

SPECTRUM EN
MODERNE GEHOORTHEORIE

dr. ir. F. A. Bilsen

SPECTRUM EN MODERNE GEHOORTHEORIE

Rede

uitgesproken bij de openbare aanvaarding
van het ambt van gewoon lector
in de theoretische en toegepaste natuurkunde,
in het bijzonder de biologische natuurkunde,
aan de Afdeling der Technische Natuurkunde
van de Technische Hogeschool te Delft
op vrijdag 19 maart 1976
door

Dr. Ir. F. A. Bilsen

Uitgeverij Waltman B.V. - Delft

*Mijne heren leden van het College van Bestuur en van de Hogeschoolraad,
mijnheer de Rector Magnificus,
mijne heren Dekanen,
dames en heren leden van de Afdeling der Technische Natuurkunde,
en voorts U allen die door Uw aanwezigheid blijkt geeft van Uw belang-
stelling,*

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Lang heb ik nagedacht over de titel van deze openbare les. "Het ene oor in, het andere oor uit" was aanvankelijk mijn keus, doch ik bedacht me dat het een vreemde indruk zou wekken als iemand ter gelegenheid van de openbare proeve van bekwaamheid als docent zich tot zijn gehoor zou richten onder dit motto. Immers met "het ene oor in, het andere oor uit" geven we een richting aan van de informatiestroom die in het algemeen niet onze voorkeur geniet. Nee, diegenen die op de hoogte zijn van mijn vakgebied, zullen vermoeden dat ik met deze titel een positiever doel voor ogen zou hebben gehad. Onder het motto "Het ene oor in, het andere oor uit" zou ik met U een reis kunnen maken langs de gehoorbaan, een verkenningsstocht door het auditieve systeem, te beginnen in de periferie (het ene oor), dan via de afferente zenuwbanen naar het centrale zenuwstelsel, naar de locaties van de subjectieve waarneming, en daarna via de binaurale interactiemechanismen en het efferente zenuwstelsel terug naar de periferie, het andere oor.

Toch wil ik een dergelijke doortocht met U gaan maken, zij het onder een andere titel en meer gericht op de perceptie (de waarneming) dan op de anatomie. Ik wil dit doen in de vorm van een les. Ik zal proberen die les op een didactisch verantwoorde wijze te geven, zodat ik het bovenvermelde nederlandse gezegde geen eer aandoe. Wellicht wordt voor de ingewijden onder U dit verhaal daardoor juist een aanleiding tot dit gezegde. Om dit te voorkomen wil ik door een gerichte keuze van de onderwerpen trachten hen te bewegen hun oren te luisteren te leggen, met name door hen mijn visie te geven op belangrijke aspecten van de theorie van het horen. Ik wil me daarbij beperken tot die aspecten van de auditieve waarneming waarbij het spectrum van een geluidssignaal een essentiële rol speelt. Ik meen daarmee tevens de belangrijkste ontwikkelingen van de laatste jaren aan te kunnen geven. In dit verband zou de

voor *Mieke*
Frank
Inge

titel van mijn verhaal ook heel passend kunnen luiden: "Spectrum en moderne gehoortheorie" of wellicht beter: "Intern spectrum en moderne gehoortheorie" of ook: "Centraal spectrum en moderne gehoortheorie". Ik heb voor het eerste gekozen. Maar laat ik nu mijn speurtocht naar het centraal spectrum beginnen met Uw kennis over geluidtrillingen op te frissen.

