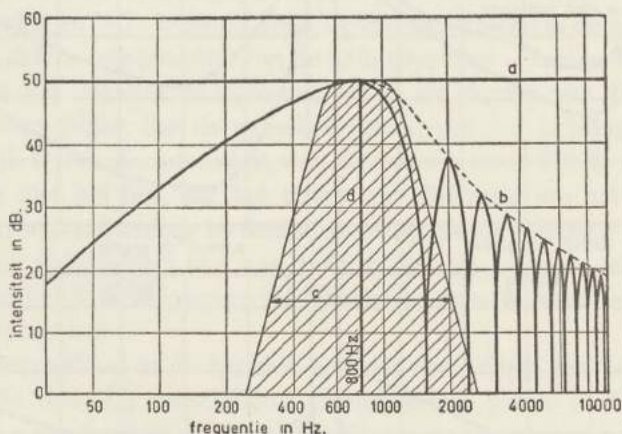


Fig. 19.

Geschematiseerde grafiek van de spectrale energieverdeling van:

- a) witte ruis.
- b) een enkele sinusvormige trilling met boventonen (klikkarakter).
- c) bandruis.
- d) zuivere toon.

Overgenomen van Bürk, KOTOWSKI en LICHTÉ.

Het aan de kosmografie ontleende begrip azimut, dat wij herhaaldelijk zullen gebruiken, is een hoekbepaling in het horizontale vlak van het kunsthoofd. Azimut 0° ligt in het sagittale vlak aan de voorzijde van het kunsthoofd, wanneer dit in zijn rust (midden)-stand hangt aan de torsiedraad.

Resultaten van proef No. Ia.

Bij 12 proefpersonen werd nagegaan met welke nauwkeurigheid zij de richting van een zuivere toon konden aangeven, terwijl het kunst-

hoofd stilstond. In Fig. 20 is het gemiddelde van deze waarnemingen aangegeven: 3 schattingen per persoon en per zijde.

Op de horizontale as van de grafiek zijn de plaatsen van de geluidsbron op de cirkelomtrek ten opzichte van het kunsthoofd, het azimut, aangegeven. Op de verticale as wordt de gemiddelde afwijking (σ) van de schatting ten opzichte van het werkelijke azimut in booggraden uitgetzet. Aan de bovenzijde is de toon en de toonsterkte aangegeven. De waarden bij 250 en 8000 Hz konden niet bepaald worden wegens onvoldoende intensiteit voor een waarneming.

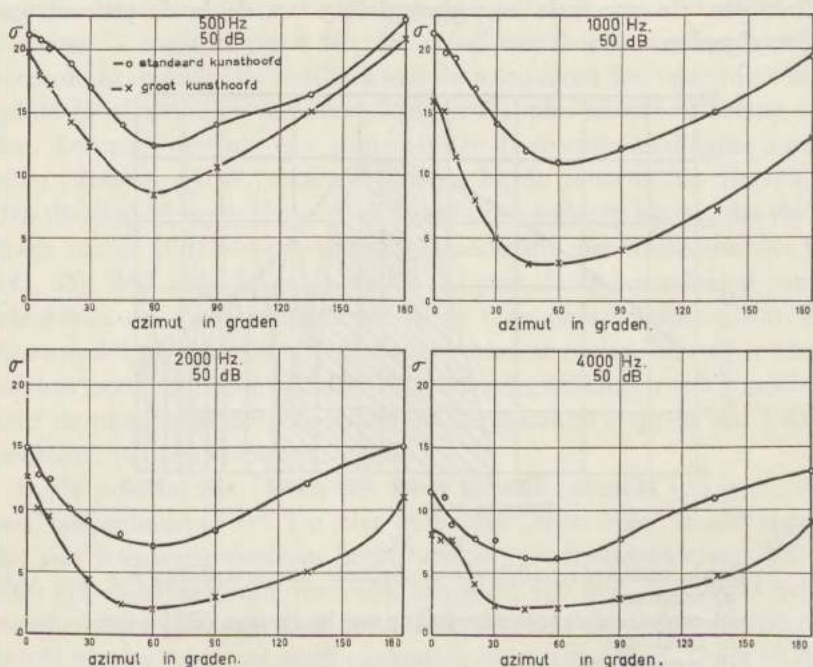


Fig. 20.

De nauwkeurigheid van azimuthschatting als functie van het azimut en van de frequentie voor een standaardkunsthoofd.

De berekening van de gemiddelde afwijking in de nauwkeurigheid van azimuthschatting, geschiedt volgens de $\frac{\sqrt{\sum(x^2)}}{N}$ methode. Voor afwijkingen van een gemiddelde bij bepalingen op grond van een zintuigelijke functie is de methode van bepaling van de „standaardafwijking” de meest gebruikelijke.

In de formule $\sigma = \frac{\sqrt{\sum(x^2)}}{N}$ is

σ = „standaardafwijking” van de nauwkeurigheid in azimut-schatting.

x = de afwijking van het rekenkundig gemiddelde zowel positief als negatief.

N = het aantal van de waarden, waarover het gemiddelde is genomen.

Wij vonden, dat de nauwkeurigheid van richtingschatting van een geluidsbron, die een zuivere toon van 50 dB boven de gehoordrempel uitzendt, vrij gering is voor de frequenties 500 en 1000 Hz. Deze was beter bij de frequenties 2000 en 4000 Hz. Voor al deze waarden ligt het maximum van nauwkeurigheid tussen de azimutwaarden 60° en 80°. Tussen rechts en links bestond geen significant verschil in de nauwkeurigheid. Bij andere intensiteiten van de geluidsprikkel – tussen 40 en 60 dB – vonden wij dezelfde afwijkingen als in de curven van Fig. 20. Uit deze proeven blijkt, dat de nauwkeurigheid van het richtinghoren niet afhankelijk is van de intensiteit van de zuivere toon. Dit is in overeenstemming met het feit, dat het effect van diffractie om het hoofd een *geluidssterkte-verhouding* in decibels weergeeft en hierbij is de intensiteit aan de geluidsbron niet van belang. Om na te gaan, welke de invloed van het intensiteitsverschil tussen de oren is voor het richtinghoren, hebben wij

- a) de versterking in de kanalen zodanig veranderd, dat de intensiteit in de oren bij verschillend azimut steeds gelijk is. Er kan dan alleen een faseverschil overblijven.
- b) het intensiteitsverschil tussen de oren groter gemaakt, zodanig dat de verschillen 10 dB groter zijn dan bij de hoofdstand behoort.

Ad a) De metingen bij dezelfde twaalf personen leverden de volgende uitkomsten op. Naarmate de golflengte toeneemt, moet er een groter azimutverschil bestaan alvorens een faseverschil wordt waargenomen (Fig. 21). Dit grotere azimutverschil betekent een groter wegverschil. Het maakt de indruk alsof het juist waarneembare interaurale faseverschil in graden voor de verschillende frequenties vrij constant is. De lengte van de golf veroorzaakt echter, dat het horen van een faseverschil bij lage tonen zeer onnauwkeurig is. Voor een richtingsaanduiding in de buurt van het sagittale vlak vormt een faseverschil geen nauwkeurige informatie.

Wij gingen bij deze proefpersonen, die een normale gehoorscherpthe hadden, ook na hoe groot het interaurale intensiteitsverschil was, wan-

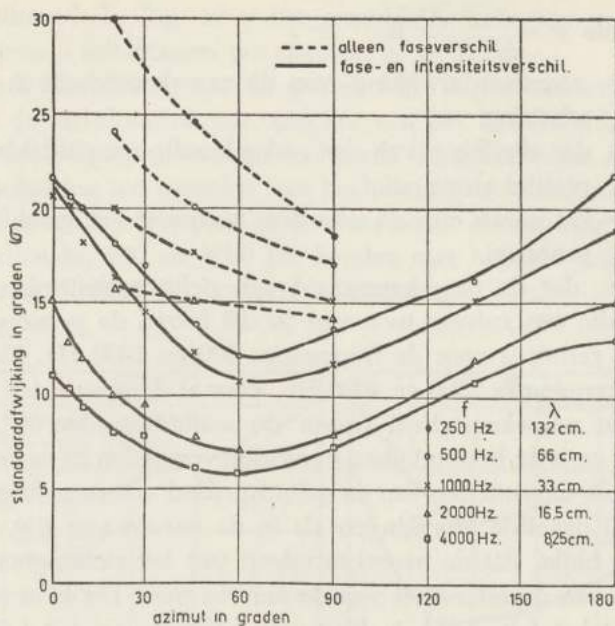


Fig. 21.

Het verschil tussen de nauwkeurigheid van richtinghoren op grond van faseverschil alleen en van faseverschil plus intensiteitsverschil.

neer zij juist waarnamen, dat het kunsthoofd zich niet in de middenstand bevond. Het bleek, dat deze intensiteitsverschillen van dezelfde orde van grootte waren als de relatieve toonsterktetrede bij die frequenties. Het waren verschillen van 0,5 tot 1 dB in de lage frequenties en omstreeks 0.3 dB in de hogere frequenties (zie Fig. 22).

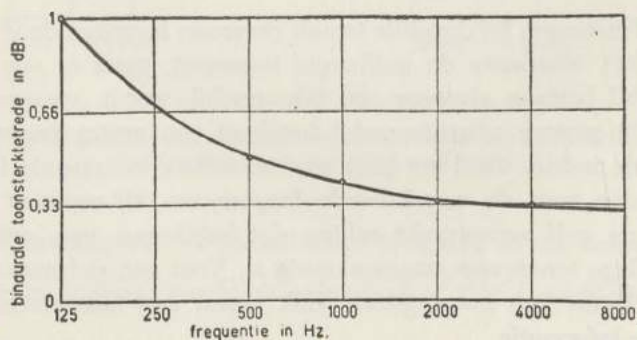


Fig. 22.

Interaurale intensiteitsverschillen welke een azimutverandering juist waarneembaar maken als functie van de frequentie.

De gevonden waarden komen overeen met de resultaten van recente proeven van SCHMIDT (1955). Hij vond — bij een intensiteitsniveau van circa 45 dB boven de drempel in ieder oor —, dat het interauraal waarneembare intensiteitsverschil 0,2 dB bedraagt voor de frequenties boven 2000 Hz en dat het verschil bij lage frequenties toeneemt tot 0,8 dB bij 250 Hz.

Wij hebben ook nagegaan, welke sensatie ontstaat, indien wij, terwijl het kunsthoofd zich in de middenstand bevindt, opzettelijk tussen de oren een intensiteitsverschil (van 0,5 tot 10 dB) veroorzaken. Het blijkt nu, dat hieraan geen richtingsensatie verbonden wordt en ook geen ruimtelijke sensatie; er heeft alleen lateralisatie plaats. Aangezien de proefpersonen in de eerste proef wel een richtingsgewaarwording kregen moet deze ruimtelijke projectie toegeschreven worden aan het interaurale faseverschil, al is dit op zichzelf misschien te gering voor een nauwkeurige richtingsgewaarwording.

Hoe sterk is deze ruimtelijke sensatie? Wij hebben getracht een bepaalde richtingswaardering te niet te doen door een controverte intensiteitsoverheersing. Wij vinden, dat bijvoorbeeld bij een toon van 500 Hz gegeven van 45° opzij, 6 dB versterking in het afgewende oor nodig is om voor de proefpersonen de sensatie van zijwaartse richting op te heffen.

Metingen gedaan met het „grote” kunsthoofd laten zien, dat de nauwkeurigheid van azimuthschatten tweemaal zo groot is als bij het normale kunsthoofd (zie Fig. 20). Dit is ook wel begrijpelijk, omdat het juist waarneembare faseverschil tussen de oren samenhangt met de omtrek van het hoofd en deze weer met de middenlijn.

Resultaten van proef No. 1b

Wij gebruikten dezelfde opstelling van het kunsthoofd en de geluidsbron als bij de vorige proef. Nu echter lieten wij het hoofd gedurende de waarneming een sinusvormige draaibeweging maken aan de torsiedraad. De slingerperiode van het kunsthoofd was van te voren vastgesteld. Na het kunsthoofd een bepaalde uitslag gegeven te hebben, lieten wij het uitslingeren. Hierbij werden de amplituden steeds kleiner. Tenslotte lazen wij op een gradenboog de grootte van de hoek af, waarover het hoofd moest oscilleren om de relatieve beweging van de geluidsbron ten opzichte van het kunsthoofd nog net waar te kunnen nemen. Dit is de kleinste azimuthvariatie, welke waarneembaar is.

Wij deden deze proeven bij 12 personen onder dezelfde condities en met dezelfde geluidsprikkel als in proef No. 1. Wij vonden hierbij, dat

de variatie, welke nog juist waargenomen wordt, kleiner wordt naarmate de slingersnelheid groter wordt. Dit wijst erop, dat de snelheid waarmee de intensiteit en het faseverschil wisselen, een belangrijke informatiebron vormt voor het ruimtelijk horen van zuivere tonen. Men kan zeggen, dat naarmate het kunsthoofd sneller oscilleert, het richtinghoren nauwkeuriger wordt en gemakkelijker verloopt (zie Fig. 23). Dit geldt vooral in het gebied van de lage tonen. Het verschil in nauwkeurigheid is groot tussen oscillatieperioden van 0.7 en 2 seconden, maar hierboven blijven de waarden van σ vrij constant.

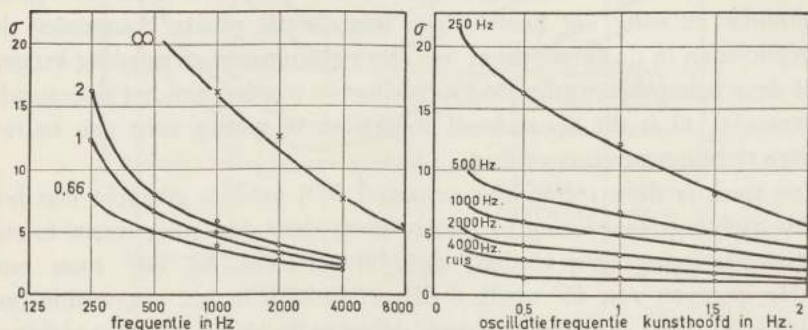


Fig. 23.

Waarneembaarheid van azimuthvariatie als functie van
beweging van het hoofd.
Slingerperiode van het hoofd: ∞ Het hoofd staat stil.
2 sec., 30 oscillaties per min.
1 sec., 60 oscillaties per min.
2/3 sec., 90 oscillaties per min.

Wij hebben reeds eerder opgemerkt, dat de snelheid van de oscillerende hoofdbeweging geschikt gekozen moet worden. Dit staat in verband met het feit, dat de snelheden lager moeten zijn dan de waarde, welke een hoorbaar Doppler-effect zou kunnen opleveren.

Bij de snelste oscillatie van het kunsthoofd (90 schommelingen per minuut in deze proef) is de grootste amplitude, waarbij juist geen Doppler-effect waarneembaar is, 13.5° . Wij mogen daarom het kunsthoofd bij deze snelheid niet over een grotere afstand laten oscilleren. Bij nog grotere oscillatie-snelheden worden de toelaatbare hoeken onbruikbaar klein. Wij zijn bij onze metingen steeds binnen de toelaatbare grenzen gebleven (zie blz. 55).

Daar het voor ons interessant is te weten, welke van de twee periodieke variaties — de variatie van het faseverschil of die van het intensiteitsverschil — de belangrijkste is voor richtinghoren, hebben wij het

volgende experiment gedaan. Het hoofd en de geluidsbron blijven stilstaan, maar nu moduleren wij de versterking in de kanalen sinusvormig en aan de twee zijden in tegenovergestelde zin met hetzelfde aantal decibels als de diffractie oplevert, ten einde het oscilleren, althans wat de invloed ervan op het intensiteitsverschil betreft, te imiteren. Dit geeft een gehoorsensatie, welke duidelijk verschillend is van ruimtelijk horen met bewegend hoofd. Het geluidsbeeld blijft in het hoofd heen en weer gaan tussen rechter- en linkeroor. Het is een wisselende lateralisatie zonder richtinghoren. Wij hebben hier wel de sinusvormige variatie van het intensiteitsverschil, maar niet de variatie van het faseverschil. Hieruit mogen wij concluderen, dat de variatie van het faseverschil tussen de twee oren de belangrijkste factor is bij deze wijze van ruimtelijk horen.

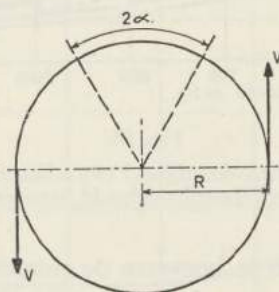


Fig. 24.

De draaiing van de receptoren in verband met het Doppler-effect.

V = lineaire snelheid van het oor bij een slinging van het hoofd over een totale hoek 2α .

Aan de hand van Fig. 24 kan men deze waarde als volgt berekenen:

Snelheid van het oor is: $V = \alpha R \omega \cos \omega t$.

Deze snelheid is het grootst bij het passeren van de evenwichtsstand, hier is: $\cos \omega t = 1$.

Het optimale snelheidsverschil der oren is: $2V = 2\alpha R \omega$

De relatieve frequentieverandering is dan: $\frac{2\alpha R \omega}{c}$

Wil deze binauraal juist waarneembaar zijn, dan moet deze de waarde van 2‰ bereiken of onder de 1000 Hz het vaste verschil van 2 Hz: $\frac{2\alpha R \omega}{c} = 0.002$.

Hieruit kan α berekend worden. De grootste waarde van ω is: $2\pi \times$ slingerfrequentie van het kunsthoofd.

Bij 90 perioden/per minuut is $\omega = 9 \text{ sec}^{-1}$, $2R = 20 \text{ cm}$, en $c = 3.3 \times 10^4 \text{ cm/sec}$.

$$\alpha = \frac{2}{1000} \times \frac{3.3 \times 10^4 \times 57^\circ}{2 \times 9 \times 10} \approx \frac{27 \times 10^5}{2 \times 10^5} = 13.5^\circ.$$

Doen wij dezelfde proeven van groep No. *Ib* met het grote kunsthoofd, dan vinden wij, dat de nauwkeurigheid van richtingbepaling ongeveer tweemaal zo groot wordt als bij het standaardhoofd (Fig. 25).

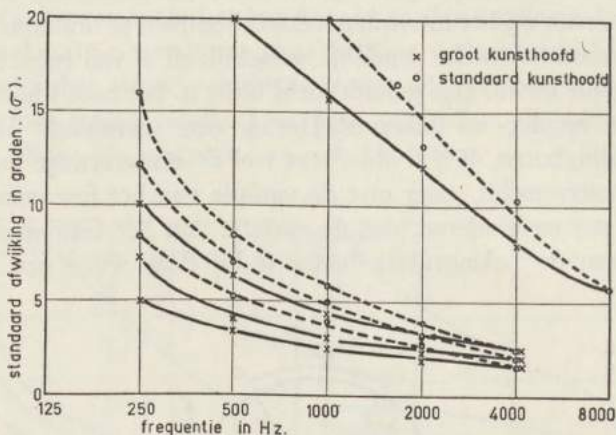


Fig. 25.

Vergelijking tussen de nauwkeurigheid van schatting met behulp van een groot en met een standaardkunsthoofd, wanneer deze oscilleren.

Om te weten te komen in hoeverre de ruimtelijke sensatie weerstand biedt aan het overheersen van de luidheid aan één zijde: de sensatie van lateralisatie, hebben wij door verandering van de intensiteitsverhouding gezocht naar de grootte van het intensiteitsverschil, waarbij richtinghoren onmogelijk wordt. De normale intensiteitsverschillen spelen zich af in de omgeving van ten hoogste 0,4 dB bij 1000 Hz. Daar het intensiteitsverschil van 15 dB, nodig voor het opzettelijk verwringen van de ruimtelijke sensatie, wel erg groot is ten opzichte van deze 0,4 dB, moet de intensiteitsbijdrage bij het richtinghoren wel onbelangrijk zijn.

Resultaten van proef No. *Ila*

De proefopstelling en meetmethode waren dezelfde als in proef No. *I*. Alleen werd nu als geluidsprikkel in plaats van de zuivere toon een „witte ruis” gebruikt. Hierdoor ontstonden wijzigingen in de afhankelijk veranderlijken.

Bij 16 personen werd nagegaan hoe groot onder deze omstandigheden de nauwkeurigheid van richtingschatten was.

Wij vonden, dat de nauwkeurigheid van de richtingslokalisatie met een witte ruis zeer groot is (Fig. 26). Deze is belangrijk beter dan van

lang aanhoudende zuivere tonen. Vooral bij kleine azimuthhoeken is de nauwkeurigheid reeds groot. Zij is vrijwel optimaal tussen 10° en 90° . Verder naar de achterzijde wordt de nauwkeurigheid minder. Vermoedelijk vindt dit zijn oorzaak in het onderscheppen van de trillingen in de zeer hoge frequentiegebieden door de oorschelpen: juist deze gebieden dragen in hoge mate bij tot de richtingbepaling. Voor de verschillende intensiteiten van de ruis aan de geluidsbron blijven de resultaten van het richtinghoren gelijk. De metingen aan een groot kunsthoofd leverden dezelfde waarden op als bij een normaal kunsthoofd werden gevonden.

