

# Het oor beluisterd

*Dr.G.F. Smoorenburg & Prof.dr.ir.R. Plomp*

Wanneer we naar muziek, spraak of andere geluiden luisteren, dan realiseren we ons meestal niet dat het gehoororgaan hierbij een essentiële rol vervult. We willen genieten van muziek, we proberen een gesprek te volgen of we willen weten of de baby nog huilt.

Bij al deze activiteiten wordt de rol van het oor, toch een onvermijdelijke tussenschakel bij de waarneming, nauwelijks in aanmerking genomen. We zijn slechts geïnteresseerd in het geluid zelf. We worden echter direct herinnerd aan de rol van ons gehoororgaan wanneer dit minder goed functioneert. Dan komt duidelijk tot uiting dat onze waarneming begrensd wordt door eigenschappen van ons gehoororgaan.

Het gehoor is zeer gevoelig voor vervorming, maar het oor produceert zelf ook vervormingcomponenten. Het naarstige streven van hifi-apparatuurfabrikanten om de vervorming terug te dringen (omdat ze nog steeds hoorbaar is) wordt als water-naar-de-zee-dragen gekarakteriseerd.

In het biofysisch gehooronderzoek trachten wij de eigenschappen van het gehoororgaan vast te leggen. Kennis van deze eigenschappen stelt ons in staat de eisen te formuleren waaraan geluidssignalen moeten voldoen opdat normaalhorenden ze goed zullen kunnen waarnemen. Tevens stelt kennis van deze eigenschappen ons in staat afwijkend functioneren van het gehoororgaan vast te stellen en, in dat geval, maatregelen ter verbetering van de waarneming aan te geven.

De biofysische aanpak in het gehooronderzoek kenmerkt zich door het gehoororgaan als meetinstrument te beschouwen. Willen we het functioneren van dit meetinstrument experimenteel onderzoeken, dan staan ons in hoofdzaak twee methoden ter beschikking.

Volgens de eerste methode, behorend tot de psychofysica (zie het in deze serie verschenen artikel over psychofysica van Houtgast en Vos), proberen we hetgeen we horen zo exact mogelijk vast te leggen. Met behulp van geschikt gekozen

geluidssignalen gaan we na wat wel en wat niet gehoord wordt. Bij dit psychofysisch onderzoek zijn we niet meer geïnteresseerd in het geluid zelf, maar we luisteren naar hetgeen ons oor van het geluid maakt; we beluisteren ons oor. Volgens de tweede methode, behorend tot de fysiologische fysica, trachten we het functioneren van het gehoororgaan als meetinstrument te begrijpen door de onderdelen van dit instrument te bestuderen en niet slechts, zoals in de psychofysica, het meetresultaat. Binnen de fysiologische fysica neemt het elektrofysiologisch onderzoek een belangrijke plaats in.

Enerzijds wordt dit onderzoek verricht door elektroden aan te brengen in het gehoororgaan van proefdieren. Anderzijds is het mogelijk, ook bij mensen, in het gehoororgaan opgewekte elektrische activiteit op enige afstand van dit orgaan te registreren. Deze laatste techniek is mede van klinisch belang. In het volgende zullen we met behulp van psychofysisch onderzoek nagaan op welke aspecten van het geluid de toonhoogtewaarneming is

gebaseerd. Hierbij stuiten we al gauw op een belangrijke eigenschap van het gehoororgaan, namelijk dat dit orgaan het geluid ontleedt in frequentiecomponenten. Deze ontleding, ofwel frequentieanalyse, wordt in dit artikel nog nader belicht. In aanvulling op de toonhoogtewaarneming bespreken we vervorming van het geluid in het gehoororgaan, waarna we zullen laten zien hoe vervorming en frequentieanalyse bij elektrofysiologisch onderzoek kan worden teruggevonden.

### De rol van de grondtoon bij de toonhoogtewaarneming

**L**uisteren we naar een toon voortgebracht door bijvoorbeeld een muziekinstrument, dan heeft deze toon een bepaalde klankkleur (een bepaald timbre) en een bepaalde toonhoogte. De klankkleur is voor ieder instrument verschillend, terwijl verschillende instrumenten dezelfde toonhoogte kunnen voortbrengen. Evenzo kunnen we stellen, dat de verschillende klinkers verschillende klankkleuren hebben (de oë klinkt donker, de è scherp) terwijl verschillende klinkers op dezelfde toonhoogte kunnen worden gezongen. De klankkleur wordt bepaald door de onderlinge sterkte van de frequentiecomponenten van het geluid. De toonhoogte daarentegen, wordt bepaald door de frequenties van de componenten. Wanneer we nu alle harmonischen uit het geluid verwijderen zodat alleen de grondcomponent overblijft (een extreme vorm van het terugdraaien van de hogetonenregelaar van uw radio) dan verandert de klankkleur (het geluid wordt dof) terwijl de toonhoogte ongewijzigd blijft. Kennelijk is de toonhoogte van de grondcomponent gelijk aan die van het geluid waarin alle harmonischen aanwezig zijn. Met deze wetenschap kan men zich afvragen of die grondcomponent dan ook altijd bepalend is voor de toonhoogte van geluid dat uit vele harmonischen bestaat.

Deze vraag speelde ruim een eeuw een belangrijke rol in de hoortheorie.

Het begon in **1843** met een publicatie van *Ohm* (bekend van de wet uit de elektriciteitsleer). Ohm probeerde enige, door *Seebeck* met een akoestische sirene (zie fig. 1) uitgevoerde experimenten, te verklaren op basis van zijn sedertdien voor de hoortheorie belangrijke stelling dat in iedere toon een aantal deeltonen zijn te onderscheiden met verschillende toonhoogten die corresponderen met de harmonischen van het geluid, zie fig. 2. (Het kunnen onderscheiden van deze deeltonen vereist wel enige oefening.) Ohm verklaarde de overeenkomst tussen de toonhoogte van een geluid dat uit vele harmonischen bestaat en de toonhoogte van de grondcomponent uitsluitend uit de aanwezigheid van die grondcomponent. Seebeck, daarentegen, vond deze oplossing niet erg bevredigend omdat geluiden, die zo werden geproduceerd dat de grondcomponent als vrijwel afwezig mocht worden beschouwd, toch een toonhoogte corresponderend met deze grondcomponent bleken te hebben. (Tegenwoordig kunnen we dit eenvoudig verifiëren door bij de radio de lage tonen weg te draaien). Seebeck concludeerde daarom, dat niet de grondcomponent maar de periodiciteit in de golfvorm van het geluid de toonhoogte bepaalt. De golfvorm vertoont namelijk wanneer de grondcomponent niet in het geluid aanwezig is, toch een periodiciteit die overeenkomt met de frequentie van de grondcomponent. Vooral nadat de grote natuuronderzoeker *Hermann von Helmholtz* in zijn in **1863** gepubliceerde werk 'Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik' voor Ohm koos, raakte de alternatieve verklaring van Seebeck meer en meer op de achtergrond. Von Helmholtz stelde dat ook al zou de grondcomponent in het geluid afwezig zijn, dan nõg zou deze component door vervorming in het gehoororgaan weer kunnen worden opgewekt.