Een relevant proefje^{o)} in dit verband is het objectief en subjectief vergelijken van twee gelijkvormige objecten van verschillende absolute grootte (bijv.: twee stemvorken, of twee kerkklokken). Uit ervaring weten we dat twee gelijkvormige voorwerpen van verschillende afmeting een zelfde klankkleur of timbre teweegbrengen, maar een verschillende toonhoogte. De toonhoogte schijnt te maken te hebben met de afmetingen van de voorwerpen. Dit is eenvoudig te verifiëren door een bandopname te maken van bijv. een kleine kerkklok en deze bandopname vertraagd af te spelen. We kunnen dan constateren, dat naast het timbre ook de toonhoogte gelijk is geworden aan die van een grotere klok, indien de snelheidsverhouding van opname en weergave gelijk is aan de verhouding van de afmetingen van beide klokken. Hieruit kunnen een aantal dingen worden geconcludeerd. Het nagenoeg gelijk zijn van toonhoogte en timbre betekent dat de geluidtrillingen aan ons trommelvlies nagenoeg gelijk zijn, en dus moeten ook de trillingspatronen van de grootte en de (getransformeerde) kleine klok gelijk zijn. Dit heeft implicaties voor de modelregels in de akoestiek. Een tweede, wellicht op het eerste gezicht triviale conclusie: verlaging van de weergeefsnelheid heeft een verlaging van de frekwenties tot gevolg. Lagere frekwenties geven dus blijkbaar aanleiding tot lagere toonhoogten.

Het feit dat de mens in staat is hoge en lage tonen te horen, dus hoge en lage frekwenties te onderscheiden, bracht von Helmholtz¹⁾ er toe te veronderstellen dat zich in het binnenoer van de mens resonantiekringen bevinden in de vorm van snaren die op verschillende frekwenties zijn afgestemd. Hiermee was de opvatting van het oor als spectrale analysator geboren. Latere metingen aan het binnenoer, met name het basilaire membraan, leerden dat we te maken hebben met een continuum van resonantiekringen, nl. een membraan-vloeistof systeem met continu verlopende eigenschappen zoals massa en stijfheid. Deze metingen werden met verschillende fysische methoden doorgevoerd.

Von Békésy²⁾ bekeek het basilaire membraan met een microscoop onder stroboscopische belichting. Johnstone en Boyle³⁾ en later Rhode⁴⁾ maakten gebruik van het Mössbauer effect om de snelheid (en daaruit de uitwijking) van het basilaire membraan op een bepaalde plaats te bepalen. Zij brachten daartoe langs operatieve weg een ⁵⁷Co-deeltje van 0.3 μ gram aan op het membraan en maten de Doppler verschuiving in de frekwentie van de door het cobalt uitgezonden gamma-straling, die verband houdt met de snelheid van het met het membraan gekoppelde cobalt-deeltje. Een maat voor de Doppler verschuiving was de graad van verstemming in de nucleaire resonantie absorptie van een in de nabijheid van het preparaat geplaatst ⁵⁷Fe-folie, gemeten met een scintillatieteller. Weer een geheel andere methode werd toegepast door Wilson⁵⁾; hij gebruikte een capacitieve probe parallel aan het membraan om de uitwijkingen daarvan te registreren. De jongste ontwikkelingen wijzen op een succesvolle toepassing van laserlicht; Kohlöffel⁶⁾ heeft als eerste de trillingen van het basilaire membraan met laserlicht zichtbaar gemaakt. Toepassing van laserinterferometrie biedt zeker ook goede perspectieven, maar dit zal nog nader moeten worden onderzocht. Zoals algemeen in de fysica, bestaat hier het streven de beïnvloeding van het meetobject door de meetmethode, te minimaliseren.

Het verbluffende resultaat van dit soort metingen is dat door extrapolatie naar de gehoordrempel, amplitudes van het basilaire membraan worden verkregen in de grootteorde van 10^{-3} tot 1 \AA , ja U heeft het goed verstaan: 10^{-11} tot 10^{-8} cm. Verder hebben de metingen geleerd dat bij benadering, de omhullende van het trillingspatroon van het basilaire membraan er op logaritmische schalen uit ziet als een driehoek wanneer geëxciteerd wordt met een sinustoon. Daarbij bedragen de hellingen zo'n 100 dB/oct aan de laag-frekwente kant en 24 dB/oct aan de hoog-frekwente kant. D.w.z. dat als de uitwijking van een bepaalde plaats van het membraan bij een frekwentie f_0 1000 Å bedraagt, deze bij $2f_0$ slechts het honderdste deel daarvan bedraagt. Met recht mag men het membraan dus een frekwentiefilter noemen. Hoge frekwenties brengen het basale deel in trilling, lage frekwenties het apicale deel.