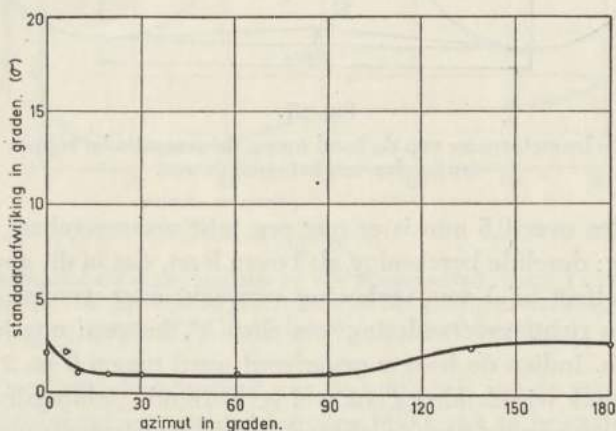


Fig. 26.

De nauwkeurigheid van azimuthschatting als functie van het azimuth, wanneer een witte ruis als geluidsprikkel wordt gebruikt.

In bovenstaande proeven werd wederom enerzijds het natuurlijke intensiteitsverschil veranderd en gelijk nul gemaakt, anderszijds werden intensiteitsverschillen van 30 dB aangebracht. In beide gevallen bleek, dat de sensatie van ruimtelijk horen en richtinghoren vrijwel niet beïnvloed werd.

Ook werd de tijdrelatie tussen de trillingen in de gehoororganen kunstmatig beïnvloed. Dit werd gedaan door de bandlengte tussen de afspeelkoppen van een stereofonische apparatuur te wijzigen ten opzichte van de normale bandlengte, waarmede opgenomen werd.

Halverwege tussen de magnetische afspeelkoppen, welke zich op een afstand van 50 mm van elkaar bevonden, kon de band over een zekere hoogte worden opgetild. Hierdoor werd de bestaande bandlengte tussen deze koppen vergroot (Fig. 27). Bedroeg de hoogte van de uitwijking 1 mm, dan was er een zeer duidelijke verandering in de oorspronkelijke

richtingslokalisatie van de geluidsbron waarneembaar. Een berekening leert, dat 1 mm hoogte een verlenging van de weg met 0,04 mm betekent. Dit komt overeen met een toename van de tijd met $210 \mu\text{sec.}$; de bandsnelheid bedraagt 19 cm/sec. De verwringing in de richtingssensatie bedroeg dan circa 20° . Ook KIETZ geeft dergelijke waarden aan (Hoofdstuk IV).

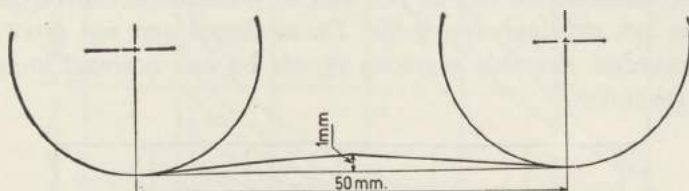


Fig. 27.

De lengtetoe name van de band tussen de magnetische koppen
tengevolge van het opzij duwen.

Bij optillen over 0,5 mm is er nog een juist waarneembare richtingsverandering; dezelfde berekening als boven leert, dat in dit geval slechts $\frac{1}{4}$ van het effect bij 1 mm verhoging verwacht mag worden. Dit komt neer op een richtingsverandering van circa 5° , hetgeen nog juist waarneembaar is. Indien de hoogte gevarieerd werd tussen 0 en 2 mm, ontstond een sterk wisselende en ook wel verwarrende richtingsindruk. Een periodieke verlenging van de afstand tussen de afspeelkoppen gaf de proefpersoon de sensatie alsof hij zèlf in de ruimte draaide. Psychologisch is dit te verklaren, omdat de proefpersoon zich moeilijk kan voorstellen, dat de gehele omgeving beweegt. Hij transposeert dit in een sensatie, waarbij hij zelf beweegt. Dergelijke psychologische beschouwingen over richtingssensaties in andere dan het horizontale vlak hebben wij in dit bestek opzettelijk achterwege gelaten.

Uit deze proeven blijkt, dat het verstoren van de tijdrelatie tussen de twee oren van grote invloed is op het richtinghoren, in tegenstelling tot de veranderingen van de intensiteitsverhouding tussen de twee oren, die klaarblijkelijk van minder belang zijn.

Resultaten van proef No. IIb

Evenals bij de vorige proef gebruikten wij hier als geluidsprikkel de „witte ruis”, komende van een stilstaande bron. Het kunsthoofd maakt echter nu weer een sinusoidale draaibeweging zoals in proef. No. Ib. Wij deden de proefnemingen bij 10 personen. Hierbij namen wij waar,

dat de nauwkeurigheid van richtingbepalen bij bewegen van het hoofd de nauwkeurigheid bij stilstaand hoofd slechts overtrof in de nabijheid van azimut 0° en in het gebied achter de ooras (zie Fig. 28).

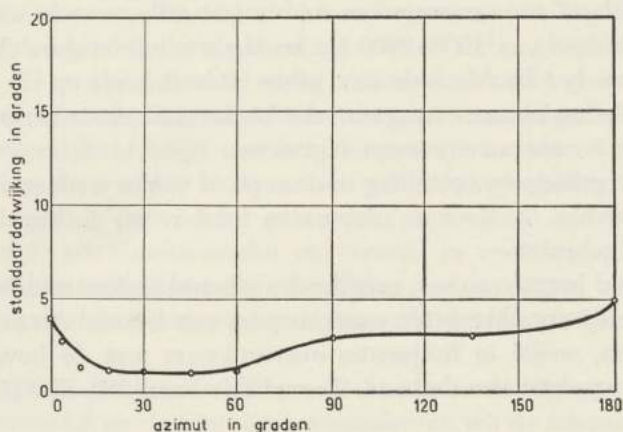


Fig. 28.

Juist waarneembare azimutvariatie bij een slingerperiode van 2,1 en 0,67 sec. Dezelfde waarden werden gevonden voor het gehele intensiteitsgebied tussen 40 en 70 dB boven de gehoordrempel.

Een invloed van de intensiteit van de witte ruis aan de geluidsbron op de nauwkeurigheid van richtingbepalen blijkt niet te bestaan in het gebied tussen 40 en 70 dB boven de drempel. Bij de slingersnelheden van 0,5, 1 en 1,5 Hz, welke wij hebben toegepast, konden wij geen verschil in de nauwkeurigheid van schattingen vinden, wel blijft er het verschil ten opzichte van de waarneming bij een stilstaand kunsthoofd. Klaarblijkelijk ligt het overgangsgebied bij zeer langzame slingeringen met perioden vele malen groter dan 2 sec.

Bij een „witte ruis” of meer algemeen bij sterk complexe geluiden is het richtinghoren optimaal en vrijwel onafhankelijk van intensiteit en oscillatieperiode. De sensatie van ruimtelijk horen en de bepaling van de richting waaruit het geluid komt, worden door verschillen in de versterking rechts en links binnen ruime grenzen niet beïnvloed: zelfs intensiteitsverschillen van 30 dB tussen de twee kanalen hebben geen nadelige invloed op de richtingsgewaarwording.

Resultaten van proef No. IIIa

Bij de volgende proeven was de geluidsprikkel de bandruis. Deze heeft — zoals wij reeds eerder uiteenzetten — de voordelen zowel van

de zuivere toon als van de witte ruis. De bandruis was in ons geval een octaaf breed. Het is van belang dit onderzoek in een reflectievrije ruimte uit te voeren, omdat de bandruis ter breedte van een octaaf al enigszins het karakter van een zuivere toon krijgt en de neiging vertoont „staande golven” te vormen in een ruimte met reflecterende wanden.

De bandruisen van 1000–2000 Hz en hoger zijn niet geschikt, omdat diffractie om het hoofd reeds zo'n grote invloed heeft op de spectrale energieverdeling binnen één octaaf, dat hieruit informatie verkregen kan worden. Dit is voor onze proeven ongewenst.

De meetmethode en opstelling in deze proef waren wederom dezelfde als bij proef No. 1a. Voor de uitkomsten hebben wij de bepalingen bij 9 personen gebruikt.

Eerst werd het niveau van een bandruis bepaald door middel van gelijke luidheidsvergelijking ten opzichte van een bekend niveau van de zuivere toon, welke in frequentie overeenkwam met de bovenste begrenzingsfrequentie van de band. Zo werd de band 250–500 Hz in luid-

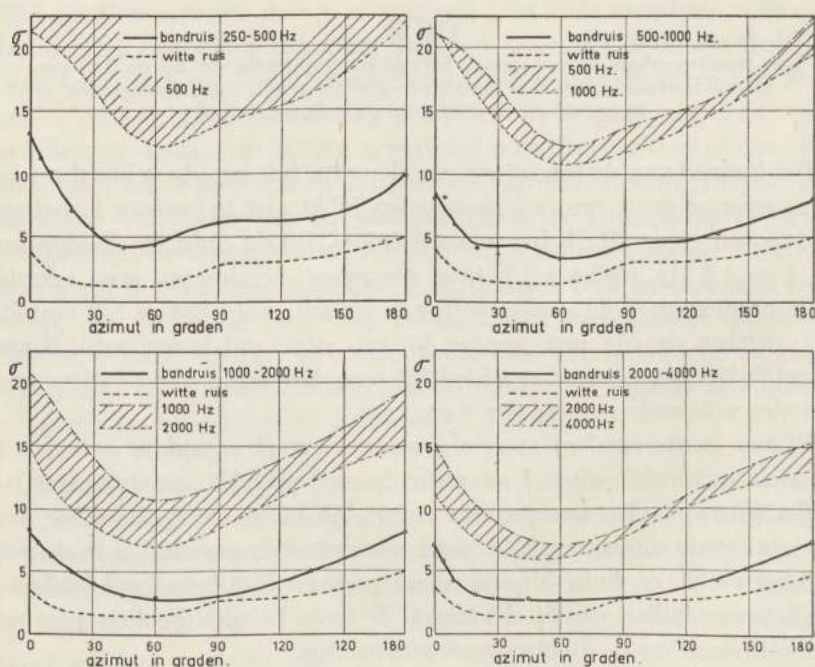


Fig. 29.

De nauwkeurigheid van azimuthschatting als functie van het azimuth in de middenfrequentie van de octaafband.

In vergelijking daarmee de witte ruis en de frequenties, welke de octaafbanden begrenzen.

heid vergeleken met die van een zuivere toon van 500 Hz. Evenzo werd de bandruis 500–1000 Hz vergeleken met de zuivere toon van 1000 Hz.

De octaafbanden 250–500 Hz en 500–1000 Hz zijn geluiden, die een vrij nauwkeurige richtingbepaling toelieten, althans beter dan ieder van de zuivere tonen, welke de bandruisen begrenzen (zie Fig. 29).

Wij vinden hierbij, dat de bandruis voor de richtingbepaling een hoeveelheid informatie oplevert, welke zuivere tonen niet geven. Volledigheidshalve zijn ook de resultaten met hogere octaafruisen weergegeven. De nauwkeurigheid blijkt met het klimmen der octaven toe te nemen. Wij hebben hier echter te doen met een richtingbepaling waarvan de nauwkeurigheid door drie parameters tot stand komt, te weten: tijdsverschil, intensiteitsverschil en verschil in spectrum. Deze laatste parameter vertroebelt hier de vergelijking met de lagere octaafbanden, waarbij slechts de eerste twee parameters bijdragen tot de nauwkeurigheid.

Om wederom te kunnen differentiëren tussen de bijdrage van het intensiteitsverschil en de tijdrelatie, veranderden wij de intensiteitsverhouding tussen de versterkingskanalen.

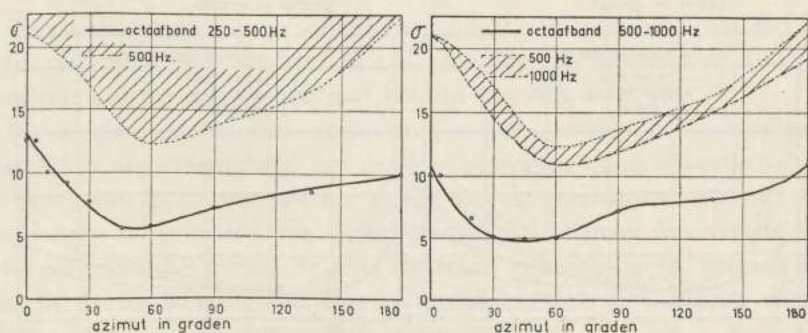


Fig. 30.

De nauwkeurigheid van richtingschatten voor octaafbandruisen, wanneer het intensiteitsverschil tussen de gehoororganen opgeheven is, vergeleken met de frequenties, welke de octaafbanden begrenzen.

Wij hebben hierbij enerzijds de intensiteiten in de gehoororganen gelijk gemaakt, terwijl het azimuth ongelijk nul was (Fig. 30). Er bestaat een gering, maar duidelijk meetbaar verschil in nauwkeurigheid bij normale intensiteitsverhoudingen in het linker- en rechteroor ten opzichte van een kunstmatig gelijk gemaakte intensiteit: de eerste geeft nauwkeuriger waarneming dan de tweede. Anderszijds hebben wij de intensiteiten in

de kanalen sterk verschillend (30 dB) gemaakt om te weten te komen hoe groot de invloed hiervan is. In het laatste geval blijkt, dat het vermogen tot richtinghoren goed behouden blijft, zelfs wanneer de intensiteitsverschillen tussen de gehoororganen in de middenstand van het hoofd reeds 30 dB bedragen. Onzekerheid ontstaat pas als het intensiteitsverschil meer dan 40 dB bedraagt.

De proeven van groep No. *IIIa* gedaan met een „groot kunsthoofd” laten zien, dat de nauwkeurigheid van richtinghoren hiermede weinig beter is dan bij gebruik van het standaardkunsthoofd (zie Fig. 31 en 29).

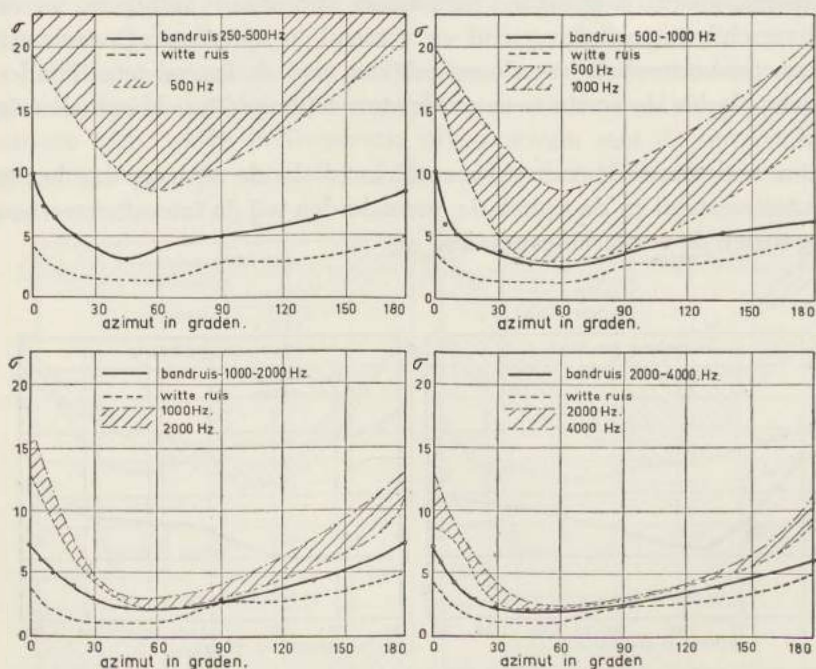


Fig. 31.

De nauwkeurigheid van azimutschatting als functie van het azimut en de middenfrequentie van de bandruis, opgenomen met behulp van een groot kunsthoofd.

Hiermede vergeleken de nauwkeurigheid bij een witte ruis en met de frequenties, welke de bandruis begrenzen.

Indien wij de tijdrelatie op dezelfde wijze verminkten als in proef No. *IIa*, heeft dit tot gevolg, dat de richtingslokalisatie in dezelfde mate verstoord wordt als reeds beschreven werd.

Resultaten van proef No. IIIb

Hierbij werd dezelfde bandruis gebruikt als in proef No. IIIa, alleen werden de metingen nu verricht met een bewegend kunsthoofd.

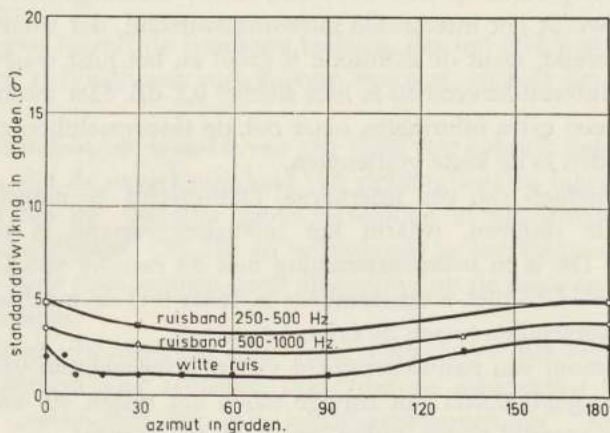


Fig. 32.

De waarneembaarheid van azimuthvariatie bij een slingerperiode van 2 sec. voor bandruisen vergeleken met een witte ruis.

De resultaten van de proefnemingen bij 9 personen brachten aan het licht, dat de nauwkeurigheid van richtingbepalen met behulp van een bandruis niet zo groot is als met behulp van een witte ruis.

Bij de gebruikte oscillatieperioden van het kunsthoofd bleek er geen verschil in nauwkeurigheid van de richtingswaarneming te bestaan. Verandering van intensiteit van het geluid aan de geluidsbron was niet van invloed op de juistheid van richtingbepalen. Indien er kunstmatig een intensiteitsverschil tussen de oren tot stand gebracht werd, vonden wij, dat dit de nauwkeurigheid van richtingslokalisatie slechts zeer weinig verstoorte tot intensiteitsverschillen van 30 dB.

Wanneer wij de versterking in de beide elektronische kanalen sinus-oïdaal en aan elkaar tegengesteld lieten toe- en afnemen, kregen de proefpersonen weer de sensatie van lateralisatie en niet van ruimtelijkheid.

Dezelfde metingen gedaan met een „groot kunsthoofd” wezen uit, dat de nauwkeurigheid niet toenam. Het gemak waarmee men nu de richting kon bepalen werd echter wel iets groter.

Wanneer wij deze meetresultaten nader beschouwen en de omstandigheden en de uitkomsten in de bespreking betrekken, dan vinden wij het volgende: met zuivere tonen van lage frequenties is richtinghoren zeer onnauwkeurig. Pas indien het *faseverschil* groot genoeg is, is het mogelijk de richting vanwaar het geluid komt te bepalen. Het is het

faseverschil, dat dit bewerkstelligt, daar het intensiteitsverschil tengevolge van diffractie klein is, althans kleiner dan het juist waarneembare interaurale intensiteitsverschil. Dit bedraagt bij de lage tonen 0,8 dB. In de hogere frequenties (boven 1000 Hz) is het richtinghoren nauwkeuriger. Hier wordt het interaurale intensiteitsverschil, dat waarneembaar is, sneller bereikt, want de diffractie is groot en het juist waarneembare interaurale intensiteitsverschil is hier slechts 0,2 dB. Het intensiteitsverschil is dus een extra informatie, maar ook de faseverschillen zijn duidelijker geworden in de korte golflengten.

Het waarnemen van een interauraal faseverschil is mogelijk, zoals blijkt uit de proeven, waarin het intensiteitsverschil is opgeheven (FIRESTONE). Dit is in overeenstemming met de mening van GROEN, die stelt, dat „een fase niet waarneembaar is, maar wel de mechanische gevolgen van verschillen tussen de fasetoestanden”.

Een maximum van nauwkeurigheid van richtingschatten van het azimut van een geluidsbron van zuivere tonen ligt tussen 60° en 80°. Wij namen geen verschil tussen linker- en rechterzijde waar.

Tussen 20 dB boven de gehoordrempel en de distorsiedrempel is de intensiteit van de geluidsbron niet van invloed op de nauwkeurigheid van het richtinghoren. Om deze reden zijn de meeste proefnemingen bij 50 dB boven de gehoordrempel gedaan.

Verschillen van ongeveer 6 dB in de versterkingsfactor tussen de twee oren heffen bij zuivere tonen de sensatie van ruimtelijkheid en richting op, indien intensiteitsverschil en faseverschil tegengestelde richtingsgewaarwordingen opleveren. Dit is in overeenstemming met de bevindingen van STEWART. STEINBERG en SNOW geven op, dat 20 dB verschil nodig is om een overheersende lateralisatie tegengesteld aan de fasewerking te krijgen. Het is zeer waarschijnlijk, dat kleine intensiteitsverschillen door adaptatie snel verloren gaan voor de waarneming.