Het vraagstuk kwam opnieuw in de belangstelling te staan door experimenten die *Schouten* rond **1938** in ons land uitvoerde. Hij was in staat de sterkte van de grondcomponent te regelen met een speciaal daarvoor geconstrueerde toongenerator. Het bleek hem, dat tonen waarin de grondcomponent beslist niet meer hoorbaar was, dezelfde toonhoogte hadden als tonen waarin deze component wèl hoorbaar was.

Daarom koos *Schouten* voor de opvatting van *Seebeck*. De hogere harmonischen duidde hij aan met de term 'het residu'. Het idee dat de periodiciteit van dit residu bepalend is voor de waargenomen toonhoogte raakte daardoor bekend als de *residutheorie*.

Na de Tweede Wereldoorlog kwam het vraagstuk pas goed in discussie. In eigen land bestreed *Hoogland*, een pupil van de Utrechtse hoogleraar *Groen*, in **1953** de residutheorie. In zijn dissertatie trachtte hij aan te tonen dat de door *Schouten* waargenomen toonhoogte

toch een gevolg moest zijn geweest van het opnieuw ontstaan van de grondtoon door vervorming in het gehoororgaan zelf. In de Verenigde Staten raakte *Licklider* (een toentertijd bekende onderzoeker van de auditieve perceptie) geïnteresseerd in het vraagstuk. In **1955** kwam hij naar ons land met een bandopname waarmee hij in het laboratorium van *Groen* in het Academisch Ziekenhuis te Utrecht demonstreerde dat *Hooglands* redenering onhoudbaar was. De

bandopname bevatte een melodie opgebouwd uit tonen zonder grondcomponent.

Door toevoeging van een ruisband rond de frequentie van de grondcomponent zorgde *Licklider* ervoor dat een eventueel weer door vervorming in het oor opgewekte grondtoon gemaskeerd zou worden. De afwezigheid van de grondcomponent en het toevoegen van de ruis bleken geen

effect te hebben op de waargenomen melodie.

De onhoudbaarheid van *Hooglands* redenering bleek ook uit experimenten die terzelfder tijd in Nederland werden verricht. *De Boer* liet in zijn dissertatie van **1956** zien dat de toonhoogte van het residu verandert wanneer de frequenties van een groep hogere harmonischen die het residu vormen, worden verschoven van bijvoorbeeld 1000, 1200, 1400, 1600 en 1800 Hz naar 1030, 1230, 1430, 1630 en 1830 Hz. Door

vervorming zou een verschiltoon kunnen worden opgewekt die echter door de frequentieverschuiving van 30 Hz niet wordt beïnvloed; het

frequentieverschil tussen de opeenvolgende frequentiecomponenten, bijvoorbeeld  $f_1 = 1000$  Hz,  $f_2 = 1200$  Hz,  $f_2 - f_1 = 200$  Hz, is na de verschuiving immers 200 Hz gebleven. Al zou deze verschiltoon dus, mogelijk zelfs op een onhoorbare wijze, door vervorming in het gehoororgaan de plaats van de grondcomponent hebben ingenomen, dan nòg kan deze verschiltoon de toonhoogte niet bepaald hebben, omdat de toonhoogte

#### **Frequentie-analyse**

Een belangrijke eigenschap van het gehoororgaan is dat dit orgaan het geluid ontleedt in frequentiecomponenten. Dit wil zeggen dat een geluidstrilling door dit orgaan wordt opgesplitst in een aantal sinusvormige trillingen met verschillende frequenties. In bijgaande figuur wordt dit geïllustreerd. Bovenaan zien we twee perioden van een periodieke trilling en daaronder de sinusvormige componenten die, bij elkaar opgeteld, precies de golfvorm opleveren van de periodieke trilling. De sinusvormige componenten heten frequentiecomponenten, het opsplitsen van een trilling in frequentiecomponenten noemt men frequentie-analyse. De laagste frequentiecomponent, de component met een periodeduur die overeenkomt met de periodeduur van de periodieke trilling, wordt de grondcomponent genoemd, de hogere componenten met frequenties van  $2x$ ,  $3x$ ,  $4x$ , enz. maal de grondfrequentie, worden aangeduid als de harmonischen. In de fysica is het gebruikelijk de grondcomponent als eerste harmonische te betitelen en zo verder te tellen zodat de  $n^e$  harmonische een frequentie van  $n$ -maal de grondfrequentie heeft. Frequentie-analyse door het gehoororgaan houdt in, dat de verschillende frequentiecomponenten van het geluid in verschillende cellen van de gehoorzenuw terechtkomen. (Zie de illustratie hieronder).

wèl met de frequentieverschuiving veranderde. Nader onderzoek heeft geleerd dat ook andere vervormingcomponenten van meer gecompliceerde aard niet ten grondslag kunnen liggen aan de toonhoogtewaarneming.

Op verschillende wijzen was nu dus aangetoond dat de waargenomen toonhoogte niet afhankelijk is van de aanwezigheid van de grondcomponent in het geluid. Hierbij dienen we nog wel even de aantekening te maken dat we ons bepalen tot het normale toonhoogtegebied voor spraak en muziek. We spreken niet over extreem hoge registers waar de harmonischen al gauw boven het audiogebied komen te liggen.

### De derde, vierde en vijfde harmonische zijn toonaangevend

**N**adat was gebleken dat de grondcomponent niet belangrijk is voor de toonhoogtewaarneming

werd de vraag hierna: heeft Seebeck dan toch gelijk? Is de periodiciteit van de golfvorm inderdaad bepalend voor de toonhoogtewaarneming? De periodiciteit wordt zichtbaar in de golfvorm wanneer een aantal harmonischen wordt samengevoegd. Hoe is dit te rijmen met Ohms bevinding dat het gehoororgaan een toon juist ontleeft in een aantal deeltonen die corresponderen met de frequentiecomponenten van het geluid? Het antwoord werd door Schouten gezocht in de begrensdeheid van dit ontledingsvermogen: we kunnen slechts deeltonen horen die corresponderen met de lagere harmonischen, de daarboven gelegen harmonischen zouden samen de periodiciteit kunnen doorgeven.