Een „groot hoofd” (diameter $2 \times$) maakt de richtingbepaling met zuivere tonen tweemaal zo gemakkelijk. Dit is begrijpelijk, daar het faseverschil tweemaal zo groot is. Het intensiteitsverschil is niet steeds tweemaal zo groot, omdat de verhouding tussen golflengte en diameter van de bol veranderd is en hiermede de diffractie. Bewegingen van het hoofd maken het richtingbepalen van een bron, welke zuivere tonen uitzendt, gemakkelijker. Hier speelt de snelheid van verandering van het intensiteits- en faseverschil een rol. Een dergelijke informatie is voor het individu klaarblijkelijk van grotere betekenis dan de grootte van de verandering op zich zelf.

Sinusoidale aan elkaar tegengestelde intensiteitsveranderingen tussen twee oren geven een sensatie van lateralisatie, maar niet van ruimtelijk

horen. Zodra hier echter een passend faseverschil aan toegevoegd wordt, verandert de sensatie in ruimtelijk horen.

De veranderingen van het faseverschil blijken bij een oscillerend kunsthoofd belangrijker voor het richtinghoren te zijn dan intensiteitsveranderingen.

Wij mogen hieruit de conclusie trekken, dat het faseverschil de parameter voor richtinghoren met zuivere tonen is, en niet het intensiteitsverschil.

De proefnemingen, waarbij van een witte ruis gebruik gemaakt wordt, laten zien, dat de nauwkeurigheid van richtingbepalen bijna optimaal is tussen 10° en 90° . Relatief grote verschillen in intensiteitsverhouding van de twee kanalen (30 dB) en wijzigingen in het frequentiespectrum tussen de twee oren hebben geen uitwerking op de nauwkeurigheid van richtingbepalen.

KIETZ zegt, dat men bij stereo-akoestisch horen het verschil in frequentiespectrum niet opmerkt, maar dat de informaties uit de twee cochleae „versmelten tot een lokalisatiewaarneming”. Klaarblijkelijk was de invloed van verschillen in de spectrale energieverdeling ook voor hem niet groot. Alles wijst erop, dat tijdsverschillen de beslissende richtingbepalende factoren vormen, zodra het kortdurende complexe geluiden betreft.

Een stereo-akoestische geluidswaarneming met goede tijdrelatie in de twee oren is sterk resistent tegen abnormale verschillen in frequentiespectrum en intensiteit. Een kunstmatige verstoring van de tijdrelatie daarentegen verwringt de richtingsgewaarwording ogenblikkelijk.

Bewegingen van het hoofd kunnen het reeds vrijwel optimale richtinghoren nauwelijks verbeteren. Alleen in de gebieden in de buurt van azimut 0° en 180° is verbetering merkbaar, omdat deze waarden bij de beweging in de gebieden van optimale nauwkeurigheid komen te liggen.

De grootte van het kunsthoofd en de oscillatiesnelheid tussen 0,5 en 1,5 Hz oefenen geen invloed uit op de nauwkeurigheid van richtingschatten. Wanneer de verstoring van de tijdrelatie periodiek toeneemt en afneemt, maakt dit op de waarnemer de indruk alsof hijzelf in de ruimte schommelt.

Ook de bandruis geeft een sterke richtingsaanduiding, welke zelfs door grote verschillen (tot ongeveer 30 dB) in de versterkerkanalen moeilijk verstoord wordt.

Een disruptie van de tijdrelatie in de bandruis kan de richtingslokalisatie geheel in de war brengen. Ook hier geeft de snelheid van oscilleren van het hoofd geen verandering in de nauwkeurigheid van schatten in het door ons gemeten gebied, evenmin het wijzigen van de intensiteit

van het geluid. Een sinusoidale en in de twee oren aan elkaar tegen-
gestelde intensiteitswisseling van de bandruis kan geen ruimtelijkheids-
sensatie opwekken.

Aangezien er bij de bandruisen geen noemenswaard verschil in ge-
luidsspectrum in de twee oren is, moet de gehele richtingsensatie toe-
geschreven worden aan de *tijdrelatie*.

Het lokaliseren van een complex geluid is in de buurt van azimut 0°
zeer goed te noemen, in tegenstelling tot het lokaliseren van zuivere
tonen. Dit is alleen te begrijpen met een richtingslokalisatie op grond
van de tijdrelatie tussen de gehoororganen. De intensiteitsverschillen ten-
gevolge van geluidsdiffractie om het hoofd en de oorschelpen zijn bij
deze kleine hoeken nog subliminair. De spectrale energieverdeling in
de oren kan vervormd en afgesneden worden zonder verlies van ruimte-
lijkheid of richtingbepaling.

Een groot kunsthoofd is alleen van belang voor het bepalen van de
richting van de geluidsbron, welke zuivere tonen uitzendt, omdat de in-
tensiteitsverschillen en faseverschillen hier de enig overgebleven in-
formatiebronnen zijn. Bij de witte ruis en de bandruis kon de invloed
van vergroting van het kunsthoofd niet vastgesteld worden. Indien er
enige invloed zou zijn geweest, ligt deze toch binnen de meetnauwkeu-
righeid van de methode. De informatie uit de tijdrelatie is ruim voldoende
voor een optimale lokalisatie.

De bandruis geeft veel meer informatie over de richting dan de be-
grenzende frequenties, wanneer deze als continue zuivere toon gegeven
worden. Men mag hieruit concluderen, dat de bandruisen een informatie
geven, welke de zuivere tonen niet hebben, namelijk de tijdrelatie.

*Door onderlinge vergelijking en eliminatie van factoren menen wij, in
overeenstemming met VON HORNPOSTEL, aangetoond te hebben, dat de
tijdrelatie tussen de twee oren van overwegend belang is voor het rich-
tinghoren bij kortdurende geluiden.* Hiermede hebben wij onze werk-
hypothese bevestigd.

Dit feit dient getoetst te worden aan een aantal bekende psycho-
akoestische fenomenen. Het is mogelijk om in ieder oor afzonderlijk een
geluid van een trillingsbron geheel te maskeren met lawaai van een
andere trillingsbron. Bij stereo-akoestisch waarnemen blijkt, dat het
eerstgenoemde geluid goed onderscheiden kan worden van het mas-
kerende lawaai, c.q. dat de lokalisatie van de eerstgenoemde geluids-
bron goed onderscheiden kan worden van de tweede, indien de ruimte-
lijke afstand tussen de twee geluidsbronnen maar voldoende is in ver-
band met de onnauwkeurigheden van azimut- en afstandsschatting.

Omdat men geluidsbron en maskerend lawaai ieder afzonderlijk kan

lokaliseren en dus van elkaar kan scheiden, mag hieruit geconcludeerd worden, dat indien monauraal een geluid gemaskeerd wordt, deze maske- ring niet de tijdrelatie van de trillingen verstoort. Bij binauraal horen blijft deze tijdrelatie ter beschikking van het centrale zenuwstelsel voor een ruimtelijke gewaarwording.

Bij alle curven valt het op, dat de nauwkeurigheid van richtingbe- palen in de „wereld” vóór de ooras groter is dan er achter. Bij zuivere tonen bevindt dit maximum zich tussen 60° en 80° azimut.

Wanneer wij nagaan welk verband er kan bestaan tussen deze be- vindingen en de S-curve, die onder anderen door JONGKEES en GROEN is gevonden, dan brengen wij in herinnering, dat de S-curve de represen- tatie is van een constante wijsfout. Een toon van 500 Hz in het horizon- tale vlak wordt bij azimut 45° te veel naar de ooras (te ver opzij) aan- gewezen (JONGKEES en GROEN). De toestand van de oorschelpen en de toegang tot het trommelvlies blijken van grote invloed te zijn. Met een toon van 1000 Hz is het resultaat ook een te veel opzij wijzen, maar met een omslag in de miswijzing bij 80° (v. d. VEER). De S-curve wordt steeds platter en gaat over in een rechte naarmate het geluid meer complex wordt. De aard van de geluidsprikkel is dus van belang.

De S-curve is de resultante van de informatie van de tijd- en fase- relatie en het intensiteitsverschil. Een lokalisatie dichtbij azimut 0° kan uitsluitend met tijd- en faseverschil verklaard worden.

AFSTANDHOREN

Voor deze experimenten gebruikten wij dezelfde proefopstelling en condities als voor het richtinghoren. De wanden waren reflectievrij en de afstand van de geluidsbron tot het centrum van het kunsthoofd was twee meter bij een azimut 0° . De proef werd met zuivere tonen en ruisen gedaan bij verschillende intensiteitsniveaux. De ijking van de niveaux vond plaats door een gelijke luidheidsbepaling in één oor ten opzichte van een bekend niveau (audiometer).

Aan 12 proefpersonen, die zich in een ander vertrek bevonden, werd gevraagd de afstand te schatten (per proef driemaal). Deze schattingen waren sterk uiteenlopend en zeer onnauwkeurig, ook bij iedere proef- persoon afzonderlijk (zie Tabel I).

Tabel I.

	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB
500 Hz	1-8 m.	1-12 m.	2-20 m.	2-80 m.
1000 Hz	1-5 m.	1-10 m.	2-20 m.	2-20 m.
2000 Hz	1-3 m.	1- 3 m.	1- 5 m.	1- 5 m.
4000 Hz.	1-3 m.	1- 3 m.	1- 3 m.	1- 5 m.
witte ruis				1- 4 m.

De tabel geeft de gevonden waarden voor verschillende frequenties en intensiteiten weer. Men ziet, dat met het kleiner worden van de intensiteit de spreiding in de geschatte afstanden kleiner wordt. De witte ruis is alleen bij 50 dB sterkte gebruikt. Bij verzwakking van deze geluidsprikkel houden de trillingen van verschillende frequenties wel een gemiddeld gelijke intensiteit boven de 0,0002 dyne/cm², maar de luidheid van de lage tonen is veel geringer dan in het midden- en hoge tonengebied in verband met de drempelgevoeligheid (zie Fig. 11). De afstandsschatting voor de bron van een witte ruis van 50 dB is van dezelfde orde van grootte als van de hoge tonen van dezelfde intensiteit.

Uit bovengenoemde schattingen mag men reeds concluderen, dat afstandsschatten onder deze omstandigheden niet mogelijk is.

Bij wijziging van het azimut of versterking in één van de kanalen, bleef de variabiliteit in de aanduidingen even groot. Proeven met een groot kunsthoofd leverden eveneens onnauwkeurige uitkomsten op. Wanneer wij echter het kunsthoofd lieten oscilleren werd het afstandsschatten beter, speciaal voor de lage tonen.

stilstaand hoofd		slingerperiode 1 sec.
500 Hz	20 dB	20 dB
	1- 8 m.	1- 5 m.
	50 dB	50 dB
	2-80 m.	2-20 m.
1000 Hz	20 dB	20 dB
	1- 5 m.	2-13 m.
	50 dB	50 dB
	2-20 m.	2-12 m.
2000 Hz	20 dB	20 dB
	1- 3 m.	1- 3 m.
	50 dB	50 dB
	1- 5 m.	2- 5 m.
4000 Hz	20 dB	20 dB
	1- 3 m.	1- 3 m.
	50 dB	50 dB
	1- 5 m.	1- 4 m.
witte ruis	50 dB	50 dB
	1- 4 m.	2- 4 m.

Tabel II.

Ook bij oscillerend kunsthoofd werd weer nagegaan, welke de invloed was, die wijzigingen in de versterkingsverhouding van de kanalen en van de grootte van het kunsthoofd hadden. De spreiding in de op-

gegeven waarden bleef even groot. Het bepalen van de afstand van een geluidsbron, die een zuivere toon uitzendt is — gezien de grote foutenmarge — vrijwel niet mogelijk (zie Tabel II).

Minder grote fouten in de schattingen werden gemaakt, wanneer de witte ruis gebruikt werd, maar de spreiding bleef zo groot, dat van zinvol afstandschatten ternauwernood gesproken kon worden. Hetzelfde gold voor de bandruis. Ook in de oscillatieproeven was de spreiding van de schattingen zo groot, dat een verandering van nauwkeurigheid niet viel waar te nemen.

Wij willen de proeven en hun uitkomsten niet in extenso behandelen, omdat het resultaat steeds zeer onnauwkeurig en niet reproduceerbaar bleek te zijn. Wel vermelden wij nog, dat de witte ruis aan de geluidsbron plotseling omgeschakeld kon worden in een „witte ruis”, welke 3 dB per octaaf naar de hoge tonen afvalt. Dit gaf de waarnemer niet de sensatie van een afstandsverandering. Hoewel volgens von Békésy afstandhoren zou berusten op de verandering in het timbre en het intensiteitsniveau van een bekend geluid, kon dit niet met deze proef bevestigd worden.

Dit alles leidt dan ook tot de conclusie, dat afstandbepalen onder de gegeven proefomstandigheden niet mogelijk is.

De afstand wordt veel beter geschat, wanneer er reflecterende wanden aanwezig zijn, vooral wanneer de geluidsbron een witte ruis of een bandruis uitzendt. Wanneer het kunsthooft dan bovendien nog beweegt wordt de afstandswaarneming gemakkelijker, ofschoon de bepalingen op zich hetzelfde zijn (zie Tabel III).

geen reflecties		met reflecties	
		stilstaand hoofd	bewegend hoofd
500 Hz	2–80 m.	} tussen 1–3 m.	} tussen 1–3 m.
1000 Hz	2–40 m.		
2000 Hz	2–20 m.		
bandruis 500–1000	2–20 m.		
1000–2000	2–20 m.		
witte ruis	2–20 m.		

Tabel III.

In tegenstelling tot de meetresultaten in een reflectievrije ruimte vallen nu alle schattingen tussen 1 en 3 meter, voor alle toegepaste geluidsprikkels en bij alle gebruikte intensiteiten van 20 tot en met 50 dB. Wanneer wij onder de laatste omstandigheden een verandering in de versterking van de kanalen aanbrengen of zelfs in een van de kanalen

een filter inschakelen, ontstaan er geen significante veranderingen in de nauwkeurigheid van schatten.

Alvorens de uitkomsten te bespreken zullen wij nagaan welke factoren aan het afstandhoren ten grondslag kunnen liggen.

In een reflectievrije omgeving is afstandschatten van zuivere tonen theoretisch niet mogelijk. Het is echter moeilijk om deze ideale omstandigheden te verwezenlijken: de geluidsbron is niet puntvormig. Daardoor bestaat de mogelijkheid, dat de geluidsbron de trillingen die reeds tegen het hoofd gereflecteerd waren, ten tweede male naar het hoofd reflecteert. Er bestaat dus een tijdsverschil tussen rechtstreeks uitgezonden en tweemaal gereflecteerde trillingen. Dit is alleen waarneembaar wanneer het geluid niet een zuivere toon is.

Er ontstaat dan een waarneembare echo met een bepaald tijdsverschil. De intensiteit van de gereflecteerde trillingen is afhankelijk van hun golflengten en de grootte van de reflecterende voorwerpen. Naarmate de tonen lager worden wordt de echo zwakker en daarmee afstandhoren moeilijker. Naarmate geluidsbron en hoofd dichter bij elkaar komen wordt het geluid meer enkelvoudig: zonder echo. Bij twee meter tussenruimte is de echotijd 12 millisecon. Een echotijd van 1 millisecon. — dus tweemaal een waarneming achter elkaar in één oor — is nog waarneembaar. Dit gebeurt bij een afstand van 16 cm tussen geluidsbron en receptor. Deze wijze van afstandhoren is dus zeer geschikt voor hoge tonen en op niet al te grote afstand (von Békésy).

Een andere informatie voor afstandhoren is de volgende: Naarmate een geluidsbron zich dichter bij het bolvormige hoofd bevindt zal een hoofddraai een groter intensiteitsverschil tussen de oren veroorzaken.

Dit intensiteitsverschil kan men als volgt berekenen: (zie Fig. 33)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(PF_1)^2}{(PF_2)^2} \text{ hierin is } PF_1 = PF_2 + 2R \varphi$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(PF_2 + 2R\varphi)^2}{(PF_2)^2} \approx \frac{4R\varphi}{PF_2}$$

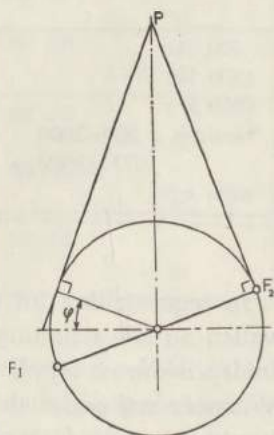


Fig. 33.

De intensiteitsverhouding in F_1 en F_2 als functie van de hoek φ .

Deze intensiteitsverhouding geldt alleen voor waarden, waarbij de diffractie om de bol te verwaarlozen is, dus voor lage tonen.

Uit bovenstaande vergelijking zien wij, dat naarmate de geluidsbron dichterbij staat, de hoofddraaiing nodig om een intensiteitsverschil waar te nemen kleiner is. Dit zou een wijze van afstandbepalen kunnen zijn voor een geluidsbron, die lage tonen uitzendt.

Wanneer er weerkaatsende wanden zijn, staan de informatie uit de reflecties ook ten dienste van een afstandbepaling. Hierbij krijgt de waarnemer een informatie over twee gekoppelde geluidsbronnen: de één — ten opzichte van een reflecterend vlak — het spiegelbeeld van de ander (zie Fig. 34).

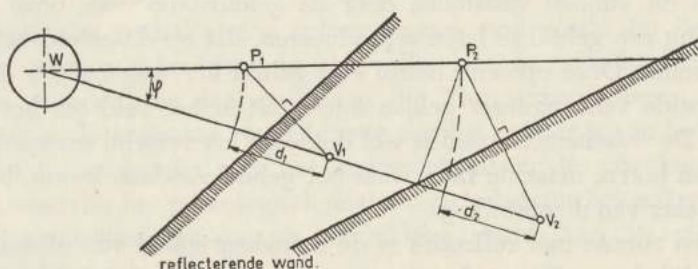


Fig. 34.

Een geluidsbron en zijn spiegelbeeld ten opzichte van een waarnemer.

P_1 en P_2 zijn de reële geluidsbronnen.

V_1 en V_2 zijn de virtuele geluidsbronnen.

$d_1 = d_2$ is het afstandsverschil tussen reële en virtuele geluidsbronnen en equivalent aan een tijdsverschil.

φ is de hoek tussen de richting van rechtstreekse en gereflecteerde geluidstrilling.

Door waarneming van de d_1 , de φ en de intensiteitsverhouding tussen rechtstreekse en de gereflecteerde trilling is de afstand van de geluidsbron P_1 geheel vastgesteld. Voor de bovengenoemde intensiteitsverhouding is het echter noodzakelijk, dat de waarnemer de reflecterende eigenschappen van de weerkaatsende wand kent. Door hoofdbewegingen wordt de φ nauwkeuriger bepaald.

Wanneer de metingen betreffende het afstandhoren geïnterpreteerd worden naar deze theoretische mogelijkheden, blijkt, dat in een reflectievrije ruimte de lage tonen slecht geprojecteerd kunnen worden naar afstand, en slechts weinig beter met bewegend hoofd. De hoge tonen worden gemakkelijker gelokaliseerd, omdat er reflecties tussen geluidsbron en kunsthoofd bestaan. Bij beweging van het hoofd storen de wisselende diffractieverschijnselen even veel als de afstandinformatie toeneemt. Een verbetering valt uit de metingen niet af te leiden. Voor

de ruis is de afstandbepaling enigszins beter dan voor zuivere tonen tengevolge van de weerkaatsingen tussen geluidsbron en hoofd.

In proeven met het grote kunsthofd waren de schattingen niet nauwkeuriger dan met het standaardhofd.

Voor het afstandhoren achten wij de waarde van een intensiteits- en faseverschil tussen de gehoororganen niet groot, op grond van het feit, dat deze eerder informatie over een richting dan over een afstand geven. Dit wordt bevestigd door de uitkomsten van onze metingen.

In onze proeven hebben wij ook kunnen vaststellen, dat het frequentiespectrum van een geluid en de veranderingen daarin door het transport in het medium veroorzaakt, geen maatstaf zijn voor de afstand. Wij hebben dit kunnen vaststellen door de geluidsbron van onze proefopstelling een geluid te laten reproduceren, dat op de geluidsband was opgenomen. Deze opname betrof een geluid ver weg en één dichtbij, maar beide van ongeveer gelijke intensiteit in het veld om het kunsthofd. De waarnemers konden wel duidelijk het verschil tussen de twee geluiden horen, maar de bron waar het geluid vandaan kwam, bleef de luidspreker van de opstelling.

In een ruimte met reflecties is de nauwkeurigheid van afstandhoren aanzienlijk beter. Dit vindt zijn oorsprong in de samenwerking van de tijdrelatie tussen reëel en virtueel geluidsbeeld, de richtingsverschillen tussen deze twee en bovendien de monaurale, successieve intensiteitsverhouding tussen de rechtstreekse en de gereflecteerde trilling.

Afstandhoren is afhankelijk van het waarnemen van echo's en van richtinghoren.

In een bekende ruimte, dat wil zeggen een ruimte, waarin de waarnemer de reflecterende eigenschappen van de voorwerpen en hun plaats kent, weet hij dadelijk een geluidsbron te lokaliseren. Omgekeerd kan de waarnemer zelf met behulp van een bekend geluid zijn omgeving construeren. Een blinde doet dit zonder erbij na te denken met zijn voetstappen en met het tikken van zijn stok.