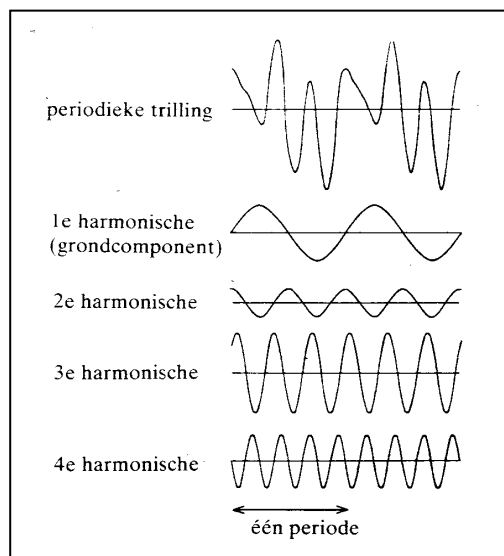
In 1964 liet *Plomp* zien waar de grenzen van het ontledingsvermogen (de

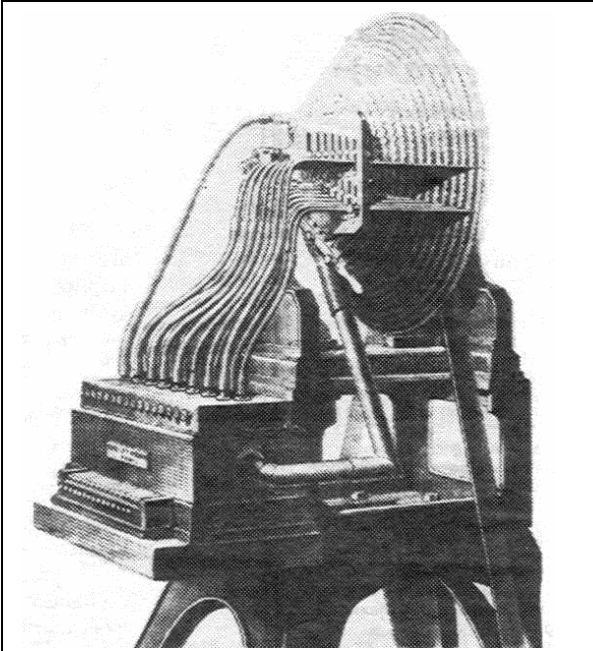
frequentie-analyse) van het gehoororgaan liggen. Hij liet naast een toon die uit vele harmonischen bestond (een complexe toon) twee enkelvoudige tonen horen waarvan er één gelijk was aan één van de harmonischen van de complexe toon en de andere aan één frequentiecomponent die tussen deze harmonische en de naastliggende harmonische in lag. Door nu te vragen welke van de twee enkelvoudige tonen als deeltoon in de complexe toon voorkwam, werd het duidelijk wanneer de deeltoon gehoord werd en wanneer de proefpersoon ging gokken. Bij dit

experiment bestond de mogelijkheid dat een muzikale proefpersoon die niet één van de twee enkelvoudige tonen zou kunnen terugvinden in de complexe toon, af zou gaan op de toonhoogte-intervallen tussen de enkelvoudige tonen en de complexe toon. Zo zou de enkelvoudige toon die op acht maal de grondfrequentie ligt goed kunnen worden

geïdentificeerd tegenover die op 7,5 of 8,5 maal de grondfrequentie, omdat de eerste drie octaven boven de toonhoogte van de complexe toon ligt en niet omdat de eerste als deeltoon in de complexe toon werd gehoord. Daarom werd het experiment door *Plomp* herhaald met een complexe toon waarbij de frequentiecomponenten geen harmonische ligging hadden (geen eenvoudige verhoudingen van de frequenties). Het resultaat van dit experiment was voor de harmonische en de ontstemde geluiden gelijk: proefpersonen kunnen gemiddeld de eerste vijf harmonischen afzonderlijk waarnemen. De toonhoogte zou dus volgens Schouten gebaseerd moeten zijn op harmonischen boven de vijfde.

De laatste stap in deze ontwikkeling vormde onderzoek direct gericht op de





*Fig.1. Een akoestische sirene zoals die rond 1880 door Rudolph König werd gebruikt voor onderzoek op het gebied van de toonperceptie. De akoestische sirene werd later vervangen door verschillende soorten elektromechanische toongeneratoren zoals de toonwielen van het Hammondorgel. Tegenwoordig worden geluidssignalen met een computer punt voor punt berekend. De berekende waarden worden vervolgens snel omgezet in elektrische spanningen die naar een hoofdtelefoon of luidspreker worden gevoerd.*

vraag welke harmonischen nu eigenlijk de toonhoogte bepalen. Plomp (1966) werkzaam in het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg en Ritsma (1967) werkzaam in het door Schouten in 1955 opgerichte Instituut voor Perceptie-Onderzoek te Eindhoven, haalden hiervoor de reeds door De Boer toegepaste truc van het verschuiven der frequentiecomponenten weer uit de doos. De harmonischen werden nu echter niet meer allemaal dezelfde kant op verschoven zoals De Boer het deed, maar een deel van de harmonischen werd naar iets hogere frequenties verschoven terwijl het andere gedeelte naar iets lagere frequenties werd verschoven. Aan proefpersonen werd gevraagd of de toonhoogte steeg dan wel daalde. Het resultaat was zeer verrassend. Bij een typische waarde voor de

grondfrequentie van 200 Hz bleken de derde, vierde en vijfde harmonische, (harmonischen die afzonderlijk kunnen worden waargenomen), de toonhoogte te bepalen; Schouten kreeg met zijn idee, dat de toonhoogte gebaseerd zou moeten zijn op hogere harmonischen die niet door het gehoororgaan worden gescheiden maar samen de periodiciteit kunnen doorgeven, dus geen gelijk.

Men zou als bezwaar tegen de voorgaande experimenten van Plomp en van Ritsma kunnen aanvoeren dat de resultaten zijn verkregen met niet-harmonische signalen die niet representatief zijn voor tonen die op natuurlijke wijze zijn voortgebracht. Een niet-harmonische ligging van de frequentiecomponenten komt evenwel in de praktijk ook voor. Een typisch voorbeeld is de beiaardklok. Het viel Lord Rayleigh (1894) reeds op dat géén der eigenfrequenties van de klokken overeenkwam met de toonhoogte van de slagtoon.