HOOFDSTUK VI

STEREO-AKOESTISCHE PROEFNEMINGEN BIJ PATHOLOGISCHE GEHOORORGANEN EN AFWIJINGEN IN HET CENTRALE ZENUWSTELSEL

Eigen proefnemingen 2

Wanneer men pathologische gehoororganen onderzoekt op de wijze, zoals in voorgaand hoofdstuk beschreven is, kan men afwijkingen vinden van de waarden, die daar gevonden zijn. Het verband tussen de verandering in de anatomie en de functie van het gehoor is van belang. In verband hiermede zijn voor het onderzoek alleen die afwijkingen gekozen, waarvan het pathologisch-anatomisch substraat bekend was. Het patiëntenmateriaal, dat ons ter beschikking stond, kan als volgt gerubriceerd worden. Gevallen van:

- A) Geleidingsslechthorendheid aan één of twee zijden tengevolge van:
- | | | |
|--|---|--|
| otitis media catarrhalis en otitis media purulenta. | } | belemmering van de overdracht van trillingen in het middenoor. |
| otitis media adhaesiva sicca al of niet met perforaties van het trommelveel. | | |
- cerumen en kunstmatige oorproppen (belemmering van de voortplanting van de trilling in de gehoorgang).
- radicale operatie (geen faseverschil tussen de trillingen bij de vensters).
- fenestratie.
- B) Verlies van één of beide oorschelpen.
- C) Perceptieslechthorendheid aan één en aan twee zijden tengevolge van:
- | | | |
|------------------------------------|---|---|
| lawaaihardhorendheid | } | gedeeltelijke of totale uitval van het orgaan van Corti en vermindering van de ganglioncellen in de spil. |
| presbycusis | | |
| traumatische uitval van de cochlea | | |
| labyrinthitis | | |

meningitis tuberculosa
morbus Ménière

neuritis { bij bastoon-
 { slechthorenden
 { na een encefalitis).

bruggehoektumor

} beschadiging van de nervus
acusticus en „hoger gelegen”
zenuwweefsel.

- D) Afwijkingen in de medulla oblongata en het cerebrum, welke niet noodzakelijkerwijs met een slechthorendheid voor tonen gepaard gaan, maar toch een nadelige invloed kunnen uitoefenen op de gehoorzin.

syringobulbie (gliosis in de
bulbus)
arteriosclerose
multipele sclerose

} aandoeningen van de stam en
„hoger gelegen” zenuwweefsels.

Bij de geleidings-slechthorenden is het mechanische overbrengings-systeem van de geluidstrillingen naar de cochlea gestoord. Dit betekent, dat de overbrenging van de energie in de verschillende frequenties sterk verschillend is van de normale overdracht. Bij dit type van slechthorendheid worden de grootste gehoorverliezen in de lage tonen gevonden; in de hoge tonen bestaan er slechts geringe of geen verliezen. Voor deze proef vormt een geluid met een breed spectrum dus geen goede prikkel. Daarom is hier de zuivere toon als voornaamste prikkel gekozen.

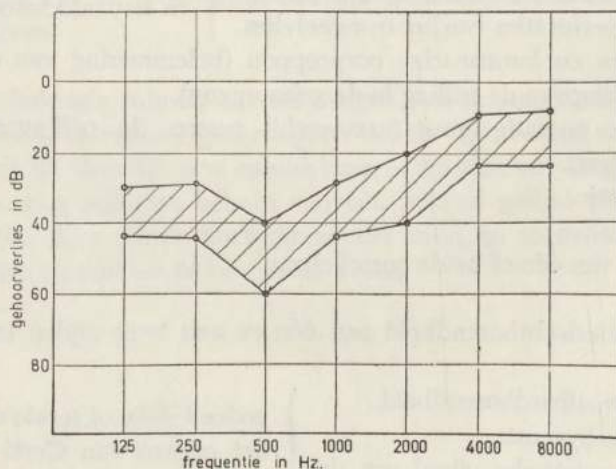


Fig. 35.

De gehoorverliezen van 6 patiënten met vochtige middenooraandoeningen vallen binnen het gearceerde gebied.

Onderzocht werden twee gevallen van otitis media catarrhalis en vier gevallen van otitis media purulenta. In al deze gevallen was het middenoor geheel of bijna geheel gevuld met vocht (transsudaat en exsudaat). Het waren éénzijdige processen waarbij een geleidingsverlies van gemiddeld 45 dB in de lage frequenties en een normale beëngleiding bestond. Het andere gehoororgaan was geheel normaal (zie Fig. 35).

De aandoeningen bestonden reeds één tot vier dagen. Bij het onderzoek bleek, dat aan de zijde van het normale gehoororgaan de nauwkeurigheid van richtingschatten met zuivere tonen enigszins verminderd was en afweek van de bepalingen, die in het vorige Hoofdstuk gedaan werden (zie Fig. 36a). Wanneer de geluidsbron zich echter aan de zijde van het gestoorde oor bevond, bestonden er grove afwijkingen. In de lage frequenties (tot 500 Hz) was het nog mogelijk om, alhoewel gebrekkig, een richting te bepalen (zie Fig. 36b).

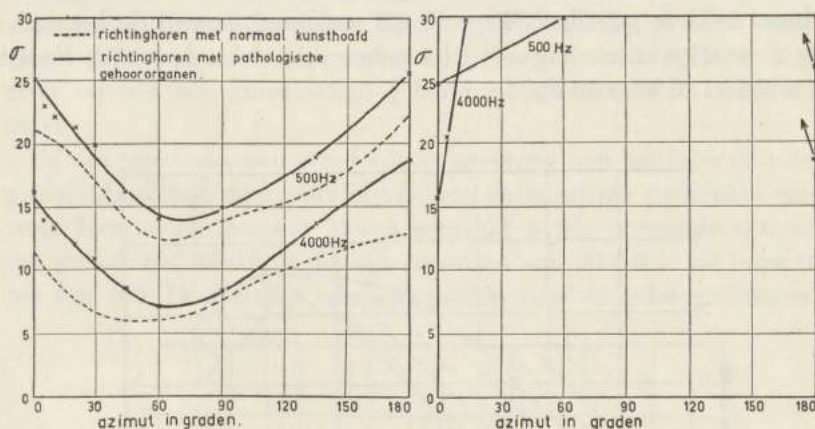


Fig. 36a.

Gemiddelde afwijking van de nauwkeurigheid van richtingbepalen met zuivere tonen aan de zijde van het normale gehoororgaan, terwijl aan de andere zijde een middenooraandoening of afsluiting van de gehoorgang bestaat. (De stippellijn geeft de onnauwkeurigheid bij normale gehoororganen aan).

Fig. 36b.

Gemiddelde afwijking van de nauwkeurigheid van richtingbepalen met zuivere tonen aan de zijde van het pathologische gehoororgaan, waar een aandoening van het middenoor of een afsluiting van de gehoorgang bestaat.

Bij de hogere frequenties (2000 Hz en hoger) konden de proefpersonen niet zeggen waar het geluid vandaan kwam. De toon werd in het afgewende oor wel gehoord — zoals bleek bij uitschakeling van het kanaal naar het toegewende en slechte oor — maar de informaties uit beide cochleae waren zo tegenstrijdig wat betreft faseverschil en intensi-

teitsverschil, dat een richtingbepaling niet mogelijk was en een richtings-sensatie soms zelfs geheel ontbrak.

Door bij deze patiënten een aangepaste versterking ter compensatie van het geleidingsverlies aan te brengen, werd een aanzienlijke verbetering in de nauwkeurigheid van richtingbepaling verkregen, zoveel zelfs, dat de nauwkeurigheid van schatting dezelfde werd als bij normaalhorenden (zie Fig. 36a, stippellijn).

Een ander type van middenooraandoening is de droge, met littekens genezen vorm van een vroegere otitis media. Er werden voor dit onderzoek zes patiënten met een éézijdige otitis media adhaesiva zonder perforaties uitgekozen en acht patiënten met een geperforeerd trommelvlies, waarvan evenwel meer dan 50 % van de oppervlakte nog aanwezig was rondom de hamersteel. Er bestond in deze gevallen geen afscheiding uit het middenoor. In het geleidingszieke oor was de gehoordrempel in deze gevallen 30 tot 50 dB verhoogd, terwijl de beengeleiding normaal was (zie Fig. 37). Het gehoor aan de andere zijde leverde een normaal audiogram op.

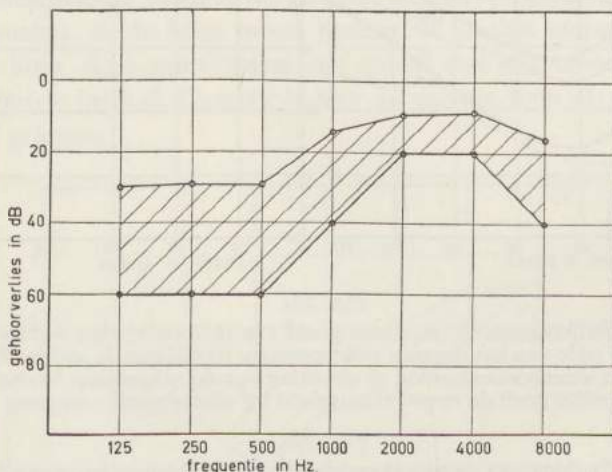


Fig. 37.

De gehoorverliezen van de 14 patiënten met droge middenooraandoeningen vallen binnen het gearceerde gebied.

De afwijking bestond in al deze gevallen reeds meer dan vier weken, zodat de auditieve oriëntering „centraal” aangepast is volgens JONGKEES en GROEN. Deze aanpassing wil zeggen, dat iemand met ongelijke waar-

neming in de twee oren na verloop van een zekere tijd dit verschil voor een richtingbepaling niet meer in aanmerking neemt.

De uitkomsten van de proefnemingen bij deze personen waren gelijk aan die bij de vochtige middenooraandoeningen (zie Fig. 36a en 36b). Een compensatie van het intensiteitsverlies had ook hier weer tot gevolg, dat de nauwkeurigheid van richtingschatten gelijk werd aan die van normaalhorenden.

Indien in plaats van zuivere tonen de witte ruis gebruikt werd, bleek, dat het richtingbepalen ook zonder intensiteitscompensatie ongestoord was bij geleidingshardhorendheden, waarbij verliezen van omstreeks 45 dB in de lage en 20 dB in de hoge tonen bestonden. Dit gold zowel voor vochtige als voor droge middenooraandoeningen. Deze uitkomst is in overeenstemming met de bevindingen in het voorafgaande hoofdstuk, waarbij tussen de gehoororganen kunstmatig een intensiteitsverschil werd geschapen.

Als contrôle op de metingen bij deze pathologische gevallen werd een aantal proeven gedaan bij mensen, die een normaal gehoor hadden, maar bij wie een kunstmatige geleidingshardhorendheid werd veroorzaakt.

Bij zes proefpersonen werd één gehoorgang aan het laterale uiteinde geheel afgesloten door middel van een in paraffine gedrenkte wattenprop. Het audiogram dat hierna gemaakt werd, vertoonde een verlies van gemiddeld 40 dB in de lage tonen en van 20 dB in de hoge tonen (zie Fig. 38). De fysische omstandigheden voor de geluidstrillingen zijn

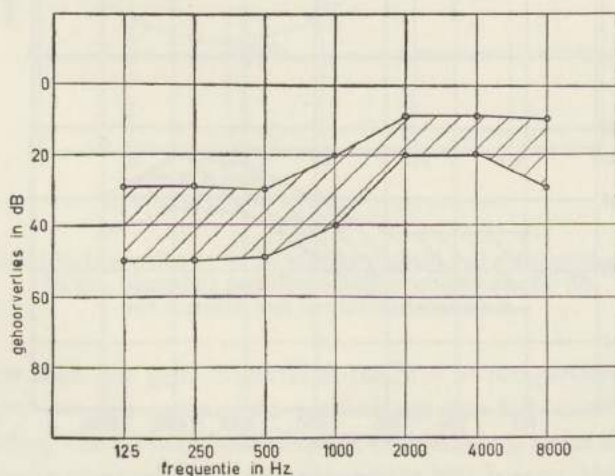


Fig. 38.

Het gehoorverlies van zes personen, waarbij de gehoorgang is afgesloten met in paraffine gedrenkte wattenproppen, ligt in het gearceerde gebied.

onder deze omstandigheden identiek met die, waarbij de gehoorgang is afgesloten door cerumen.

Bij deze proefpersonen was de nauwkeurigheid, waarmee de richting van een bron van zuivere tonen bepaald kon worden aan de onbehandelde zijde, in geringe mate verminderd. Aan de afgesloten zijde echter was het richtinghoren voor zuivere tonen gestoord. De bevindingen waren wederom dezelfde als bij de vochtige en droge middenooraandoeningen (zie Fig. 36a en 36b).

Wanneer beide gehoororganen werden afgesloten met in paraffine gedrenkte wattenproppen, was het resultaat een geleidingsverlies, dat beiderzijds gelijk was. Onder deze omstandigheden was de nauwkeurigheid van richtingbepalen met zuivere tonen gelijk aan die van normaalhorenden (zie Fig. 36a stippellijn). Er werden op dezelfde wijze ook enkele gevallen van tweezijdige otitis media sicca perforata en otitis media chronica purulenta onderzocht. Hoewel de storingen in de gehoororganen aan de twee zijden niet geheel gelijkvormig waren, waren de uitkomsten van de richtingbepalingen vrijwel gelijk aan die bij afsluiting van beide gehoorgangen met paraffinewatten.

Bij patiënten, die een operatie hadden ondergaan, waarbij de mastoïdcellen en het middenoor tot een grote ruimte zonder trommelvlies en middenoorbeentjes waren gemaakt (radicaaloperatie), bestond een geleidingsverlies van ongeveer 60 dB in de lage frequenties en van circa 40 dB in de hoge frequenties (zie Fig. 39).

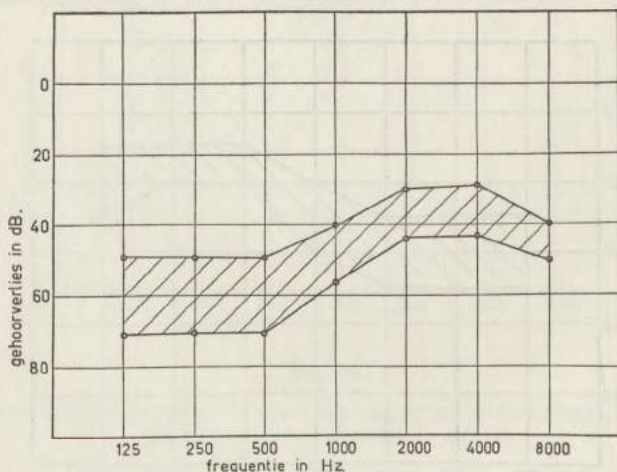


Fig. 39.

De gehoорverliezen van vier patiënten, bij wie aan één zijde een radicale tympano-mastoïdectomie is verricht, vallen binnen het gearceerde gebied.

Het geleidingsverlies in deze gevallen is zo groot, dat de energie van de trillingen opgevoerd moet worden tot een waarde, waarbij deze trillingen door beengeleiding van de schedel ook het gehoororgaan aan de andere zijde prikkelen. Hierdoor kunnen tijdsverschillen tussen een trilling in linker- en rechteroor verloren gaan. Vier patiënten, die bovengenoemde operatie aan één zijde hadden ondergaan, waren niet in staat te bepalen uit welke richting zuivere tonen kwamen, of zij hoorden de tonen niet, wanneer de geluidsbron aan de geopereerde zijde stond. Zij konden het geluid aan de zijde van het goede gehoororgaan wel horen, maar zonder beweging van het kunsthoofd was de plaats van de geluidsbron niet aan te geven.

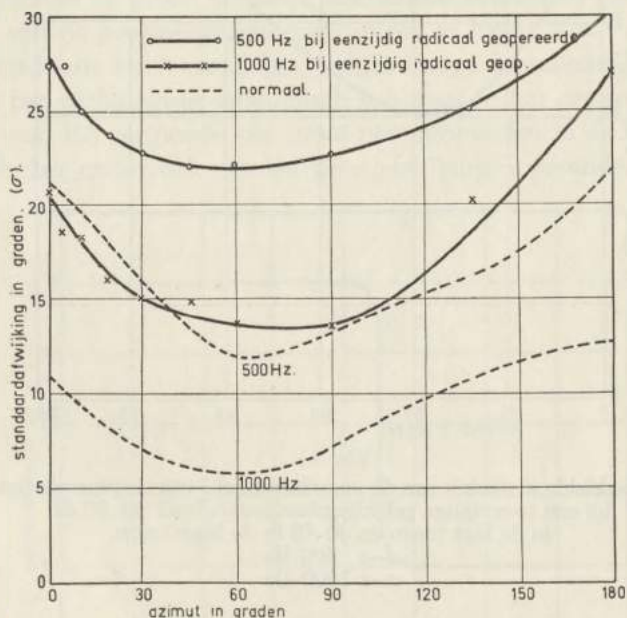


Fig. 40.

Gemiddelde afwijking van de nauwkeurigheid van richtingschatten bij een éézijdige geleidingshardhorendheid van 60 dB met correctie van het intensiteitsverlies.

Wanneer men het geleidingsverlies trachtte te compenseren door het aanbrengen van een aangepaste versterking, was het noodzakelijk de beengeleiding van de hoofdtelefoons uit te schakelen, zodat alleen geluid door de lucht voortgeleid in de gehoorgang kon komen. Verder diende men te voorkomen, dat trillingen van grote intensiteit uit de telefoon aan het slechte oor om het hoofd heen naar het goede oor lekten. Alleen na

deze voorzorgen was het de patiënt mogelijk de richting van een geluidsbron aan beide zijden juist te schatten (zie Fig. 40).

Twee patiënten, aan beide zijden radicaal geopereerd, namen wel een geluid van 80 dB boven de drempel waar, maar de richtingslokalisatie was zeer onnauwkeurig, vooral in het gebied om azimut 0° . Een maximum bestond in het verlengde van de gehoorgang (zie Fig. 41).

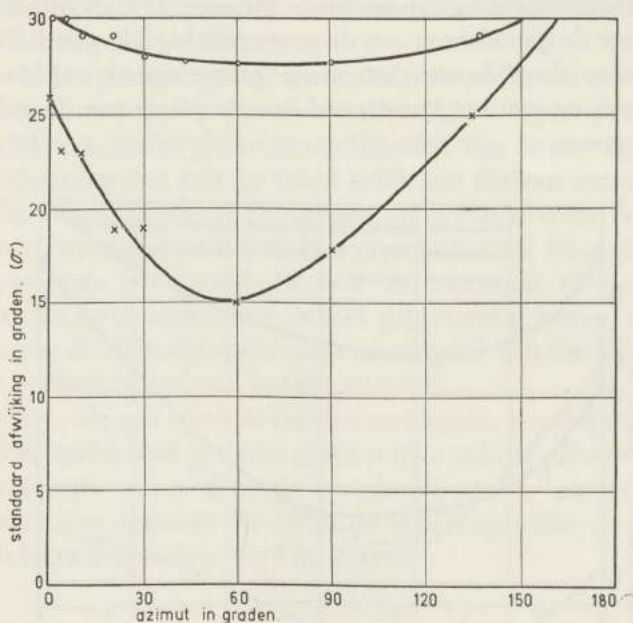


Fig. 41.

Gemiddelde afwijking van de nauwkeurigheid van richtingschatten bij een tweezijdige geleidingshardhorendheid van 60 dB in de lage tonen en 40 dB in de hoge tonen.

o—o 500 Hz
x—x 1000 Hz

Zes otosclerose-patiënten, die aan één zijde gefenestreerd waren, hadden een gemiddeld gehoorverlies van 30 dB in het geopereerde en van 60 dB in het niet geopereerde oor. Het bleek, dat bij hen de nauwkeurigheid van richtinghoren gelijk was aan die van ééNZijdig geleidingsgestoorden met een verhoging van de gehoordrempel van ongeveer 30 dB (zie Fig. 36a en 36b).

Wanneer de „venster-operatie” aan twee zijden was uitgevoerd, was de gehoorfunctie ongeveer gelijk aan die bij personen met wattenpropen in beide gehoorgangen. De nauwkeurigheid van richtingbepaling was daarmee ook in overeenstemming en dus gelijk aan die van normaalhorenden (zie Fig. 36 stippellijn).

Om na te gaan wat het effect zou zijn, wanneer één of beide oorschelpen van het kunsthoofd waren verwijderd, werd het vermogen tot richtinghoren onder deze omstandigheden bij 4 normaalhorenden bepaald. Voor het richtinghoren met zuivere tonen bij stilstaand hoofd in een reflectievrije ruimte maakte het wegnemen van één of twee oorschelpen van het kunsthoofd geen verschil. Bij oscillerend hoofd leek de geluidsbron vaker aan de zijde van het schelploze oor te staan. Bij luisteren zonder oorschelpen naar een ruis werd deze zonder uitzondering achter de proefpersoon gelokaliseerd. De lokalisatie was het spiegelbeeld van de geluidsbron ten opzichte van het verticale vlak door de ooras. Dit gold zowel voor stilstaand als voor bewegend kunsthoofd.

Bij patiënten uit groep C (perceptieslechthorendheden) bleken de uitkomsten van de proefnemingen meer uiteen te lopen. Eén van deze patiënten leed aan een tweezijdige, gelijkvormige lawaaihardhorendheid, waarvan het pathologisch-anatomisch substraat in het orgaan van Corti gelegen was. Hij vertoonde een groot perceptieverlies in de hoge tonen. Bij vestibulair onderzoek werden geen afwijkingen gevonden.

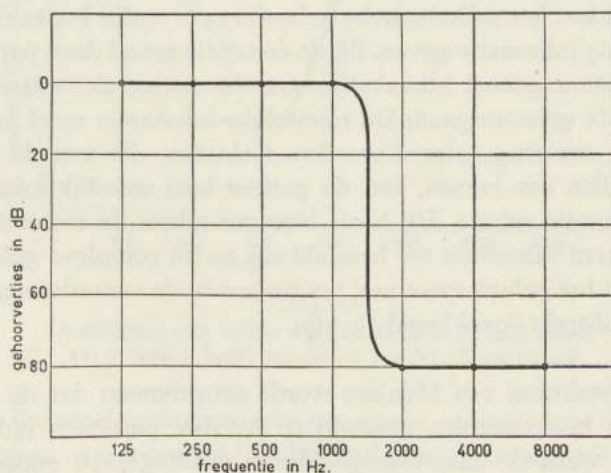


Fig. 42.

Audiogram met een verlies in de hoge tonen,
dat steil afvalt in één octaaf.

Ondanks dit gehoorverlies was bij hem in de nauwkeurigheid van richtingschatten geen afwijking ten opzichte van het normale te vinden. De gevonden curve is gelijk aan die van Fig. 20.

Bij de waargenomen zuivere tonen had hij de informatie van de faseverschillen zoals een normaalhorende die heeft, en bij de witte ruis die van tijdrelatie tussen de trilling in linker- en rechteroor.

Dezelfde proef werd gedaan bij patiënten met een presbycusis. Deze personen hebben ook een perceptieverlies in de hoge tonen. De gehoordrempel is echter meestal niet zo steil afvallend als in het voorgaande geval. De uitkomsten van de richtingbepalingen waren overeenkomstig de vorige (zie Fig. 20). Deze aandoeningen van het orgaan van Corti hebben dus geen ander effect op het horen dan die van een tonenfilter. Voor deze patiënten is „witte ruis” slechts een bandruis. Op grond van de ervaring bij normale gehoororganen waarbij toonfilters ingeschakeld waren, verwachtten wij ook geen afwijking in het richtinghoren (zie Hoofdstuk V).

Bij twee patiënten met een totale uitval van de cochlea aan één zijde, één tengevolge van een ongeval en een ander tengevolge van een labyrinthitis, werd gevonden, dat de nauwkeurigheid van richtingschatten gelijk was aan die bij patiënten met een geleidingsverlies van 60 dB monauraal. Deze patiënten konden niet bepalen uit welke richting een geluid kwam. Bij sterke geluiden heeft de geleidingshardhorende toch nog een voordeel boven de patiënten met de éézijdige perceptiedoofheid. In het eerste geval kan het pathologische gehoororgaan onder bepaalde omstandigheden nog informatie geven. Bij de éézijdig totaal dove patiënt is het richtingschatten geheel afhankelijk van de monaurale waarneming in het bruikbare gehoororgaan. De ruimtelijke lokalisatie moet in deze gevallen door ervaring geleerd worden. Geluiden, die van de zijde van het uitgevallen oor komen, kan de patiënt heel moeilijk lokaliseren in een reflectievrije ruimte. Hij heeft hiervoor alleen de monaurale informatie omtrent intensiteit ter beschikking en bij complexe geluiden ook nog omtrent het geluidsspectrum, het timbre en de veranderingen daarin. Dit blijkt volstrekt onvoldoende te zijn.

Bij het syndroom van Ménière wordt aangenomen dat de ziekelijke verandering in de cochlea gezeteld is. Bij drie patiënten lijdende aan deze ziekte werd de nauwkeurigheid van richtinghoren onderzocht bij een geluidsintensiteit van 50 dB boven de gehoordrempel. Het gehoorverlies was gemiddeld 40 dB en aan beide zijden ongeveer even groot tot 8000 Hz. De nauwkeurigheid van richtingschatten bij deze patiënten was dezelfde – zowel voor zuivere tonen als voor ruis – als bij patiënten met een geleidingsverlies van gelijke grootte. De recruitment, die bij deze afwijking bijna altijd bestaat, zou bij intensiteiten groter dan 50 dB teveel invloed krijgen, omdat hier de informatie bij vergroting van de intensiteit meer toenemen dan bij een geleidingsgestoord oor (zie Hoofdstuk IV). Bij zachte geluiden daarentegen werden de patiënten ge-

hinderd door het oorsuizen, dat het richtingbepalen bij steeds kleiner wordende intensiteit tenslotte onmogelijk maakte. Het oorsuizen is in dit intensiteitsgebied nog een extra hinderpaal voor het richtinghoren boven het gehoorverlies. Storingsgeruisen in de ruimte kunnen bij stereo-akoestische waarneming gedifferentieerd worden van het oorsuizen.

Wij waren in de gelegenheid twee patiënten, lijdende aan een neuritis van de nervus cochlearis of een onderbreking van de gehoorbanen, te onderzoeken. Bij één van deze patiënten (32 jaar oud) bestond een éénzijdig perceptieverlies van ongeveer 70 dB in de lage tonen tot circa 1000 Hz, daarboven overgaand in een normale gehoordrempel (zie Fig. 43).

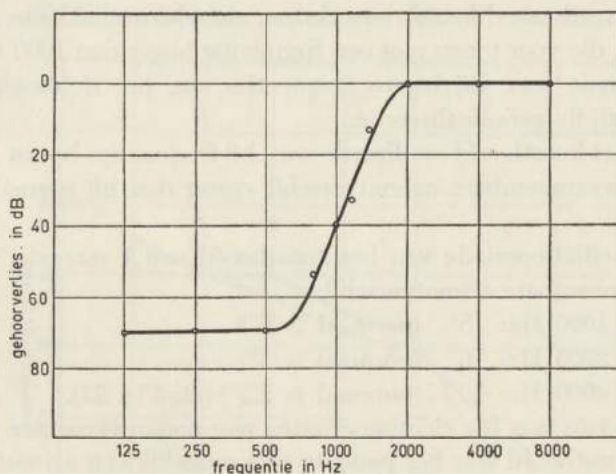


Fig. 43.

Audiogram met verlies van perceptie in de lage tonen.
De overgang heeft een steilte van 60 dB per octaaf.

In het linkergehoororgaan was een sterke „recruitment”. Het andere gehoororgaan was normaal. Er bestond een diplacusis tussen de twee oren. Acht jaar geleden had patiënte een trauma van het hoofd gehad. Korte tijd later ging de linkermondhoek hangen. Deze parese van de nervus facialis was progressief. De verlamming breidde zich over de gehele gelaatshelft uit. Twee en een half jaar geleden bemerkte zij, dat zij dubbelbeelden zag bij kijken naar links boven. Nu had zij sinds enkele maanden een gehoorverlies aan de linkerzijde. Er bestond geen hoofdpijn en geen oorsuizen. Zij was nooit duizelig.

Bij onderzoek bestond er een parese van de musculus obliquus inferior en van de linker nervus abducens, een perifere facialisparalyse met ont-

aardingsreacties van de spieren en atrofie van de linkergelaatshelft. Het slikken was moeilijk. Het sensorium was geheel normaal. De bloedsuikercurve was normaal. Röntgenologisch werden geen bijzonderheden aan de schedel en de rotsbeenderen gevonden. Het elektro-encefalogram vertoonde enige piekactiviteit van het delta- en het theta-ritme, tempopariëtaal in de linkerhemisfeer. Bij cupulometrisch onderzoek was alleen de drempel van het nystagmogram beiderzijds iets verhoogd. Overigens waren er geen bijzonderheden in de curven. Het calorigram volgens HALLPIKE vertoonde geen bijzonderheden. Een neurologische diagnose met nauwkeurige lokalisatie van de veranderingen kon niet gesteld worden.

Het stereo-akoestisch onderzoek, bij deze patiënte gedaan met zuivere tonen en een stilstaand hoofd, leverde een nauwkeurigheid van richtingbepaling op, die voor tonen met een frequentie hoger dan 1000 Hz gelijk aan de normale was. Bij lagere frequenties was het richtinghoren als van een éénzijdig geradicaliseerde.

Wanneer het kunsthoofd oscilleerde was, bij frequenties boven 1000 Hz, het kleinst waarneembare azimutverschil groter dan bij normale proefpersonen.

Bij een oscillatieperiode van het kunsthoofd van 1 seconde was het kleinst waarneembare azimutverschil:

bij 1000 Hz: 8° (normaal is 5°)

bij 2000 Hz: 12° (normaal is 3°)

bij 4000 Hz: 10° (normaal is $2,5^{\circ}$) (zie Fig. 23).

Met witte ruis was het richtingschatten nog onnauwkeuriger. Met een stilstaand kunsthoofd was het patiënte niet mogelijk een azimut van 20° (normaal 5°) aan weerszijden van het sagittaal vlak waar te nemen. Oscillaties van het kunsthoofd maakten de nauwkeurigheid kleiner. Variaties van 24° om azimut 0° (normaal is 3°) werden door patiënte niet waargenomen. Patiënte kon slechts met moeite bepalen uit welke richting een geluid kwam.

De grootste nauwkeurigheid van richtingschatten bestond bij langaangehouden, zuivere tonen. Het intensiteitsverschil tussen de gehoororganen was hier de informatie. Vergeleken met bovenstaand gehoorverlies van centrale oorsprong veroorzaakt een aandoening van het middenoor (geradicaliseerd oor) of van de cochlea (syndroom van Ménière) een veel geringere storing in het richtinghoren.

Op grond van het toonaudiogram moet men aannemen, dat de overdracht van de prikkels voor intensiteitswaarneming gelijk is aan die van een cochleaire hardhorendheid van dezelfde graad. Daar de nauwkeurigheid van richtinghoren in dit geval uitgesproken slechter is, mag men

aanemen, dat er een storing in de overdracht van de tijdrelatie bijgekomen is.

Een andere patiënte met een storing in het neurale transport was 28 jaar oud. Zij leed sinds twee maanden aan hoofdpijn, boven en vóór op het hoofd, spierpijnen in de nek, rug en knieën. Zij was suffig, maar onrustig in de slaap, licht in het hoofd en klaagde over duizeligheid zonder draaisensatie. Haar gemoedsstemming was prikkelbaar, het sensorium normaal. Bij neurologisch en intern onderzoek werd alleen een vasolabiliteit als afwijking gevonden. De diagnose werd gesteld op encefalitis veroorzaakt door een niet gedefinieerd virus. Op oorheelkundig gebied werd aan beide gehoororganen een gemengde hardhorendheid gevonden (zie Fig. 44). Bij vestibulair onderzoek werden geen afwijkingen ge-

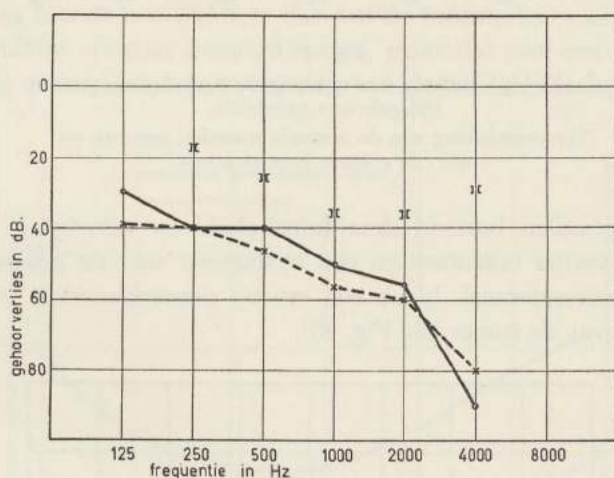


Fig. 44.
Audiogram van een patiënt lijdende aan encefalitis.

vonden. Bij het stereo-akoestisch onderzoek met zuivere tonen had patiënte grote moeilijkheden met het bepalen van de richting, waaruit een geluid kwam. Voor trillingen van alle frequenties was de nauwkeurigheid verminderd. Met ruis waren de schattingen wel beter, maar toch minder goed dan verwacht mocht worden bij een gehoorverlies zoals zij dat had. Juist in het gebied om azimut 0° was de nauwkeurigheid van richtingschatten het sterkst gestoord (zie Fig. 45).

Bij vier patiënten met een bruggehoektumor kon een stereo-akoestisch onderzoek gedaan worden. De neurologische diagnose stond vast en in twee gevallen werd een tumor operatief verwijderd.

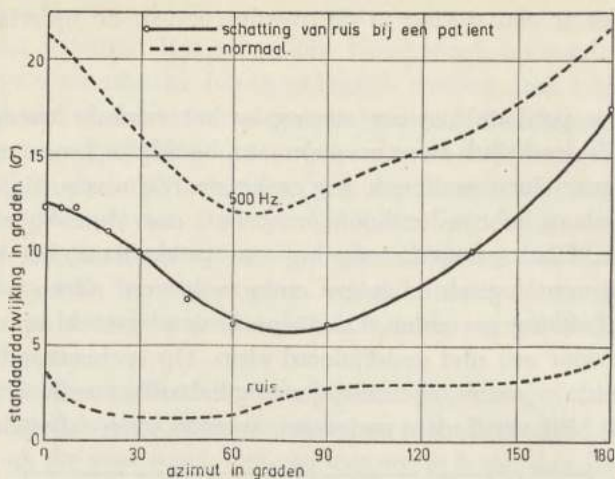


Fig. 45.

Gemiddelde afwijking van richtingschatten van een patiënt lijdende aan encefalitis

Ter vergelijking zijn de normale waarden met ruis en met een zuivere toon gegeven.

In deze gevallen bestond draaiduizeligheid en valneiging naar de zieke zijde, verder oorsuizen en een nystagmus naar de gezonde zijde. Bij het gehooronderzoek bleek een ernstig perceptieverlies te bestaan aan de zijde van de tumor (zie Fig. 46).

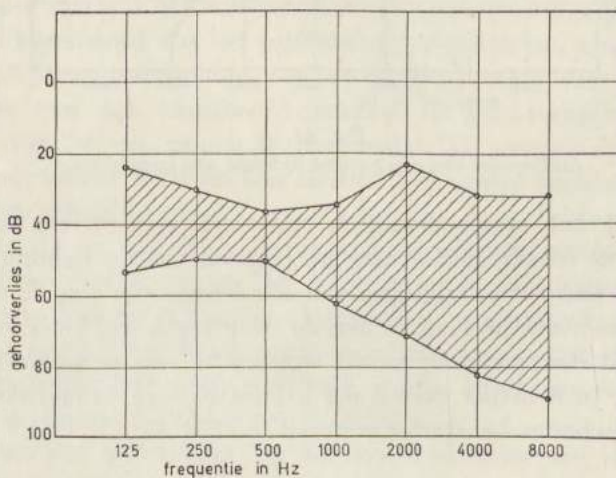


Fig. 46.

De gehoorverliezen van vier patiënten met een acusticustumor liggen in het gearceerde gebied.

Bij vestibulair onderzoek bleek, dat het systeem van de halfcirkelvormige kanalen verminderd prikkelbaar of totaal uitgevallen was aan die zijde. Het stereo-akoestisch onderzoek toonde aan, dat in deze gevallen de nauwkeurigheid van richtingschatten met zuivere tonen dezelfde was als bij patiënten met een even groot geleidingsverlies (zie Fig. 36). Indien het intensiteitsverlies gecorrigeerd kon worden, was er geen significant verschil met een normaalhorende (zie Fig. 36a, stippellijn en Fig. 40).

De bepalingen gedaan met een witte ruis lieten een nauwkeurigheid van richtingschatten zien, gelijk aan die bij een patiënt met een even grote geleidingsstoornis (zie Fig. 47).

Ook bij oscillerend kunsthoofd waren de uitkomsten gelijk aan die van geleidingsgestoorden.

Men mag hieruit concluderen, dat wel de toonsterkte-waarneming en het vestibulaire systeem gestoord waren, maar dat met een aangepaste versterking een nauwkeurige schatting van de richting heel goed mogelijk was.

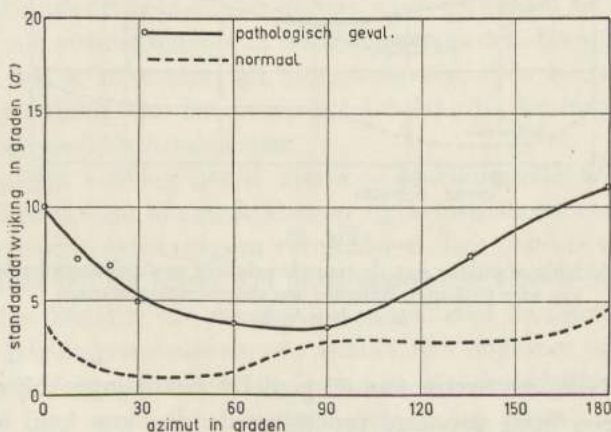


Fig. 47.

Gemiddelde afwijking van de nauwkeurigheid van richtingschatten met ruis bij vier patiënten met een brughoektumor.

Om te kunnen nagaan of er een verband bestaat tussen medullaire aandoeningen en richtinghoren werden vier patiënten, lijdende aan syringobulbie onderzocht op hun vermogen om richting te horen. Bij één van hen was het gehoor aan één zijde totaal uitgevallen, daarom zal hij hier niet verder vermeld worden.

Patiënt X was een man van 45 jaar. De diagnose syringobulbie kon zonder terughoudendheid gesteld worden op grond van de vele neurolo-

gische bevindingen. Hij bezat een gehoorfunctie, welke beiderzijds normaal was voor de conversatiespraak, terwijl op het toonaudiogram een gemiddeld verlies aan beide zijden van 20 dB bestond. Bij vestibulair onderzoek werden geen afwijkingen gevonden. Het stereo-akoestisch onderzoek leverde op, dat het richtinghoren met zuivere tonen normaal was, maar dat de nauwkeurigheid van richtingschatten met ruis sterk verminderd was. De nauwkeurigheid hiermede was niet beter dan het richtinghoren met zuivere tonen in de frequenties omstreeks 4000 Hz (zie Fig. 48).

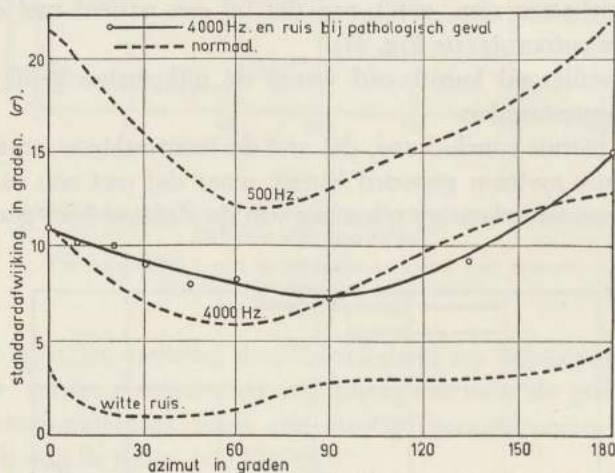


Fig. 48.

Gemiddelde afwijking van de nauwkeurigheid van richtingschatten van vier patiënten lijdende aan degeneratieprocessen in de hersenstam.

Patiënt Y was een vrouw van 39 jaar. De bevindingen bij onderzoek wezen op een hoog cervicaal proces en de diagnose kon met grote waarschijnlijkheid gesteld worden op syringobulbie.

Er bestonden geen vestibulaire afwijkingen. De gehoorfunctie voor zuivere tonen was geheel ongestoord (audiogram met de gehoordrempel op de nullijn). Bij stereo-akoestisch onderzoek vonden wij, dat ook bij deze patiënt de nauwkeurigheid van richtinghoren met zuivere tonen gelijk aan het normale was. Maar bij ruis was de nauwkeurigheid verminderd en ongeveer gelijk aan die voor zuivere tonen van hoge frequentie (zie Fig. 48).

Patiënt Z was een man van 50 jaar. De diagnose syringobulbie was op grond van de neurologische verschijnselen zeer waarschijnlijk. Het vestibulair onderzoek en het onderzoek voor zuivere tonen aan de gehoor-

drempel leverde geen enkele afwijking op. Bij stereo-akoestisch onderzoek waren de bevindingen wederom als bij de twee vorige patiënten.

Geen van de patiënten kon verschil horen tussen een sinusvormige intensiteitsmodulatie en een stereo-akoestische waarneming met oscillerend kunsthofd.

DISCUSSIE

De uitkomsten van de proeven met pathologische gehoororganen en hun verbindingen kan men op de volgende wijze samenvatten.