Pas recent is uit een experiment van Smoorenburg (1970) gebleken dat de lagere harmonischen toch van doorslaggevend belang kunnen zijn voor de toonhoogtewaarneming. Hij onderzocht toonhoogteverschuivingen naar het voorbeeld van De Boer. De geluiden bestonden echter uit slechts twee hoge frequentiecomponenten, bijvoorbeeld uit de achtste en de negende harmonische. Op grond van de resultaten moest geconcludeerd worden, dat componenten met lagere frequenties die niet in het geluid aanwezig waren, de toonhoogte bepaalden. Vervormingcomponenten die in het oor opgewekt worden en dichter bij of in het dominante gebied liggen bleken de oorzaak te zijn. (Op deze vervormingcomponenten zullen we nog terugkomen). Zelfs wanneer de vervormingcomponenten zeer zwak waren bleken ze toch bepalend te zijn voor de waargenomen toonhoogte. Maskering van deze vervormingcomponenten beïnvloedde de waargenomen toonhoogte duidelijk, in tegenstelling tot het eerder beschreven experiment van Licklider.

Kennelijk waren Groen en Hoogland dus terecht beducht voor vervormingcomponenten. Alleen blijkt niet, zoals zij redeneerden en onder meer door Licklider weerlegd werd, de verschilcomponent als een door vervorming opnieuw geïntroduceerde grondtoon een rol te spelen, maar kunnen blijkbaar vervormingcomponenten in het dominante gebied de toonhoogte bepalen. Voor de toonhoogtewaarneming in de praktijk is dit echter van weinig belang. Deze vervormingcomponenten zullen slechts aan de toonhoogtewaarneming bijdragen als de tonen zeker de eerste vijf harmonischen missen. Bij de telefoon bijvoorbeeld gaat door de beperkte bandbreedte wel een grondcomponent van de spraak verloren maar zeker niet het eerste vijftal harmonischen.

Nadat vast was komen te staan dat juist de harmonischen die door het gehoororgaan worden gescheiden, toonaangevend zijn bij de toonhoogtewaarneming en dat de toonhoogte dus niet gebaseerd kan zijn op de periodiciteit die door de hogere (niet gescheiden) harmonischen wordt doorgegeven, werden de toonhoogtetheorieën ontwikkeld in de richting van patroonherkenning. In deze theorieën wordt de toonhoogte bepaald door een patroon dat wordt verkregen uit het frequentiespectrum wanneer men rekening houdt met het beperkte frequentiescheidende vermogen en de dominantie van de derde, vierde en vijfde harmonische. Bij verschuiving van de frequentiecomponenten zoals deze door De Boer werd geïntroduceerd, voorspellen deze theorieën toonhoogteverschuivingen vergelijkbaar met de meetresultaten. Wanneer alle harmonischen bij een grondfrequentie van 200 Hz bijvoorbeeld met 30 Hz worden verhoogd, dan betekent een dominante vierde harmonische dat we een toonhoogteverschuiving zullen vinden die correspondeert met een frequentieverschuiving van 200 Hz naar  $(4 \times 200 + 30)/4 = 207,5$  Hz.

## Hifi-apparatuur en toch 25 procent vervorming in het oor

Al eerder brachten we naar voren dat er in het gehoororgaan vervorming van geluid kan optreden. Deze vervorming kan wel 25 procent bedragen; veel meer dan tegenwoordig bij hifi-apparatuur getolereerd wordt. Toch wordt er door de fabrikanten van deze apparatuur (met name door die van de pick-up elementen en luidsprekers) nog naarstig gestreefd naar het terugdringen van de vervorming omdat deze nog niet onhoorbaar is geworden. We zullen hier nader ingaan op deze schijnbare tegenstelling.

We spreken van vervorming in het gehoororgaan wanneer we deeltonen horen met toonhoogten die niet corresponderen met een frequentiecomponent van het geluid. We noemden reeds de verschiltoon die correspondeert met  $f_2 - f_1$  terwijl deze component niet in het geluid aanwezig is maar wel de componenten  $f_1$  en  $f_2$  ( $f_2 > f_1$ ). De vervormingcomponenten die in het hiervóór aangehaalde experiment van Smoorenburg een rol speelden in de buurt van het voor de toonhoogtewaarneming dominante gebied correspondeerden met  $2f_1 - f_2$ ,  $3f_1 - 2f_2$  en  $4f_1 - 3f_2$ . Al deze door het gehoororgaan geïntroduceerde vervormingcomponenten worden combinatietonen genoemd omdat ze corresponderen met (eenvoudige) combinaties van de frequenties van de geluidscomponenten.

Combinatietonen zijn reeds lang bekend. Musici zoals Sorge, Romieu en Tartini rapporteerden ze al rond 1750. Sinds het boek van Von Helmholtz uitkwam (1863) werden ze beschouwd als tamelijk vanzelfsprekende vervormingsprodukten. Von Helmholtz liet zien dat dit soort vervormingsprodukten kunnen ontstaan wanneer een trillend object niet precies de aandrijvende kracht kan volgen. Dit zou dan ook kunnen gelden voor het trommelvlies dat door het geluid in trilling

wordt gebracht. Naarmate de aandrijvende kracht groter wordt zal het trillende object minder goed volgen en zullen de vervormingcomponenten sterker worden. In deze visie zullen combinatie-tonen dus vooral voorkomen bij hoge geluidsniveaus. Onderzoek van *Goldstein* die in **1966/67** uit de Verenigde Staten als gast in het Instituut voor Perceptie-Onderzoek te Eindhoven werkzaam was, liet echter zien dat sommige combinatie-tonen reeds bij lage geluidsniveaus in sterke mate aanwezig kunnen zijn.

Goldstein voegde aan geluid dat slechts uit de frequentiecomponenten  $f_1$  en  $f_2$  bestond, een frequentiecomponent  $2f_1 - f_2$  toe en kon door de amplitude en fase van deze component te variëren een amplitude en fase vinden waarbij de combinatie-toon corresponderend met  $2f_1 - f_2$  uitdoofde. Zo werd dus een omgekeerde situatie bereikt. Waar eerst de combinatie-toon gehoord werd terwijl er geen component  $2f_1 - f_2$  in de stimulus aanwezig was, ontstond nu een situatie waarin de combinatie-toon niet meer gehoord werd, terwijl de component  $2f_1 - f_2$  aan de stimulus was toegevoegd. De sterkte van de combinatie-toon werd afgeleid uit de amplitude van de toegevoegde component  $2f_1 - f_2$  waarbij de combinatie-toon uitdoofde. Deze amplitude bleek bij frequentieverschillen van vijftien procent ( $f_2/f_1 = 1,15$ ) ongeveer vijftwintig procent van de amplitudes van  $f_1$  en  $f_2$  te bedragen. Tevens bleek deze vijftwintig procent niet te veranderen wanneer het geluidsniveau van de stimulus werd gevarieerd over een groot bereik tot vlak boven de waarnemingsdrempel. Goldstein sprak daarom van een essentieel niet-lineair gedrag van het gehoororgaan in tegenstelling tot de eerder door Von Helmholtz voorgestelde vervorming die toeneemt met het verhogen van het geluidsniveau.

Sinds deze resultaten bekend werden is er veel onderzoek aan combinatie-tonen verricht. Ook andere niet-lineaire verschijnselen werden onderzocht zoals het

minder sterk worden van een toon wanneer een tweede sterkere toon van een iets andere frequentie wordt toegevoegd. Dit verschijnsel staat bekend als laterale suppressie. Een recente vondst is dat er zelfs geluid uit het oor naar buiten treedt. We kunnen het oor dus ook in letterlijke zin beluisteren, zij het dat dit geluid zeer zwak is. In het uitgestraalde geluid worden de combinatie-tonen teruggevonden.

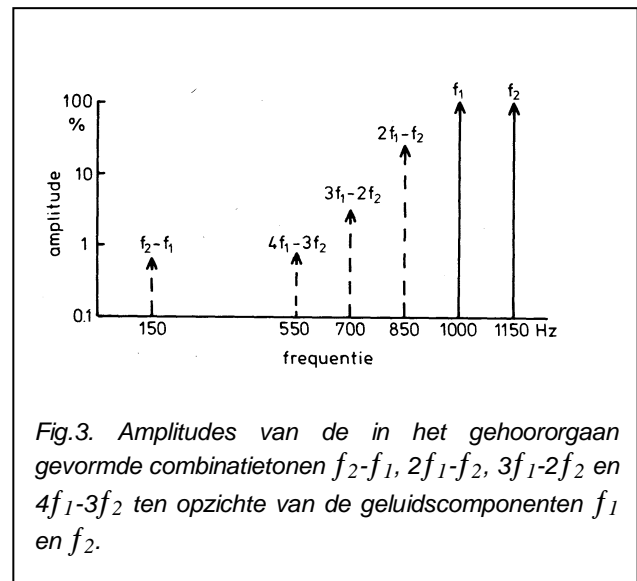


Fig.3. Amplitudes van de in het gehoororgaan gevormde combinatie-tonen  $f_2 - f_1$ ,  $2f_1 - f_2$ ,  $3f_1 - 2f_2$  en  $4f_1 - 3f_2$  ten opzichte van de geluidscomponenten  $f_1$  en  $f_2$ .

Dit resultaat en de mogelijkheid de combinatie-toon met een stimuluscomponent te elimineren wijzen op een oorsprong van de combinatie-toon die vooraan in het gehoororgaan moet zijn gelegen. Anderzijds is echter gebleken dat de combinatie-tonen  $2f_1 - f_2$ ,  $3f_1 - 2f_2$  en  $4f_1 - 3f_2$  tijdelijk in sterkte terugvallen nadat het oor is blootgesteld aan geluid van zo'n hoog niveau dat de fysiologische conditie van de receptorcel (de haarcel) in het slakkenhuis en van de zenuw tijdelijk zijn aangetast. Dit wijst op een wat verder gelegen oorsprong van deze combinatie-tonen. Waarschijnlijk ligt hun oorsprong in het slakkenhuis en wel in het receptororgaan zelf (in het orgaan van Corti).

Aangezien we nog weinig weten van de omzetting van de geluidstrillingen in zenuwactiviteit die in dit receptororgaan plaatsvindt kan juist de studie van

combinatietonen bijdragen aan onze kennis van deze omzetting.

We kunnen ons nu afvragen waarom de vervorming in hifi-apparatuur zo gering moet zijn als het gehoororgaan zulke sterke combinatietonen voortbrengt. Het antwoord is dat in het gehoororgaan sterke combinatietonen zoals  $2f_1 - f_2$  en  $3f_1 - 2f_2$  slechts ontstaan als de frequenties van de geluidscomponenten dicht bij elkaar liggen. In dat geval liggen de combinatietonen ook dicht bij de geluidscomponenten en vallen daarom niet op (zie fig. 3).

### G.F. Smoorenburg (1943)

*Is wetenschappelijk medewerker in de afdeling Audiologie van het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg en sinds kort ook verbonden aan de afdeling Keel-, Neus- en Oorheelkunde van de Faculteit der Geneeskunde te Utrecht. Hij verrichtte onderzoek op het gebied van de toonperceptie, elektrofysiologie van het gehoororgaan en lawaaislechthorendheid.*

### R. Plomp (1929)

*Is hoofd van de afdeling Audiologie van het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg en buitengewoon hoogleraar in de experimentele audiologie aan de Faculteit der Geneeskunde van de Vrije Universiteit te Amsterdam. Zijn terrein van onderzoek is de toonperceptie en de spraakperceptie van normaal- en slechthorenden.*

In feite vereist het oefening om deze combinatietonen te kunnen horen. Voorts vallen deze combinatietonen ook niet op wanneer de geluidsterkte wordt gevarieerd omdat hun sterkte in vrijwel gelijke mate mee varieert.

Wanneer combinatietonen relatief sterker zouden worden bij toenemend geluidsniveau dan mag men wel verwachten dat ze worden opgemerkt. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de verschiltoon  $f_2 - f_1$  die echter bij middelmatige geluidsniveaus nog maar

zeer zwak door het gehoororgaan wordt voortgebracht.

Het horen van een verschiltoon kan daarom zowel het gevolg zijn van vervorming in het gehoororgaan als van vervorming in de geluidswaergave. Vervorming in de geluidswaergave wordt al gauw duidelijk wanneer deze leidt tot het ontstaan van boventonen ( $2f_1$ ,  $3f_1$ , enz.) en somtonen ( $f_1 + f_2$ ,  $2f_1 + f_2$ , enz.). Deze tonen worden namelijk vrijwel niet gevonden als producten van vervorming in het gehoororgaan.