Bij het stereo-akoestisch onderzoek blijkt, dat de nauwkeurigheid van richtinghoren bij otitis media onafhankelijk is van het feit of de middenoren met vocht gevuld zijn, of dat er een „droge” middenooraandoening al of niet met perforaties bestaat. Bij een geleidingsverlies van omstreeks 30 dB en meer is richtinghoren met zuivere tonen onmogelijk, met ruis ongestoord. Dit is in overeenstemming met de proeven uit het vorige hoofdstuk, waarbij intensiteitsverschillen opzettelijk aangebracht werden.

Tweezijdig gelijkvormige geleidingshardhorenden met een verlies van minder dan 45 dB hebben een grotere nauwkeurigheid bij het richtingschatten van zuivere tonen dan éénzijdig gestoorden. De verklaring hiervoor is, dat de informatie uit intensiteitsverschillen en faseverschillen niet meer strijdig zijn. Dit is van groot belang bij keuringen en bij gehoorverbeterende behandelingen.

Bewegingen van het hoofd zijn voor éénzijdig geleidingsgestoorden van betekenis, want hiermede kunnen zij de intensiteitsoverheersing van het ongestoorde gehoororgaan verminderen door gebruik te maken van de diffractie om het hoofd. Dit geeft verruiming van de informatie.

Voor het bepalen van de richting van allerlei kwaliteiten ruis zijn zuivere geleidingsstoornissen van minder dan ongeveer 45 dB van geringe invloed op de nauwkeurigheid van richtingschatten. Aangezien spraak in feite een ruis is, die steeds wisselt van samenstelling, hebben patiënten met een dergelijk geleidingsverlies weinig moeite om te bepalen waar de spreker zich bevindt. Bij grote intensiteitsverschillen wordt de lateralisatie overheersend, maar de sensatie van ruimtelijkheid en de mogelijkheid om richting te horen blijven desondanks behouden door het tijdsverschil in de cochleae en door een verschil in spectrale energieverdeling. Voor het richtingbepalen is het faseverschil tussen de cochleae, tengevolge van het feit, dat de trilling aan één zijde het ronde venster bij afwezigheid van de rest van een middenoorsysteem binnenkomt, niet van betekenis voor het richtingbepalen. De patiënt heeft zich hieraan klaarblijkelijk aangepast. De wisselende interaurale faseverschillen zijn wel van belang.

Een éézijdig dove moet de geluidsbron in de ruimte lokaliseren aan de hand van een timbre, dat hem bekend is, en de veranderingen daarin, hetgeen dus voornamelijk neerkomt op een simultane frequentie-analyse. De nauwkeurigheid hiervan is veel geringer dan een interauraal waarneembaar verschil, namelijk 10 % van de frequentie ten opzichte van 2 ‰ (zie Hoofdstuk IV). De aandoeningen van het orgaan van Corti hebben geen andere betekenis voor het horen dan die van een filter. De uitkomsten van het richtinghoren in deze gevallen zijn equivalent aan die van geleidingsgestoorden.

Bij aandoeningen van de medulla echter kan het ruimtelijk horen sterk gestoord zijn. De correlatieve functie tussen de informaties van rechter en linker cochlea is daarbij gedeeltelijk of geheel verloren gegaan. Zo zijn er in gevallen van syringobulbie geen of zeer geringe verliezen in de waarneming van zuivere tonen. Bij stereo-akoestisch onderzoek worden de zuivere tonen op dezelfde wijze gelokaliseerd als bij normaalhorenden. Maar met ruis is de nauwkeurigheid van richtingschatten aanzienlijk verminderd. Dit is in tegenstelling tot de nauwkeurigheid van schatting bij normaalhorenden en bij stoornissen in het gehoororgaan perifeer van de hersenstam.

Wij trekken hieruit de conclusie, dat de informatie, welke een ruis wel en zuivere tonen niet kunnen geven — de tijdrelatie —, voor patiënten met syringobulbie verloren is gegaan en daarmee een deel van hun vermogen tot richtinghoren. De storing in het richtinghoren is onafhankelijk van de waarneming van frequentie en intensiteit.

Bij patiënten met aandoeningen, waarbij de hersensubstantie meer uitgebreid is aangetast, zoals b.v. bij arteriosclerose of multipele sclerose, loopt de onderzoeker steeds het gevaar, dat het kenbaar maken van het waargenomene door de proefpersoon onzuiver is om andere redenen dan door tekortkomingen van de gehoorzin. De aanwijzingen van de patiënten zijn vaag en niet reproduceerbaar.

Om deze reden zijn de uitkomsten van experimenten bij dergelijke patiënten niet in dit proefschrift verwerkt.

HOOFDSTUK VII

SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Aan de hand van hetgeen reeds bekend is omtrent de monaurale waarneming van frequentie, intensiteit, fase en tijdrelatie van geluids-trillingen werd nagegaan in hoeverre deze analyses bruikbaar en noodzakelijk zijn om tot een akoestisch ruimtelijke indruk van de „wereld” rondom het individu te kunnen komen.

Er werd een proefopstelling gemaakt, waarbij de samenstelling van het geluid zoals dit elk van de twee cochleae binnenkomt, kwalitatief en quantitatief geregeld kon worden. Hiermede werd bepaald in welke mate iedere parameter van de trilling afzonderlijk bijdraagt tot het ruimtelijk horen. Met nadruk wordt erop gewezen, dat ruimtelijk horen verschillend is van binauraal horen zonder ruimtelijke dimensies: het lateraliseren. Hierbij geven intensiteitsverschillen wel een verschuiving naar links of rechts van de grootste luidheid, maar een ruimtelijke lokalisatie wordt er niet aan toegekend.

Het ruimtelijk horen bestaat uit:

- a) het richtinghoren
- b) het afstandhoren.

Voor het richtinghoren bleek de tijdrelatie van een trilling aan de linker- en rechterstapesplaat de meest belangrijke parameter te zijn. Bij zuivere tonen, waar de tijdrelatie niet aanwezig is, is het richtinghoren gebrekkig. Dit is dan afhankelijk van het waarnemen van faseverschil. De hoge tonen in het geluidsspectrum vormen, in verband met de functie van de oorschelpen, een belangrijke bijdrage voor de waardering of een geluidsbron vóór of achter de ooras gelegen is. Verder draagt de diffractie om het hoofd bij tot een richtingbepaling. Enerzijds is de functie van iedere cochlea afzonderlijk zeer onafhankelijk (analyse), anderszijds zijn zij centraal zeer nauw gecorreleerd (ruimtelijk horen).

Voor het afstandhoren is, behalve een goed onderscheidingsvermogen voor het bepalen van de verschillen tussen de richtingen van de rechtstreekse en gereflecteerde geluidstrillingen, ook een goed onderscheidingsvermogen voor de tijdrelatie van die trillingen nodig. Bovendien is een monaurale, successieve discriminatie van het intensiteitsverschil tussen rechtstreekse en gereflecteerde geluidstrillingen vereist.

Aangezien de kleine tijdsverschillen tussen twee trillingen behouden blijven tijdens het neurale transport in het eerste neuron, hebben de momenten van aankomst van de actiespanning in de akoestische kernen hetzelfde tijdsverschil als de geluidsimpulsen aan de trommelvliezen (zie Hoofdstuk IV).

Daar voor dieren met een korte intercochleaire afstand door de lucht (b.v. een veldmuis) of voor waterdieren met een korte transcefale afstand (b.v. de dolfijn) het tijdsverschil zeer gering is, zou onderzocht moeten worden of het discriminatievermogen voor tijdsverschillen bij deze dieren groter is dan bij mensen bij gelijk vermogen tot richtinghoren, of dat het richtinghoren minder goed is dan bij mensen.

Voor bewegende geluidsbronnen is de richtingwaarneming gevoeliger dan voor stilstaande. Dit moet een diep gewortelde neurofysiologische oorsprong hebben. In de natuur is het stilstaande in de zin van gevaar van minder belang dan het bewegende. Aan constante geluiden went men, maar ten opzichte van een steeds wisselend geluid blijft men waakzaam. Ook de beweging van objecten, welke geluiden reflecteren, vraagt onze aandacht. De nauwkeurigheid waarmee de richting van een bewegend voorwerp bepaald wordt is ruim twee maal zo groot als voor stilstaande geluidsbronnen.

De hypothese, dat in de medulla bij het eerste samenkomen van gehoorbanen uit linker- en rechteroor een gebied ligt (het corpus trapezoidum), waar de correlatie van de prikkels uit de twee oren plaats heeft, is bevestigd door de proefnemingen bij patiënten lijdende aan syringobulbi, waarbij het richtinghoren ernstig faalde of verloren was gegaan. In de stam wordt de grondslag voor de stereo-akoestische waarneming gelegd.

Verstoring van de toonperceptie behoeft geen verlies van stereo-akoësie ten gevolge te hebben. Omgekeerd gaat een gebrekkige stereo-akoësie niet altijd samen met een vermindering van de toonperceptie.

De tijdsverschillen tussen de cochleae, welke als richting geïnterpreteerd worden, liggen tussen 30 en 600 μ sec. De onderste grens — 30 μ sec. — is ongeveer 3% van de gemiddelde tijd benodigd voor het passeren van één synapse (zie Hoofdstuk IV). Het passeren van meer dan één synapse zou de nauwkeurigheid van de tijdsverschil-overdracht in gevaar brengen. De ruimtelijke lokalisatie is dus in de medulla bij de eerste synapse vastgelegd en wordt vanuit dat punt naar de reflexcentra en naar de cortex cerebri gevoerd. Dit moet een ander neuronensysteem zijn dan dat, hetwelk de toon- en spraakanalyse overbrengt. Dit vindt steun in de fylogenetische ontwikkeling van het gehoorzintuig. De waarneming uit welke richting een trilling komt is fylogenetisch ouder dan

de toonherkenning. De vis bijvoorbeeld kan met behulp van het zijlijnorgaan adequaat reageren op trillingen van een geluidsbron, hoewel er geen cochlea bestaat. Bij de hogere dieren ontwikkelde zich een cochlea met een toonperceptie. Bij de mens bood de toonanalyse van de cochlea in samenwerking met de cortex een gelegenheid tot de ontwikkeling van spraak. De opvatting, dat het ruimtelijk horen langs een ander neuronensysteem gaat, vindt ook steun in gevallen van stoornissen in de stam, waarbij het richtinghoren verminderd is, maar de toonperceptie ongestoord.

Het is bekend, dat met ruimtelijk horen een signaal van geringe intensiteit kan worden waargenomen naast een ruis, terwijl hetzelfde signaal temidden van die ruis monauraal niet waarneembaar is; ook niet, indien het binauraal maar niet stereo-akoestisch wordt gegeven. Het onderscheiden van signaal en ruis is gemakkelijker naarmate hun oorsprong verder uit elkaar ligt.

Het heeft voordeel de gehoorfunctie van de afzonderlijke organen zodanig bij elkaar aan te passen, dat een goede stereo-akoestische functie bereikt wordt. Bij dit stereo-akoestisch horen elimineert het centraal zenuwstelsel de resonantiepieken en de achtergrondruisen, welke bij monauraal horen sterk kunnen storen. Ruimtelijk horen is een manier van horen, welke belangrijk meer informatie aan de waarnemer geeft dan twee maal monauraal horen. Dit is van belang om verbetering van het gehoor te verkrijgen door middel van operaties en prothesen. De gebruikelijke monaurale proeven om de gehoorfunctie te onderzoeken leiden tot het gevaar dat de bijdrage van de stereo-akoësie tot betere herkenning van de geboden signalen niet wordt gezien. Het is bekend, dat de gehoordrempels van centrale oorsprong zijn en dat de perifere gehoororganen een werkingssfeer bezitten, welke veel lager reikt dan deze drempels. Het centrale zenuwstelsel vormt dus de beperkende factor bij drempelmetingen. De nauwkeurigheid van waarneming neemt toe, wanneer men van monaurale op binaurale presentatie overgaat, terwijl de totale intensiteit gelijk blijft. De wederzijdse confrontatie van de activiteiten in de cochleaire projecties in het centraal zenuwstelsel is van gunstige invloed op de nauwkeurigheid. Bij simultane presentatie van geluiden afkomstig van ruimtelijk verschillende bronnen, is de herkenning nog nauwkeuriger; in het geval van spraak is dan de verstaanbaarheid vele malen groter dan monauraal. Deze laatste facet, boven reeds vermeld, tezamen met de hier genoemde eigenschappen, tonen aan, dat de hoorcapaciteiten van de twee organen afzonderlijk vele malen minder zijn, dan de gezamenlijke capaciteit. De mogelijkheden van deze reciproke inwerking in het cerebrum zijn nog niet volledig

bekend, maar wij weten nu reeds genoeg, om te kunnen stellen, dat men met de resultaten van de gebruikelijke monaurale onderzoekmethoden niet bij machte is een beslissend oordeel over de gehoorfunctie als een geheel te geven zonder hierin het onderzoek van het vermogen tot ruimtelijk horen te betrekken. De bestaande hoortheorieën zullen in overeenstemming gebracht moeten worden met de bevindingen van het stereo-akoestische horen. De richtingwaarneming geschiedt met een nauwkeurigheid, welke toeneemt met de beweging van de geluidsbron. Uit de oscillatieproeven met het kunsthoofd blijkt, dat het optimum spoedig bereikt is en wel even boven een oscillatiefrequentie van 2 Hz. Dit komt neer op een hoeksnelheid van de geluidsbron ten opzichte van de waarnemer van ongeveer 1 rad/sec.; dit is gebaseerd op een amplitude van 8° van het kunsthoofd. De fysiologische hoeksnelheden van het hoofd liggen in het gebied van ongeveer 1 rad/sec., zodat de verfiijningsmogelijkheid tot richtingbepaling geheel uitgebuit kan worden.

De vestibulaire organen lichten ons in aangaande onze stand in en de rotaties die wij ondergaan ten opzichte van het inertiaal systeem, dat ons omringt. De gehoororganen lichten ons ook in of er een relatieve beweging bestaat van ons ten opzichte van datzelfde inertiaal systeem. Het is belangrijk om te constateren, dat beide orgaantypen, ieder op hun wijze, een relatieve beweging aan ons verraden. Beiden dragen zij bij tot onze oriëntatie ten opzichte van onze omgeving. Zolang er geen conflict in de informaties bestaat, zal het richtinghoren als een zelfstandig verschijnsel getoetst kunnen worden.

Brengt men opzettelijk een storing aan in het vestibulaire systeem, bijvoorbeeld door een draai-impuls, zoals deze in de cupulometrie gebruikt wordt, dan wordt een conflict geschapen. De sensatie van rond-draaien is zoveel sterker dan de auditieve richtingsensatie ten opzichte van een stilstaande geluidsbron, dat deze laatste schijnbaar meebeweegt. Dit is de „audiogyral illusion” beschreven door GRAYBRIEL. Het verschijnsel is kwalitatief bekend. Het verdient aanbeveling om dit nu ook kwantitatief na te gaan en in pathologische gevallen te toetsen. Het is niet onmogelijk, dat er meer gegevens over de centrale verwerking van de diverse prikkelgroepen aan ontleend kunnen worden.

Met de beschreven proefopstelling is het mogelijk in de kliniek op eenvoudige wijze proeven uit te voeren met stilstaand en oscillerend kunsthoofd.

Voor ruimtelijk horen moet een keuringsnorm opgesteld worden, omdat deze functie een proef is voor het gehoorzintuig in zijn geheel en als zodanig een maatstaf voor het gehoor van de keurling. Een bekend signaal zou bijvoorbeeld uit een maskerende ruis herkend moeten wor-

den bij een bepaalde ruimtelijke spreiding van de twee geluidsbronnen. Dit is een functieproef, welke met de werkelijkheid overeenkomt.

Verder zou de opstelling kunnen dienen als een 'malingerer detector' in die gevallen, waar een onderzochte niet weet hoe hij in pathologische gevallen op stereo-akoestische informaties moet reageren.

In de toekomst zal de ruimtelijke weergave van het geluid als equivalent van het ruimtelijk zien veld gaan winnen. De pseudo-stereo-akoësie met vele luidsprekers en intensiteitseffecten zal hiervoor plaats maken.

De conclusies, welke wij uit onze bevindingen trekken, zijn:

- 1) De voornaamste informatie voor het ruimtelijk horen is de tijdrelatie van de trillingen in de beide cochleae. De stereo-akoësie is afhankelijk van het analyserend vermogen van elk der organen afzonderlijk en van de onderlinge relatie van de centrale projectie van de cochleae.
- 2) Ruimtelijk horen is afhankelijk van de correlatie der acusticusvezels in het corpus trapezoïdeum.
- 3) Het stereo-akoestisch onderzoek kan informatie geven bij aandoeningen van de medulla oblongata.
- 4) Het ruimtelijk horen geeft de waarnemer belangrijk meer informatie dan tweemaal monauraal horen.
- 5) De gebruikelijke monaurale proeven om de gehoorfunctie te bepalen zonder de stereo-akoësie hierin te betrekken zijn onvoldoende en kunnen misleidend zijn.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

Based on what is already known about the monaural perception of frequency, intensity, phase and time relation of sound vibrations, it was studied to which degree these analyses were suitable and necessary to arrive at a stereo-acoustic impression of the 'world' around the individual.

Experiments were set up in which the composition of the sound — as it enters each of the two cochleae — could be regulated both qualitatively and quantitatively. By means of this experimental arrangement, the share every individual parameter of the vibration had in the stereo-acoustic hearing was determined. It is emphasized that stereo-acoustic differs from binaural hearing without spatial dimensions: the lateralization. In the latter case differences in intensity indeed cause a shift of the greatest loudness towards the right or left, but without a spatial localization being attached to it.

Stereo-acoustic perception consists of:

- (a) the hearing of direction, and
- (b) the hearing of distance.

For directional hearing the time relation of a vibration at left and right stapedial plate proved to be the most important parameter. Hearing of direction is defective for pure tones, as there is no time relation, directional hearing then being dependent on the perception of phase differences. In connection with the function of the pinnae, the high tones in the sound spectrum form an important contribution to the decision whether a sound source is localized in front of or behind the axis through the ears. The diffraction around the head also contributes to a determination of direction.

Hearing of distance requires, apart from a good capability of distinguishing the differences between the directions of the direct and reflected sound vibrations, also a good capability of distinguishing the time relations of these vibrations. A further requirement is a monaural, successive discrimination of the intensity difference between direct and reflected sound vibrations.

As the small differences in time between two vibrations are preserved during the neural transport in the first neuron, the moments of arrival of the action potentials in the acoustic nuclei have the same difference

in time as the sound impulses at the eardrums (see Chapter IV).

The time difference being very small for animals with a short inter-cochlear distance through the air (e.g., the field mouse) or for aquatic animals with a short transephalic distance (e.g., the porpoise), it is desirable to investigate whether the ability of discriminating time differences in these animals is greater than in persons with equal ability of hearing direction, or whether their directional hearing is less good than in man.

For moving sound emitters the directional perception is more sensitive than for stationary sound sources. This must have a deeply rooted neuro-physiological cause. In Nature, stationary objects are of less importance as a potential danger than moving ones. One gets accustomed to constant sounds, but an ever changing sound calls for persistent alertness. Movement of objects which reflect sounds, also asks our attention as they must be considered as sound sources themselves. The accuracy with which the direction of a moving object is determined is *more* than twice that for stationary sound sources.

The hypothesis that at the first junction of auditory tracts from right and left ear in the medulla there is an area (the trapezoid body) where the correlation of the stimuli from the two ears takes place, has been confirmed by the experiments on patients suffering from syringobulbia, in whom the capacity of hearing direction failed badly or had been lost altogether. The basis for the stereo-acoustic perception is laid in the brainstem.

Disturbance of the tone perception need not lead to a loss of stereo-acousis. Conversely, a poor stereo-acousis is not always associated with a decrease of tone perception.

The differences in time between the cochleae, interpreted as direction, lie between 30 and 600 μ sec. The lower limit — 30 μ sec. — forms about 3 % of the average time needed for passing one synapse (see Chapter IV). The passage of more than one synapse would endanger the accuracy of the transmission of time differences. The spatial localization, therefore, takes place in the medulla near the first synapse, and is transmitted from this site to the reflex centres and the cerebral cortex. This must be another neuron system than that which transmits the tone and speech analysis. This finds support in the phylogenetic development of the organ of hearing. The perception of the direction from which a vibration arrives is phylogenetically older than the recognition of tones. The fish, for example, is able to react adequately to vibrations engendered by a sound source, by means of his side-line organ, although there is no cochlea. In the higher animals a cochlea developed, with tone per-

ception. In man the analysis of tones by the cochlea, in cooperation with the cortex, led to the development of speech.

The conception that stereo-acoustic hearing is effected via another neuron system is also substantiated by the fact that there are cases with disturbances in the brainstem in which directional hearing is decreased but tone perception unaffected.

It is a well-known fact that, by means of stereo-acoustic hearing, a signal of low intensity can be perceived, beside a noise, while the same signal within this noise is imperceptible on monaural hearing; neither is it perceptible when it is given binaurally but not stereo-acoustically. The discrimination of signal and noise is easier the greater the distance between their sources.