### Op toon gebrachte zenuwcellen

We hebben vastgesteld dat het gehoororgaan een toon scheidt in een aantal deeltonen die corresponderen met frequentiecomponenten van het geluid en we zullen laten zien dat dit frequentiescheidend-vermogen is terug te vinden in de gehoorzenuw. Daartoe plaatsen we bij een proefdier een micro-elektrode met een punt ter dikte van enige microns in de zenuwbundel zo dicht mogelijk bij het slakkenhuis, zie fig. 4a. Met de micro-elektrode zijn we in staat aan afzonderlijke zenuwcellen te meten. De activiteit van de zenuwcel uit zich op de elektrode als kortdurende spanningssprongen, zie fig. 4b.

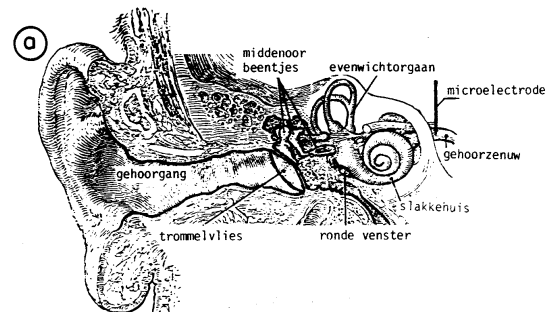
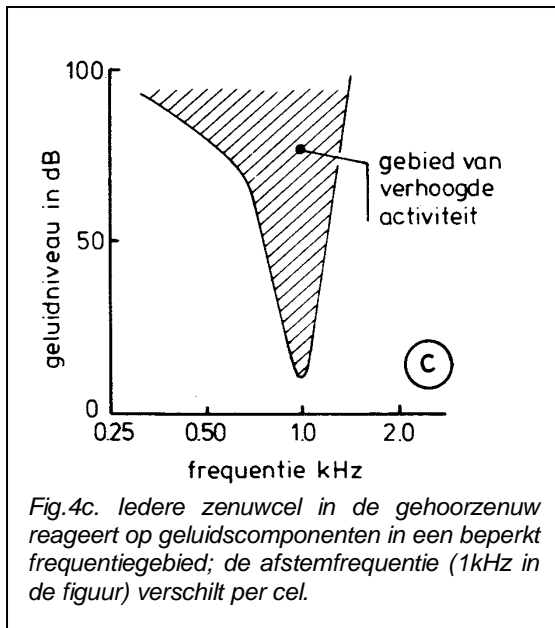


Fig. 4a. Het menselijk gehoororgaan. De positie van de micro-elektrode in de gehoorzenuw is ook aangegeven alhoewel deze vanzelfsprekend niet in de gehoorzenuw van een mens maar in die van een proefdier wordt geplaatst.



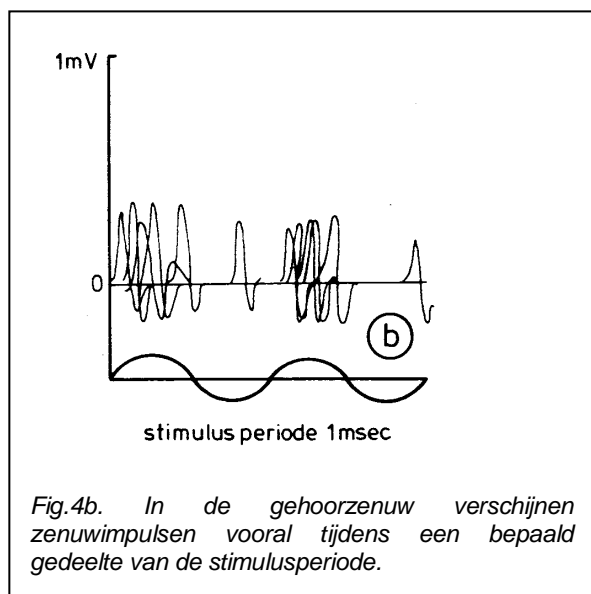


Grootte en vorm van deze spanningssprongen, ook wel zenuwimpulsen genoemd, worden niet door de stimulus beïnvloed. De stimulus is slechts van invloed op het aantal impulsen dat per seconde door de zenuwcel wordt afgevuurd en de momenten waarop deze impulsen verschijnen. In afwezigheid van geluid vuren de meeste cellen in de gehoorzenuw al spontaan impulsen af, soms tot wel 100 per seconde. Bij stimulatie met geluid kan de zenuwactiviteit oplopen tot 500 impulsen per seconde. De activiteit blijkt af te hangen van de stimulusfrequentie. In ons voorbeeld van fig. 4c vinden we bij een laag geluidsniveau slechts voor stimulusfrequenties rond 1 kHz een verhoging ten opzichte van de spontane activiteit. Naarmate het geluidsniveau wordt verhoogd neemt het frequentiegebied waarover verhoogde activiteit wordt gemeten toe. De grens van het gebied van verhoogde activiteit vormt een afstemkromme. Een dergelijke afstemkromme wordt voor iedere zenuwcel gevonden. De afstemfrequentie (1 kHz in fig. 4c) verschilt echter per zenuwcel. Er blijkt een duidelijke relatie te bestaan tussen de ruimtelijke ordening van de zenuwcellen en de frequentieschaal. Voor de hersenen betekent verhoogde activiteit

in een bepaalde zenuwcel dus dat het geluidsc componenten in een bepaald frequentiegebied bevat.

De aanwezigheid van een bepaalde frequentiecomponent in het geluid kan niet alleen worden afgeleid uit verhoogde activiteit van een bepaalde zenuwcel maar ook uit de momenten waarop de zenuwimpulsen verschijnen. Dit is te zien in fig. 4b waar we de zenuwimpulsen die verschenen gedurende sinusvormige stimulatie hebben weergegeven ten opzichte van twee perioden van de sinus. De zenuwimpulsen blijken niet gelijkmatig over de perioden verspreid voor te komen, maar vooral tijdens een bepaald gedeelte van de perioden. Op ieder moment is de kans dat een zenuwimpuls wordt afgevuurd afhankelijk van de golfvorm. Het is zelfs mogelijk de golfvorm van de stimulus terug te construeren uit de momenten waarop de zenuwimpulsen worden afgevuurd. Een resultaat hiervan zullen we laten zien in fig. 5b.

Het zal duidelijk zijn dat in fig. 4b niet de reactie van de zenuwcel op slechts twee perioden is weergegeven want dit zou bij een stimuluscomponent van 1000 Hz een zenuwactiviteit betekenen van vele duizenden impulsen per seconde. Zelfs zenuwcellen in de gehoorzenuw kunnen dit



niet bijbenen. Fig. 4b zou echter wel goed de gezamenlijke activiteit van een aantal zenuwcellen kunnen voorstellen die

ongeveer op dezelfde frequentie zijn afgestemd. In het tijdpatroon van deze gezamenlijke activiteit is dus duidelijk informatie aanwezig over de frequentie van een geluidscomponent. Het is evenwel nog steeds een open vraag of bij de waarneming deze informatie door de hersenen ook wordt gebruikt. Gaan we nu terug naar de combinatie tonen dan zou het inmiddels duidelijk kunnen zijn hoe deze zouden kunnen worden aangetoond in de zenuwactiviteit. We zoeken daartoe bijvoorbeeld een zenuwcel op die is afgestemd op 1000 Hz. Sinusvormige stimulatie met  $f_1 = 1400$  Hz of met  $f_2 = 1800$  Hz geeft geen verhoging van de zenuwactiviteit te zien. Presenteren we die twee frequentiecomponenten echter tegelijkertijd, dan wordt wel een verhoging van de activiteit gevonden.

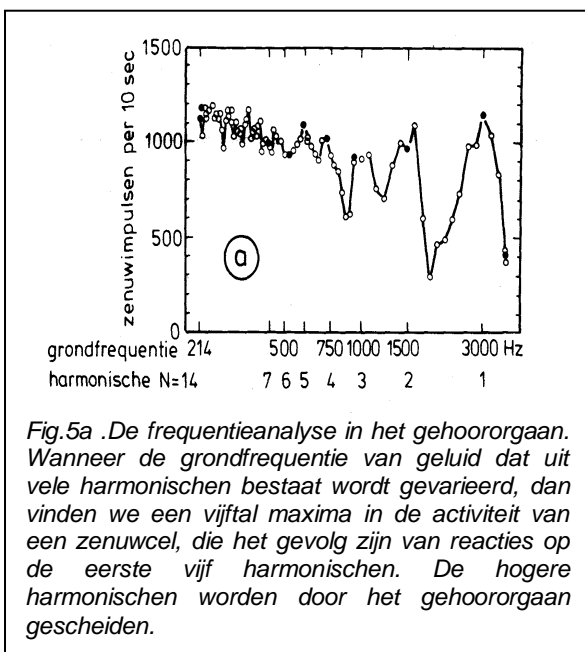


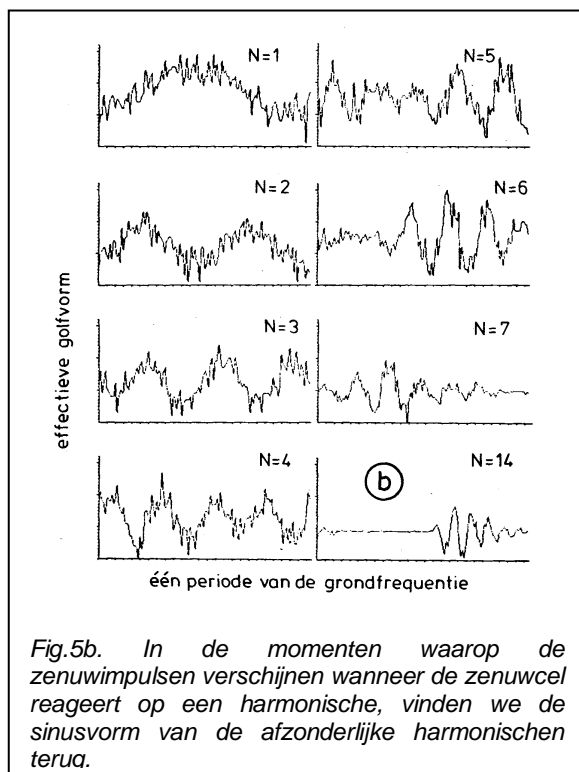
Fig.5a .De frequentieanalyse in het gehoororgaan. Wanneer de grondfrequentie van geluid dat uit vele harmonischen bestaat wordt gevarieerd, dan vinden we een vijftal maxima in de activiteit van een zenuwcel, die het gevolg zijn van reacties op de eerste vijf harmonischen. De hogere harmonischen worden door het gehoororgaan gescheiden.

Tevens blijkt dan het tijdpatroon van de zenuwimpulsen te wijzen op een frequentiecomponent van 1000 Hz. Deze frequentie komt overeen met die van de combinatie toon  $2f_1 - f_2$ . Een kleine verandering van de frequentie  $f_1$  of  $f_2$  wordt gevolgd door een verandering in het tijdpatroon van de zenuwimpulsen zodanig dat dit patroon blijft corresponderen met  $2f_1 - f_2$ . Hiermede is de aanwezigheid van de combinatie toon in de zenuwactiviteit

die het slakkenhuis afgeeft ruimschoots aangetoond. Andere combinatie tonen kunnen op soortgelijke wijze elektrofyysiologisch worden aangetoond. Tevens kan de sterkte van de combinatie tonen worden afgeleid uit het aantal zenuwimpulsen dat per seconde wordt afgevuurd. Het resultaat komt goed overeen met de psychofysisch gevonden sterkte van de combinatie tonen.

Gaan we nog een stap terug naar hetgeen we schreven over het vermogen van het gehoororgaan ongeveer de eerste vijf harmonisch en te kunnen scheiden, dan kunnen we ook dat fraai demonstreren aan de hand van elektrofyysiologische meetresultaten. Als voorbeeld gaan we uit van een zenuwcel die is afgestemd op 3000 Hz. We presenteren geluiden bestaande uit vele harmonischen die elkaar vanaf de grondcomponenten opvolgen en van gelijke sterkte zijn. Nemen we als grondfrequentie 3000 Hz, dan vinden we een duidelijke verhoging van de zenuwactiviteit. Vervolgens zouden we kunnen nagaan of zenuwcellen die op 6000 Hz zijn afgestemd ook een verhoogde activiteit vertonen vanwege de aanwezigheid van de tweede harmonische in het geluid. Zo'n cel kan echter niet even vlug met de elektrode worden aangeprikt. Handiger is het daarom de grondfrequentie te verlagen tot 1500 Hz zodat de tweede harmonische op de afstemfrequentie van de reeds aangeprikte zenuwcel terecht komt. Fig. 5a laat zien wat we vinden als de grondfrequentie systematisch wordt verlaagd. In de zenuwactiviteit zijn vijf maxima te onderscheiden die geïnterpreteerd kunnen worden als reacties op de eerste vijf harmonischen. Links daarvan, bij de lagere grondfrequenties, vinden we slechts wisselingen in de curve die het gevolg zijn van statistische fluctuaties in de zenuwactiviteit. De vijf maxima komen mooi overeen met het resultaat uit de psychofysica waar we ook vijf harmonischen bleken te kunnen onderscheiden.