It is advantageous to adapt the auditory functions of the separate organs in such a way to each other, that a good stereo-acoustic function is obtained. In this stereo-acoustic hearing the central nervous system eliminates the resonance peaks and the background noises which in monaural hearing may form a great disturbance. Stereo-acoustic hearing is a manner of hearing which supplies the observer with considerably more information than twice monaural hearing does. This is of importance for obtaining improvement of hearing by means of operations and prostheses. The usual monaural auditory function tests involve the danger of failing to appreciate the contribution of stereo-acoustics to a better recognition of the signals offered. It is known that the auditory thresholds are of central origin, and that the peripheral auditory organs possess an action range reaching much lower than these thresholds. The central nervous system is therefore the limiting factor in the threshold measurements. The accuracy of perception increases when one changes from monaural to binaural presentation, while the total intensity remains the same. The reciprocal confrontation of the activities in the cochlear projections in the central nervous system has a favourable influence on the accuracy. When sounds originating from sources with a different spatial localization are simultaneously presented, the recognition is even more accurate and, in the case of speech, the intelligibility is many times better than on monaural presentation. The latter aspect, together with the properties mentioned here, prove that the auditory capacities of the two organs separately are many times less than the combined capacity. The possibilities of this reciprocal interaction in the cerebrum are not yet completely known, but even now we know already enough to contend that it is impossible to give, by means of the usual monaural tests, a decisive judgment on the total hearing function without carrying out an examination of the capacity of stereo-acoustic hearing. The existing

theories of hearing will have to be made consistent with the findings in stereo-acoustic hearing.

The perception of direction has an accuracy increasing with the speed with which the sound source moves. Oscillation experiments with the artificial head show that the optimum is soon reached, viz. just above an oscillation frequency of 2 c.p.s. This means an angular velocity of the sound emitter of about 1 rad/sec. with respect to the observer; this is based on an amplitude of 8° of the artificial head. The physiological angular velocities of the head are in the range of about 1 rad/sec., which means that the possibilities of arriving at a finer determination of direction are completely utilized.

The vestibular organs give us information regarding our position in, and the rotations we are undergoing with respect to, the inertial system which surrounds us. The hearing organs also tell us whether we are in relative movement with respect to the same inertial system. It is an important fact that both organ types, each in its own way, inform us about a relative movement. Both contribute to our orientation with regard to our surroundings. So long as there are no conflicting informations directional hearing can be tested as an independent manifestation. Such a conflict situation arises when we intentionally cause a disturbance in the vestibular system, for example by a rotatory impulse like those used in cupulometry. The sensation of rotation is so much stronger than the auditory directional sensation with respect to a stationary sound source, that the latter seems to move with the test person. This is the 'audiogyral illusion' as described by GRAYBRIEL. The phenomenon is qualitatively known. It deserves recommendation to study it also quantitatively and to test it in pathological cases. It may be possible that more data on the central elaboration of the various impulse groups can be derived from it.

The experimental arrangement described enables us to carry out fairly simple clinical tests with a stationary and oscillating artificial head.

A criterion must be evolved for stereo-acoustic hearing examinations, because this function serves as a test for the organ of hearing as a whole, constituting as such a criterion for the hearing of the person examined. Such a test might be the recognition of a known signal from a masking noise, with a given spatial localization of the two sound emitters. This is a function test which corresponds with real situations.

This arrangement might also serve as a malingering detector in the cases in which a person under examination does not know how to react to stereo-acoustic informations in pathological cases.

In future the stereophonic reproduction of sound will gain ground as an equivalent of stereoscopic vision.

Our findings led to the following conclusions:

(1) The most important information for stereo-acoustic perception is the time relation of the vibrations in the two cochleae. Stereo-acousis depends on the analytic power of each of the organs separately and on the reciprocal relation of the central projections of the cochleae.

(2) Stereo-acousis depends on the correlation of the VIIIth nerve fibres in the trapezoid body.

(3) A stereo-acoustic examination may give informations in disorders of the medulla oblongata.

(4) Stereo-acousis gives the observer considerably more information than twice monaural hearing.

(5) The usual monaural tests to determine the auditory function without involving stereo-acousis in them, are insufficient and may be misleading.

ADDENDUM

Gebruikte apparatuur:

De sinusoidale trillingen werden geproduceerd door een Pedersen audiometer, type 8222C-52, de „witte ruis” door een ruisgenerator van Peekel: Random white noise generator 20-2000 c/s, type R230.

In bepaalde gevallen werd deze „witte ruis” gefilterd met behulp van een octaafbandfilter van Rhode en Schwarz (München), type P.B.O. B.N. 4920.

De elektronische trillingen werden omgezet en uitgezonden door een luidspreker, Philips 7,5 Ω , diam. 25 cm, welke in de geluidarme kelder van de Oorheelkundige Afdeling te Utrecht (gemiddeld geluidsniveau minder dan 12 dB) was opgehangen. Deze kelder is langs de wanden en het plafond bekleed met glaswol en voorzien van ruim plooierende gordijnen. De vloer is bedekt met dikke kokosmatten. Dank zij deze voorzieningen zijn reflecties tot een minimum teruggebracht.

Een andere serie proeven werd op een hoog gelegen dak in de open lucht uitgevoerd. Hierbij werd echter veel hinder ondervonden van de wind, die langs de kunstmatige oorschelpen streek. Deze proefopstelling werd om deze reden opgegeven, alhoewel op het dak bij de proeven met zuivere tonen geen staande golven ontstonden. Het achtergrondgeruis was gering in vergelijking met de proeftoon. Bij de proeven met een stilstaand kunsthoofd is het achtergrondgeruis niet van belang.

Het geluid werd opgevangen door een kunsthoofd, dat in het midden van een gespannen torsiedraad was bevestigd. De grootte van het kunsthoofd kwam overeen met die van een menselijk hoofd. De hardheid van de oppervlakte (q c-waarde) was echter groter dan die van het menselijk hoofd. Het kunsthoofd was opgebouwd uit hout en zink. Het model was ovaal-cylindervormig. In het kunsthoofd waren geïsoleerd van elkaar twee microfoons van groot frequentiebereik (Philips, type EL 6020) bevestigd. Op zich zelf waren deze van het „non-directional” type. De kunstmatige oorschelp en de gehoorgang veroorzaakte de richtingsfrequentie. Iedere microfoon was met een versterkingsapparatuur verbonden. De versterkingsapparaten waren twee identieke versterkers van de firma Wearite, welke ook verbonden waren met de magnetische koppen van een bandopnemer van dezelfde firma (simultaneous double-channel tape-recorder, Wright and Weaire Ltd., England). De gelijk-

vormigheid van de karakteristieken van de versterkers is gecontroleerd.

De twee magnetische koppen waren 44 mm uit elkaar geplaatst en hiertussen was ruimte om de band uit zijn normale baan te bewegen. De bandlengte tussen de twee koppen kon op deze manier vergroot worden.

Op de uitgangsaansluitingen van de versterker waren hoofdtelefoons aangesloten. De hoofdtelefoons (moving-coil, electrodynamic earphones) sloten goed af (inhoud 6 cc), maar er werd zorgvuldig voor gewaakt, dat er geen beengeleidingscomponent was. Hiertoe werd watten tussen de telefoons en de jukbogen gedaan. De ooras dient door het midden van de telefoonmembranen te gaan in verband met de hoge tonen. De juiste plaats is te vinden door de telefoons te verschuiven, totdat een geproduceerde hoge toon een maximum aan luidheid krijgt.

Luidsprekers aan de wand werden na proefnemingen afgeschaft, omdat zij een onwerkelijke geluids aanpassing opleverden.

De karakteristiek van intensiteits-overdracht in dit hele systeem („overall” karakteristiek) werd gemeten met een „level-recorder” van Bruël en Kjaer, type 2311 (zie Fig. 49).

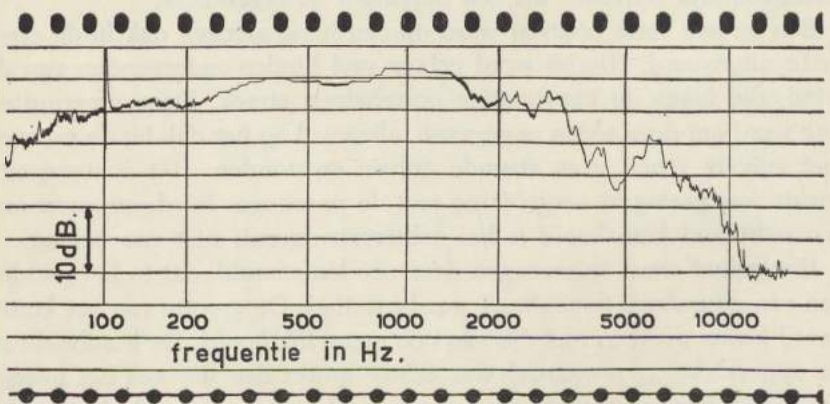


Fig. 49.

„Overall”-karakteristiek van ieder geluidskanaal van microfoon tot en met telefoon.

De oorschelpwerking van het kunsthoofd was alleszins redelijk, omdat de sensatie „achter” zelden genoemd werd. De waarden, waarbij „overhoord” werd, waren dezelfde als bij het menselijke hoofd.

De geluidsoptnamen werden zodanig gemaakt, dat de trillingen met de rechtermicrofoon opgevangen, vastgelegd werden op de ene helft van de

magnetische band, en die welke opgevangen werden met de linker-microfoon, op de andere helft.

Het „overspreken” bij het afspelen van de opnamen, dat wil zeggen het verschijnsel, dat een afname-kop toch signalen van de andere band-helft weergaf, moest minimaal zijn. Het diende minstens 30 dB zwakker te zijn dan de primaire opname. Dit is voldoende om intensiteitsverschillen ten gevolge van diffractie om het hoofd getrouw te kunnen weer-geven.

LITERATUUR

- ADES, H. W. en BROOKHART, J. M. The central auditory pathway.
J. Neurophysiol. 13, (1950), 187—205.
- ADES, H. W. Midbrain auditory mechanisms in cats.
J. Neurophysiol. 7, (1944), 415—424.
- ALEXANDER, G. en MARBURG, O. Handbuch der Neurologie des Ohres, deel III, 1926 en II, 1924.
Urban und Schwarzenberg, Berlin.
- ARIËNS KAPPERS, C. U. et al. The comparative anatomy of the nervous system of vertebrates, including man.
MacMillan Company, vol. I, 1936.
- ARKIN, H. en COLTON, R. Statistical methods (σ -deviation).
Barnes and Noble, New York (1953).
- BALLIN, M. J. Politzer's disease of the ear.
Baillièrre, Tindall and Cox, London 1926.
- BANISTER, H. The effect of binaural phase differences on the localization of tones at various frequencies.
Brit. J. Psych. 15, (1925), 280—307.
- BÁRÁNY, E. Contribution to the physiology of bone conduction.
Suppl. Acta otol. 26, 1938.
- BÉKÉSY, G. VON. Zur theorie der Hörens: Über das Richtungshören bei einer Zeitdifferenz oder Lautstärken-ungleichheit der beidseitigen Schalleinwirkung.
Physiol. Z. (1930), 824—835 und 857—868.
- BÉKÉSY, G. VON. Bemerkung zur Theorie der günstigsten Nachhalldauer von Räumen.
Ann. Phys., Leipzig 8, (1931), 851—873.
- BÉKÉSY, G. VON. Über den Einfluss der durch den Kopf und den Gehörgang bewirkten Schallfeldverzerrungen auf die Hörschwelle.
Ann. Phys., Leipzig 14, (1932), 51—56.
- BÉKÉSY, G. VON. Über die Entstehung der Entfernungsempfindung beim Hören.
Akust. Z. 3, (1938), 21—31. J.A.S.A. 10, (1938), 77—78.
- BÉKÉSY, G. VON. Békésy audiometer.
Acta oto-laryng. 35, (1947), 411—422.
- BÉKÉSY, G. VON. The recruitment phenomenon and difference limen in hearing and vibration sense.
Laryngoscope 57, (1947), 765—777.
- BOER, K. DE. Stereophonische geluidsweergave.
Dissertatie Delft, 1940.
- BOER, K. DE. Stereophonic sound reproduction.
Philips Technisch Tijdschr. 5, (1940), 108—114.
- BRUÏNE-ALTES, J. C. The symptom of regression in different kinds of deafness.
Dissertatie Groningen, 1946.
- BÜRCK, W., KOTOWSKI, P. en LICHTÉ, H. Ausgleichsvorgänge in electro-akustischen Uebertragungsanlagen. (Overgenomen uit Davis: Hearing).
Zeitschr. Technisch Physica, 12, (1935), 519—522.
- BIJTEL, J. About the question of binaural beats.
Acta Oto-laryng. Suppl. 78, (1949), blz. 150.
- CARHART, R. Clinical application of bone conduction audiometry.
Archives Otolaryng. 51, (1950), 798—808.
- CARSTEN, H. en SALINGER, H. Zur Frage der Lokalisation von Schallquellen.
Naturwiss. 10, (1922), 329—330.
- CAJAL, S. R. Histologie du système nerveux de l'homme et des vertèbres.
Malaine, Paris. Vol. II, 993 pp.

- CHOCHOLLE, R.
Acustica 4, (1954), 341-350.
- CLARK, B. en GRAYBRIEL, A. The effect of angular acceleration on sound localization. The audiogyral illusion.
J. Psych. 28, (1949), 235-244.
- CRAIK, K. J. W.
Brit. J. Psychol., general section 38, (1947), 56-61 en 142-148.
- DAVIS, H., DERBYSHIRE, A. J., LURIE, M. H. en SAUL, L. J. Further analysis of cochlear activity and auditory action currents.
Ann. J. Physiol. 107, (1934), 311.
- DIAMANT, H. Sound localization and its determination in connection with some cases of severely impaired function of vestibular labyrinth but with normal hearing.
Acta oto-laryng. 34, (1946), 576-586.
- DISHOECK, H. A. E. van. Masking, fatigue, adaptation and recruitment as stimulation phenomenon of the inner ear.
Acta oto-laryngol. 43, (1953), 167-175.
- DISHOECK, H. A. E. van en WIT, G. DE. Loading and covering of the tympanic membrane and obstruction of the external auditory canal.
Acta oto-laryng. 32, (1944), 99-102.
- DISHOECK, H. A. E. van. Continuous-frequency audiometry.
Acta oto-laryng. 41, (1951), 58-68.
- DIX, M. R. en HALLPIKE, C. S. Observations on the pathological mechanism of conductive deafness in certain cases of neuroma of the VIIIth nerve.
Proc. Royal Soc. Med. 43, (1950), 291-298.
- DIX, M. R., HALLPIKE, C. S. en HOOD, J. P. Observations upon the loudness and recruitment phenomenon with reference to the differential diagnosis of the internal course of the VIIIth nerve.
Journ. of Laryngology 62, (1948), 671-686.
- DUYF, J. W., GEMERT, A. G. M. en SCHMIDT, P. H.
Acta Phys. et Pharm. Neerl. 4, (1950), 540.
- DUYF, J. W. Theory of binaural localization.
Proc. First Int. Congress of Audiology, Leiden, (1953), 105.
- EBY, L. G. en WILLIAMS, H. L. Recruitment of loudness in the differential diagnosis of end-organ and nerve-fiber-deafness.
Laryngoscope 61, (1951), 400-414.
- EWALD, J. R. Die centrale Entstehung von Schwebungen zweier monotonisch gehörten Töne.
Pflügers Archiv, 57, (1894), 80-88.
- FALKENBERG, K. Ueber Hörstörungen bei Syringobulbi.
Monatschr. für Ohrenheilkunde, 75, (1941), 242-245.
- FLETCHER, H. Speech and Hearing.
MacMillan and Co., London, 1953.
- FLETCHER, H. A space-time pattern theory of hearing.
J.A.S.A., 1, (1930), 311-343.
- FLETCHER, H. en MUNSON, W. A. Loudness, its definition, measurement and calculation.
J.A.S.A., 5, (1933), 82-108.
- FLETCHER, H. Newer concepts of the pitch, the loudness and the timbre of musical tones. (Aangehaald in Speech and hearing, Fletcher).
Journal of the Franklin Institute, 220, (1935), 405-429.
- FIRESTONE, F. A. The phase difference and amplitude ratio at the ears due to a source of pure tone.
J.A.S.A., 2, (1930), 260-270.
- FIRESTONE, F. A. en WIGHTMAN, E. R. Binaural localization of pure tones.
J.A.S.A., 2, (1930), 271-280.
- FORD, A. Dynamic auditory localization.
J.A.S.A. 13, (1942), 367-372.
- GALAMBOS, R. en DAVIS, H. The response of single auditory-nerve fibres to acoustic stimulation.
J. of Neurophysiology, 6, (1943), 39-58.

- GALAMBOS, R. Neurophysiology of the auditory system.
J.A.S.A., 22, (1950), 785-791.
- GALAMBOS, R. Neural mechanisms of audition.
Physiol. Review 34, (1954), 497-528.
- GARNER, W. R. Accuracy of binaural loudness matching with repeated short tones.
J. exp. Psych., 37, (1947), 337-350.
- GARNER, W. R. The loudness and loudness matching of short tones.
J.A.S.A., 21, (1949), 398-403.
- GARNER, W. R. en WERTHEIMER, M. Some effects of interaural phase differences on the perception of pure tones.
J.A.S.A. 23, (1951), 664-667.
- GARNER, W. R. en MILLER, G. A. Differential sensitivity to intensity as a function of the duration of the comparison tone.
J. exp. Psychol. 34, (1944), 450-463.
- GEMELLI, A. Le mécanisme de l'influence des mouvements de la tête sur la localisation des sons.
Acta Psychol. 6, (1949), 27-32.
- GEMERT, A. G. M. VAN. Localization experiments with phantom sources.
Acta physiol. Pharmac. Neerl. 4, (1955).
- GILSE, P. G. VAN en ROELOFS, O. Untersuchungen über die Schalllokalisation.
Acta oto-laryng. 14, (1930), 1-20.
- GRAHE, K. Hirn und Ohr.
Georg Thieme Verlag Leipzig, 1932.
- GRAYBRIEL, A. en NIVEN, J. I. The effect of a change in direction of resultant force on sound localization.
J. exp. Psych. 42, (1952), 227-230.
- GREINER, G. F. en ROHMER, F. Le rapport sur le lobe temporal en O.N.O.
Revue d' Oto-neuro-ophtalmologie 23, (1951), 249-256.
- GROEN, J. J. en JONGKEES, L. B. W. On directional hearing.
Journal of Laryngology, 61; (1946), 494-504.
- GROEN, J. J. Functional anatomy of hearing.
Acta Oto-laryng. 40, (1951), 32-41.
- GROEN, J. J. Leerboek der Audiologie.
1956, Utrecht.
- GROOT, P. D. Räumliches Richtungshören.
Physica, 11, (1931), 103-116.
- GUILD, S. R. The effects on hearing of partial sections of the cochlear nerve in man.
Acta oto-laryng. 43, (1943), 199-207.
- GÜTTICH, A. Schallrichtungsbestimmung und vestibular Apparat.
Arch. für Ohrenheilkunde, 142, (1936), 135-139.
- GÜTTICH, A. Zur Schallrichtungsbestimmung bei doppelseitigem Vestibularisausfall.
Arch. für Ohrenheilkunde, 146, (1939), 298-301.
- HAAS, H. Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache.
Acustica, 1, (1951), 49-58.
- HALVERSON, H. M. Binaural localization of tones as dependent upon differences of phase and intensity.
Amer. J. Psych. 33, (1922), 178-212.
- HALVERSON, H. M. The upper limit of auditory localization.
Amer. J. Psych., 38, (1927), 97-106.
- HAMPSON, 1949. Aangehaald door Stevens in Experimental psychology.
- HARDY, W. G. en BORDLEY, J. E. Evaluation of hearing in young children.
Acta oto-laryng. 40, (1952), 346-360.
- HARTLEY, R. V. L. The function of phase difference in binaural localization of pure tones.
Phys. Rev. 13, (1919), 373-385.
- HARTLEY, R. V. L. en FRY, T. C. The binaural location of pure tones.
Phys. Rev. 18, (1921), 431-442.
- HARRIS, J. D., HAINES, H. L. en MYERS, C. K. Loudness perception for pure tones and for speech.
Archives, 55, (1952), 107-133.