Wij gaven reeds aan dat het mogelijk is de golfvorm terug te construeren uit de momenten waarop de zenuwimpulsen worden afgevuurd. Het resultaat hiervan wordt getoond in fig. 5b. In elk plaatje is de gevonden golfvorm uitgezet ten opzichte van de periode van de grondcomponent. De eerste vier harmonischen blijken als zuivere sinussen te voorschijn te komen, afgezien van statistische fluctuaties. (Dit resultaat is te vergelijken met de toelichting op het begrip frequentieanalyse). Daarboven wordt steeds duidelijker een amplitudemodulatie van de sinussen zichtbaar. Deze modulatie betekent dat naast elkaar liggende harmonischen niet geheel worden gescheiden. We zien hoe met de modulatie de periodiciteit van de grondfrequentie terugkomt in de zenuwactiviteit.



Zoals we al eerder beschreven dacht Schouten dat deze periodiciteit van de zenuwactiviteit een rol zou kunnen spelen bij de toonhoogtewaarneming; een gedachte die tegenwoordig in twijfel wordt getrokken omdat de derde, vierde en vijfde

harmonische dominant bleken te zijn bij de toonhoogtewaarneming.

## Slotakkoord

In dit korte bestek hebben we ons bij de psychofysica beperkt tot de toonperceptie.

Onderwerpen als geluiddetectie, timbreperceptie om niet te spreken van spraakperceptie werden niet aangeroerd. Juist de toonperceptie werd hier naar voren gebracht omdat Nederlandse onderzoekers daaraan internationaal gezien een bijdrage van betekenis hebben geleverd. Verder hebben we ons bij de elektrofysiologie beperkt tot illustraties uit eigen werk van hetgeen bij psychofysica aan de orde kwam. We willen dit artikel echter niet besluiten zonder nog in het kort een actueel praktisch onderwerp te belichten.

De afstemkromme die in fig. 4c getoond werd kan ook psychofysisch gemeten worden. Aangezien we vanzelfsprekend niet in staat zijn de activiteit in een bepaald zenuwkanaal selectief waar te nemen, roepen we naast de meettoon de hulp in van een tweede toon, de hulptoon, die op een laag geluidsniveau wordt aangeboden. Daarmee proberen we te bereiken dat slechts een klein aantal zenuwcellen afgestemd op de frequentie van de hulptoon wordt geactiveerd. In plaats van het meten van een verhoogde activiteit van de zenuwcel gaan we nu na bij welke frequenties en geluidsniveaus de hulptoon onhoorbaar wordt (gemaskeerd wordt) door de meettoon. Op deze wijze kan ook een afstemkromme worden gemeten. Een soortgelijke techniek kan worden gebruikt wanneer we elektrofysiologische metingen verrichten op enige afstand van de gehoorzenuw zoals dat ook bij mensen kan worden gedaan. Net zo min als in de psychofysica kunnen we dan selectief aan één zenuwcel meten; op afstand meten we slechts de activiteit van de gehele zenuwbundel. Ook dan kunnen we gebruik maken van een hulptoon op een laag geluidsniveau. We mogen dan weer

aannemen dat het elektrofysiologische signaal afkomstig is van een beperkt aantal zenuwcellen afgestemd op de frequentie van de hulpton.

Voor frequenties van geluidsniveaus van de meettoon die overeenkomen met het gebied van verhoogde activiteit in fig. 4c vinden we nu een reductie van de door de hulpton veroorzaakte zenuwactiviteit. De grens van het gebied waarin reductie wordt waargenomen vormt weer een afstemkromme.

We gaan nu na wat er met de op verschillende wijzen gemeten afstemkrommen gebeurt als iemand slechthorend is, bijvoorbeeld ten gevolge van blootstelling aan te veel lawaai. We vinden dan pas een reactie op het geluid bij hogere geluidsniveaus: het gehoororgaan is minder gevoelig geworden. Voor de afstemkromme betekent dit dat de punt van de kromme naar boven verschuift. De flanken van de afstemkromme blijken echter niet evenwijdig mee naar boven te verschuiven. De afstemkromme wordt breder! Dit betekent dat het frequentiescheidend vermogen is teruggelopen. Voor de praktijk betekent dit dat deze slechthorenden minder goed in staat zullen zijn waarschuwingssignalen in een lawaaiige omgeving op te vangen of spraak in geroezemoes te verstaan. In omgevingslawaai zullen deze slechthorenden ook vaak niet gebaat zijn bij een hoortoestel. De geluidsniveaus zijn dikwijls zo hoog dat men ook zonder hoortoestel best iets hoort, maar men is niet in staat het belangrijke geluid te onderscheiden van het stoorlawaai. Het hoortoestel versterkt zowel het gewenste geluid als het lawaai terwijl de slechthorende behoefte heeft aan een versterking van het belangrijke geluid ten

opzichte van het lawaai. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden door een hulpmiddel dat gericht kan worden op de geluidsbron. In dit opzicht was de hoorn die vroeger door slechthorenden gebruikt werd nog niet zo gek. Daarnaast moet men denken aan een betere akoestiek. Gezien de snelle opmars van de micro-elektronica zijn in de toekomst wellicht ook handzame hulpmiddelen te ontwikkelen die met behulp van signaalbewerkingstechnieken de invloed van het stoorlawaai op de waarneming kunnen terugdringen. Daarbij zal het zeer belangrijk zijn te weten, speciaal voor de slechthorende, welke facetten van geluid en taal belangrijk zijn bij de spraakperceptie.

## Literatuur

**H. van Helmholtz**, *Die Lehre von den Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, F. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1913.

**H. L. F. von Helmholtz**, *On the Sensations of Tone*, Dover Publications, New York, 1954 (vertaling).

**R. Plomp**, *Aspects of Tone Sensation*, Academic Press, London, 1976.

**B. C. J. Moore**, *Introduction to the Psychology of Hearing*, The MacMillan Press, Ltd., London, 1977.

intermediair 18<sup>e</sup> jaargang 7  
19 februari 1982