- HECHT, H. Über die Lokalisation von Schallquellen.
Naturwissenschaften, 10, (1922), 107-112.
- HELD, H. in A. Bethke's Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie.
11, Receptionsorgane 1926, I, 467-534.
- HIRSH, I. J. Binaural summation. A century of investigation.
Psych. Bull., 45, (1948), 193-206.
- HIRSH, I. J. The influence of interaural phase on interaural summation and inhibition.
J.A.S.A., 20, (1948), 536-544.
- HIRSH, I. J. Measurement of hearing.
MacGraw-Hill, London, 1952.
- HIRSH, I. J. The relation between localization and intelligibility.
J.A.S.A., 22, (1950), 196-200.
- HIRSH, I. J., PALVA, T. en GOODMAN, A. Difference limen and recruitment.
Archives, 60, (1954), 525-540.
- HOGART, A. M. en McDUGALL, W. Some data for the theory of the auditory perception of direction.
Brit. J. Psych., 2, (1908), 386-405.
- HORBOSTEL, E. M. von en WERTHEIMER, M. Ueber die Wahrnehmung der Schallrichtung. Aangehaald door Trimble.
Sitzungsber. der Akademie von Wissenschaften Berlin, (1920), 388-396.
- HORBOSTEL, E. M. von. Das räumliche Hören.
Bethge-Bergmann Handbuch Norm. und Path. Phys., deel 11, (1929), 602 e.v.
- HUGHES, J. W. Binaural localization with two notes differing in phase by 180° .
Brit. J. Psych. 30, (1939), 52-56.
- HUGHES, J. W. The upper frequency limit for the binaural localization of a pure tone by phase difference.
Proc. Royal Soc. Med., London B 128, (1940), 293-305.
- HUIZING, H. C. Relation between auditory fatigue and recruitment.
Suppl. Acta oto-laryng., 78, (1949), 169-172.
- HUIZING, H. C. Audiologie, moderne wetenschap tot behoud der gehoorsfunctie.
Inaugurale rede, 1956, Universiteit Groningen.
- HUIZINGA, E. On the sound reactions of Tullio.
Acta oto-laryng., 22, (1935), 359-370.
- JEFFRES, L. A. Binaural phase difference and pitch variation.
Amer. J. Psych. 61, (1948), 468-486.
- JEFFRES, L. A. A place theory of sound localization.
J. comp. Physiol. Psych., 41, (1948), 35-39.
- JEFFRES, L. A. Interaural phase difference and pitch variation. Day to day changes.
Amer. J. Psych. 62, (1949), 1-19.
- JEFFRES, L. A., BLODGETT, H. C. en DEATHERAGE, B. H. The masking of tones by white noise as a function of the interaural phases of both components.
J.A.S.A., 24, (1952), 523-527.
- JEPSEN, O. The threshold of the reflexes of the intratympanic muscles in a normal material examined by means of the impedance method.
Acta oto-laryng. 39, (1951), 406-408.
- JOHANSEN, H. Relation of audiogram to the impedance formula.
Acta oto-laryng., suppl. 74, (1948), 65-75.
- JONGKEES, L. B. W. en GROEN, J. J. On directional hearing.
J. Laryng. 61, (1946), 494-504.
- KEMP, E. H. en ROBINSONS, E. H. Electrical responses of the brain stem to bilateral auditory stimulation.
Amer. J. Physiol., 120, (1937), 316-322.
- KIETZ, H. Das Problem des räumlichen Richtungshörens.
Archiv. für Ohrenheilk. 1954.
- KIETZ, H. en ZANGEMEISTER, H. Vergleich zwischen dem normalen Hören mittels Gehörknöchelchen und dem Hören über den Kopf als schallauffangendes Organ.
Zeitschr. f. Laryngologie, 31, (1952), 303, idem 31, (1952), 91.
- KIETZ, H. Das räumliche Hören.
Acustica, 3, (1953), 73-86.

- KLENSCH, H. Beitrag zur Frage der Lokalisation des Schalles im Raum.
Pflügers Archiv, 250, (1948), 492–500 en 706–713.
- KLENSCH, H. Die Lokalisation des Schalles im Raum.
Naturwissenschaften, 36, (1949), 145–149.
- KLUMPP, R. G. Discriminability of interaural time difference.
J.A.S.A. 25, (1953), 823.
- KNUDSEN, V. O. The sensibility of the ear to small differences in intensity and frequency.
Physic. Review 21, (1923), 84–102.
- KOBRAK, F. Neu-orientierung in Probleme einer klinischen Neurologie des Ohren.
Archiv für Hals, Nasen und Ohrenheilkunde, 162, (1953), 332–354.
- KOBRAK, F. Elementär musikalisches Hören und cochleo-vestibular Prinzip.
Archiv für Hals, Nasen und Ohrenheilkunde, 157, (1951), 650–673.
- KOENIG, W. Subjective effects in binaural hearing.
J.A.S.A., 22, (1950), 61–62.
- KOCH, W. E. Binaural localization and masking.
J.A.S.A., 22, (1950), 801–804.
- KONING, G. en SÜSSMAN, W. Zum Richtungshören in der Median-Sagital-Ebene.
Archiv für Hals, Nasen und Ohrenheilkunde, 167, (1955), 303–307.
- KRAUS, M. Ueber das Erkennen der Schallrichtung.
Archiv für Hals, Nasen und Ohrenheilkunde, 157, (1950), 301–319.
- KRAUS, M. Probleme der Ohrphysiologie und neue Lösungsversuche.
Springer Verlag, Wien 1953.
- KREIDL, A. en GATSCHER, S. Handbuch der Neurologie des Ohren.
Alexander, Marburg, I Bd, 1923.
- KREIDL, A. en GATSCHER, S. Stimmgabeluntersuchungen zum Nachweis der akustischen Isolierung der beiden Labyrinth.
Monatsch. Ohrenh. 59, (1925), 938–941.
- KUNTZE, W. Das Richtungshören und einige technischen Anwendungen.
Phys. Zeitschr., 22, (1921), 649–652.
- LANGENBECK, B. Diagnosis by testing hearing above threshold (noise masking adaptation and tinnitus).
Acta oto-laryng., 43, (1953), 439–456.
- LAWRENCE, M. en YANTIS, P. A. Threshold of overload in normal and pathological ears.
Archives, 1, (1955), 63–67.
- LEWY, F. H. en KOBRAK, H. The neural projection of the cochlear spirals on the primary acoustic centres.
Arch. neur. Psych. 35, (1936), 839–852.
- LICKLIDER, J. C. R. en WEBSTER, J. C. The discriminability of interaural phase relations in two-component tones.
J.A.S.A. 22, (1950), 191–195.
- LICKLIDER, J. C. R. The influence of interaural phase relations upon the masking of speech by white noise.
J.A.S.A., 20, (1948), 150–159.
- LICKLIDER, J. C. R., WEBSTER, J. C. en HEDLUN, J. M. On the frequency limits of binaural beats.
J.A.S.A., 22, (1950), 468.
- LINDSAY, J. R., KOBRAK, H. G. en PERLMAN, H. B. Relation of the stapedius reflex to hearing sensation in man.
Archives, 23, (1936), 671–678.
- LITTLER, T. S. Resonance in the external auditory meatus.
Nature, London, 143, (1939), 118.
- LORENTE DE NO, R. en HARRIS, A. S. Experimental studies in hearing. I: The threshold of the reflexes of the muscles of the middle ear. II: The hearing loss after extirpation of the tympanic membrane.
Laryngoscope, 43, (1933), 315–326.
- LORENTE DE NO, R. en HARRIS, A. S. Anatomy of the VIIIth nerve. The central projection of the nerve-endings in the internal ear.
Laryngoscope, 43, (1933), 1–38.

- LUNDBORG, T. Diagnostic problems concerning acoustic tumors.
Acta otol. suppl., 99, (1952).
- LÜSCHER, E. The functional effect of loading of the tympanic membrane.
Acta otol., 33, (1945), 265-272.
- MAXFIELD, J. P. Overgenomen uit de these van K. de Boer.
Journal Soc. Motion Pict. Engl., 30, (1938), 131.
- MENZIO, P. Relations between the recruitment phenomenon and the auditory localization.
Proc. First Int. Congress of Audiology, Leiden, 1953, p. 97.
- METZ, O. The acoustic impedance measured on normal and pathologic ears.
Acta otol. suppl., 63, 1946.
- MEURMAN, Y. en MEURMAN, O. H. Do the semicircular canals play a part in directional hearing?
Acta otol., 44, (1954), 542-555.
- MEYER, E. Stereoaakustisches Hören.
Handbuch der Physik, Band Akustik, Springer-Verlag, Berlin, 1927, 538-543.
- MILLER, G. A., ROSENBLITH, W. A., GALAMBOS, R. en HIRSH, I. J. A bibliography in audition.
Harvard University Press, 1950.
- MORSE, P. M. Vibration and sound.
McGraw-Hill Company, London, 1948.
- MYGIND, S. H. Ein Versuch zur Erklärung des sogenannten Regression-phänomens.
Zeitschr. für Laryngologie, 29, (1950), 277-285.
- NEFF, W. D. en YELA, M. Function of the auditory cortex: the localization of sound in space.
Amer. Psych. 3, (1948), 243.
- NEWMAN, E. B., VOLKMANN, J. en STEVENS, S. S. On the method of bisection and its relation to a loudness scale.
Amer. J. Psych., 49, (1937), 134-137.
- NOWELL JONES, F. en BUNTING, E. Displacement after effects in auditory localization.
Amer. J. Psychol., 4, (1949), 389.
- PERAKELIN, W. E. Ueber die akustische Orientierung.
Zeitschr. für Hals, Nasen und Ohrenheilkunde, 25, (1930), 442-461.
- PHILIPPIDES, M. M., GREINER, C. F. Troubles cochleaires après ablation du lobe temporelle gauche.
Revue d'Oto-neuro-ophtalmologie, 22, (1950), 19-22.
- RAYLEIGH, LORD. The theory of sound. On our perception of sound direction. (Overgenomen uit these K. de Boer).
Phil. mag., 13, 1904, 214-232 en Phil. Trans Roy. Soc. 203 A, (1904), 87.
- RASMUSSEN, H. Studies on the effect upon the hearing through air-conduction brought about by variations of the pressure in the auditory meatus.
Acta otol. 34, (1946), 415-424.
- RASMUSSEN, H. Studies on the effect on the air conduction and bone conduction from changes in the meatal pressure in normal subjects and otosclerotic patients.
Acta otol. suppl., 74, (1948), 54-64.
- RANKE, O. F. Gehör, Stimme und Sprache.
Springer-Verlag, Berlin, 1953.
- REICH, M. en BEHRENS, H. Das Richtungsempfinden bei Tönen und Klängen.
Zeitschrift für Technische Physica 14, (1933), 1-6.
- REIJSENBAACH DE HAAN, F. W. De ceti auditu.
Dissertatie Utrecht, 1956.
- RICHARDSON, E. G. Sound.
Longman, New York, 1940.
- RIESZ, R. R. Differential intensity sensitivity of the ear for pure tones.
Phys. Review 31, (1928), 867-875.
- RIESZ, R. R. The relationship between loudness and the minimum perceptible increment of intensity.
J.A.S.A., 4, (1933), 211-216.
- ROSEN, S.
Modern Medicine, Nov. 1956, 119.

- ROSENBLITH, W. A. Auditory masking and fatigue.
J.A.S.A., 22, (1950), 792-800.
- ROSENZWEIG, M. R. Electrophysiological correlates of auditory localization.
Dissertatie, Harvard University, 1949.
- RÜEDI, L. en FURBER, W. Das akustische Trauma.
Karger, Basel, 1947.
- RIJNBERK, G. Nederlands Leerboek der Physiologie, VI, zintuigen, 1940, 151 en volgende.
- SALTZMAN, M. Clinical audiology.
Grune and Stratton, 1949.
- SCHMIDT, P. H. Localization experiments with actual sources.
Proc. First. Int. Congress of Audiology Leiden. 1953.
- SCHMIDT, P. H. Phantom source experiments in auditory localization.
Dissertatie Leiden, 1955.
- SHOWER, E. G. en BIDDULPH, R. Differential pitch sensitivity of the ear.
J.A.S.A., 3, (1931), 275-287.
- SIMPSON, M. Experiments in binaural phase difference effect with pure tones.
Phys. Review 15, (1920), 421-424.
- SIVIAN, L. J. en WHITE, S. D. On minimum audible sound fields.
J.A.S.A., 4, (1933), 288-321.
- SMITH, M. H. en LICKLIDER, J. C. R. Statistical bias in comparisons of monaural and binaural thresholds: Binaural summation or binaural supplementation.
Psych. Bull. 46, (1949), 278-284.
- SNIDER en TOWELL, S. 1949. Aangehaald door Stevens in Experimental psychology.
- SOEST, J. L. VAN.
Physica, 9, (1929), 111.
- SPIEGEL, E. A. en SOMMER, I. Ophthalmo- und Otoneurologie.
Springer Verlag, Berlin, 1931.
- SPIEGEL, E. A. en KAKESHITA.
Pflügers Archiv., 212, (1926), 769.
- STEINBERG, J. C. en SNOW, W. B. Physical factors in auditory perspective.
Bell System Technical Journal, 13, (1934), 245-260. (Uit Hearing-Davis).
- STEVENS, S. S., VOLKMANN, J. en NEWMAN, E. B. A scale for the measurement of the psychological magnitude of pitch.
J.A.S.A., 8, (1937), 185-190.
- STEVENS, S. S. en NEWMAN, E. B. The localization of pure tones.
Proc. Nation. Academy Science, 20, (1934), 593-596.
- STEVENS, S. S. en NEWMAN, E. B. The localization of actual sources of sound.
Amer. J. Psych. 48, (1936), 297-306.
- STEVENS, S. S. en DAVIS, H. Hearing, its psychology and physiology.
J. Wiley & Sons, New York, 1948.
- STEVENS, S. S. Handbook of Experimental Psychology.
J. Wiley & Sons, New York, 1951.
- STEWART, G. W. The function of intensity and phase in the binaural localization of pure tones.
Phys. Rev. 15, (1920), 425-445
- STEWART, G. W. A suggestion towards a new hypothesis regarding the localization of sound.
Brit. J. Psych., 17, (1926), 142.
- STEWART, G. W. The intensity logarithmic law and the difference of phase effect in binaural audition.
Psychol. Monog. 31, (1922), 30-44.
- STEWART, G. W. Binaural hearing.
J.A.S.A., 1, (1930), 344-347.
- TASAKI, I. Nerve impulses in individual auditory nerve fibres of guinea-pig.
J. Neurophys., 17, (1954), 97-122.
- THOMAS, G. J. Experimental study of the influence of vision on sound localization.
J. exp. Psychol., 28, (1941), 163-177.
- TOLHURST, G. C. Localization accuracy resulting from isolated binaural stimulation.
Joint report NM 001 064.01. U.S. Naval School, Pensacola.

- TRIMBLE, O. C. The theory of sound localization, a restatement.
Psych. Rev., 35, (1928), 515-523.
- TRIMBLE, O. C. A discrete impulse technique in sound localization.
Brit. J. Psychol. 19, (1928), 167-179.
- TRIMBLE, O. C. Some temporal aspects of sound localization.
Psychol. Monog., 28, (1928), 172-224.
- TRIMBLE, O. C. The relative roles of the temporal and the intensity factor in sound localization.
Amer. J. Psych. 41, (1929), 564-576.
- TRIMBLE, O. C. Intensity-difference and phase-difference as conditions of stimulation in binaural sound localization.
Amer. J. Psych. 47, (1935), 264-274.
- TRÖGER, J. Die Schallaufnahme durch das äussere Ohr.
Physik. Zeitschr. 31, (1930), 26-45.
- UPTON, M. Differential sensitivity in sound localization.
Proc. Nation. Academy Science, 22, (1936), 409-412.
- UPTON, M. en HOLWAY, A. H. On the psycho-physics of hearing: II Binaural differential sensitivity and exposure-time.
Proc. Nation. Academy Science, 23, (1937), 32-34.
- VEER, R. A. VAN DER. Enige onderzoekingen over richting horen.
Dissertatie Amsterdam 1957.
- VERSTEEGH, R. M. Frequentie-modulatie en het menselijk gehoororgaan.
Dissertatie Utrecht 1954.
- WALLACH, H. On sound localization.
J.A.S.A., 10, (1939), 270-274.
- WALLACH, H. The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization.
J. exp. Psych., 27, (1940), 339-367.
- WALLACH, H., NEWMAN, E. B. en ROSENZWEIG, M. R. The precedence effect in sound localization.
Amer. J. Psych. 62, (1949), 315-336.
- WATSON, L. A. and TOLAN, T. Hearing tests.
Archives 45, (1947), 302.
- WATSON, L. A. en TOLAN, T. Hearing-test and instruments.
Williams and Wilkins, 1949, Baltimore.
- WEBSTER, F. A. The influence of interaural phase on masked thresholds. The role of interaural time-deviation.
J.A.S.A. 23, (1951), 452-462.
- WEGEL, R. L. en LANE, C. E. The auditory masking of one pure tone by another and its possible relation to the dynamics of the inner ear.
Physic. Review 23, (1924), 266-285.
- WEVER, E. G. en VERNON, J. A. Threshold sensitivity of the tympanic muscle reflexes.
Archives, 62, (1955), 204-213.
- WEVER, E. G. Theory of hearing.
John Wiley and Sons, New York, 1949.
- WEVER, E. G. en BRAY, C. W. en LAWRENCE, M. The interference of tones in the cochlea.
J.A.S.A., 12, (1940), 268-280.
- WEVER, E. G., BRAY, C. W. en LAWRENCE, M. The effect of middle ear pressure upon distortion.
J.A.S.A., 13, (1941), 182-187.
- WEVER, E. G. en LAWRENCE, M. Patterns of response in the cochlea.
J.A.S.A., 21, (1949), 127-134.
- WEVER, E. G. en LAWRENCE, M. Acoustic pathways to the cochlea.
J.A.S.A., 22, (1950), 460-467.
- WEVER, E. G. en LAWRENCE, M. Physiological acoustics.
Princeton University Press, 1954. (Overgenomen uit Theory of hearing, Wever).
- WEVER, E. G. en NEFF, W. D. A further study of effects of partial section of the auditory nerve.
J. comp. Phys. and Psych., 40, (1947), 217-226.

WIENER, F. M. en ROSS, D. A. The pressure distribution in the auditory canal in a progressive sound field.

J.A.S.A., 18, (1946), 401-408.

WIGHTMAN, E. R. en FIRESTONE, F. A. Binaural localization of pure tones.

J.A.S.A., 2, (1930), 271-280.

WILSKA, A. Untersuchungen über das Richtungshören.

Dissertatie Helsingfors. 1938 (uit Hearing, Davis).

WILSON, H. A. en MEYERS, C. S. The influence of binaural phase differences on the localization of sounds.

Brit. J. Psych., 2, (1908), 363-385.

WILEY, L. E. A further investigation of auditory cerebral mechanisms.

J. comp. Neurol. 66, (1937), 327-331.

WULSTEIN, J. C. Proceedings of the 6th Intern. Congress of Oto-rhino-laryngology, Washington, 1957.

YANTIS, P. A. Locus of the lesion in recruiting ears.

Archives, 62, (1955), 625-631.

YOUNG WHITE, S. Binaural phenomenon.

Audio Engineering, 32, (1948), 30-40.

STELLINGEN

I.

Langdurige kunstmatige ademhaling dient te geschieden onder regelmatige contrôle van de koolzuurspanning in de alveolaire lucht.

II.

Wanneer een uterusamputatie onder het 45ste jaar geïndiceerd is, verdient — indien mogelijk — de operatie volgens BROcq-ALBERTI de voorkeur.

Gynécologie et obstétric, 1952 pag. 23.

III.

Abcesvorming in de frontaalkwab kan zijn ontstaan danken aan een etterige voorhoofdsholteontsteking, welke zo latent is, dat nòch rhinoscopie nòch röntgenologisch onderzoek een aanknopingspunt opleveren.

R. S. HOOPER, Med. journ. of Australia, 1951.

IV.

Het is niet bewezen, dat het eczema aan de handen van vrouwen, die overgevoelig zijn voor nikkel, veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van dit metaal in de moderne synthetische wasmiddelen.

KROEPFLI en SCHUPPLI, Dermatologica 110, 1955 pag. 1.

V.

Ook bij chirurgische therapie van colitis ulcerosa betekent het gebruik van adrenocorticosteroiden een aanwinst.

VI.

Bij meningitis tuberculosa is het van voordeel naast de tuberculostatica ook corticosteroiden toe te voeren.

M. ASHBY en H. GRANT, Lancet, 268, 1955 pag. 65.

VII.

Bij de keuringseisen betreffende het gehoor dient voor de stereoakoësie, zijnde een integrerend deel van de gehoorsfunctie, een minimum eis opgenomen te worden.

VIII.

De opvatting van HAM, dat bij de enchondrale beenafzetting Haverse systemen gevormd worden, is onjuist.

A. W. HAM, Histology, 2de druk 1953 pag. 246.

IX.

De papillaire laag van huidlappen, gesneden volgens de aanwijzingen van THIERSCH, hecht zich bij transplantatie even goed op het naakte bot van het os petrosum als op weke delen.

X.

Het is betreurenswaardig, dat er geen internationale overeenkomsten bestaan, waarbij Nederlandse artsdiploma's op wettige basis gelijk worden gesteld met in het buitenland verkregen artsdiploma's.

XI.

Bij de lokale toepassing van antibiotica in de oogheelkunde gebruikte men alleen die preparaten, welke zelden of nooit inwendig worden toegepast.

SULZBERGER, Yearbook of dermatology and syphilology, 1950 pag. 10.

XII.

Voor de tandarts is het van belang de rhino-alveolaire cyste van de tandwortelcyste te differentiëren.

XIII.

Het verdient aanbeveling bij zuigelingen met herhaalde convulsies, waarvan de oorzaak niet duidelijk is, na te gaan of extra pyridoxinehydrochloride invloed heeft.

BESSEY, ADAM en HANSEN, Paediatrics, Juli 1957 pag. 33.