Eenzelfde frekwentie analyserend gedrag vindt men terug in de neuronale responsies van zenuwcellen in de auditieve periferie; dit is o.a. door Kiang⁷⁾ bij de kat aangetoond. Het blijkt^{o)} namelijk dat de neuro-

nale activiteit in een zenuwvezel van de gehoorzenuw, het aantal actie-potentialen per tijdseenheid, sterk afhankelijk is van de frekwentie waarmee het oor van het proefdier wordt gestimuleerd. Er is een duidelijk maximum bij één bepaalde frekwentie. De discrepantie die nog lijkt te bestaan tussen de steile mechanische excitatie en de nog steilere neuronale excitatie is aanleiding tot het zoeken naar het zogenaamde "tweede filter" op het niveau van de haarcellen.

Wat gebeurt er nu als we een harmonisch geluid, opgebouwd uit vele boventonen (harmonischen), aanbieden aan het oor? Aangezien de excitatiepatronen op logaritmische schaal, in eerste benadering, voor alle frequenties gelijk zijn, overlappen de excitatiepatronen van de afzonderlijke harmonischen méér naarmate zij een hoger rangnummer hebben. Een dergelijk signaal met een grondfrekwentie van bijv. 200 Hz klinkt tonaal. Door intensief luisteren kan men harmonischen uithoren^{o)}. Dit uithoren kunnen we vergemakkelijken door de desbetreffende harmonische tijdelijk uit het signaal te verwijderen en deze daarna weer te introduceren. Na het moment van inschakelen nemen we deze harmonische als een zuivere toon waar. Blijkbaar wordt hij "gescheiden" van de andere harmonischen op het basilaire membraan gerepresenteerd. Dit bevestigt de frekwentie-analyse in het binnenoor.

Nauw met deze belangrijke eigenschap hangt samen het feit dat niet ieder geluid gemaskeerd kan worden door elk ander geluid^{o)}. Bijv. spraak opgebouwd uit de oneven octaafbanden 1,3,5,7 (verkregen door spraak te filteren met een multi-octaaf filter) kan alleen gemaskeerd worden door witte stoorruis of door stoorruis bestaande uit dezelfde octaafbanden. Het spraaksignaal wordt veel minder gemaskeerd door stoorruis bestaande uit de even octaafbanden 2,4,6,8. De reden is weer dat de octaafbanden op afzonderlijke plaatsen in de cochlea worden gerepresenteerd.

Dames en heren, een vraag van commercieel belang voor akoestici en fabrikanten van geluidswaerapparaat is, aan welke eisen de apparatuur moet voldoen om een natuurgetrouwe (z.g. "high fidelity") weergave te kunnen bewerkstelligen. Beperken we ons bij het beantwoorden van deze vraag tot voor het oor stationaire geluidsignalen. Allereerst, wat is stationair? Uit oude en recente onderzoeken is gebleken dat periodieke signalen met een grondfrekwentie boven ruwweg 200 Hz als stationair mogen worden beschouwd. Dat wil zeggen: het oor, en met name

het tijdmechanisme in het oor, is niet of nauwelijks in staat periodieke fluctuaties sneller dan 200 Hz te volgen en te percipiëren als "luidheidsvariëaties" of als "ruwheid". Een dergelijk signaal klinkt tonaal en consonant. Wanneer het elektrisch signaal door een luidspreker of hoofdtelefoon wordt omgezet in akoestisch signaal ondergaat het verschillende veranderingen. Amplitude en fase van de verschillende harmonischen worden namelijk op een verschillende manier beïnvloed door het overdrachtkanaal. We kunnen ons nu afvragen of deze veranderingen in de fase waarneembaar zijn.

Experimenten met signalen bestaande uit drie of meer opeenvolgende harmonischen geven duidelijk aan dat het oor niet fase-doof is zoals vroeger veelal werd verondersteld. Recente onderzoeken⁸⁾ hebben aangetoond dat de gevoeligheid van het gehoor voor veranderingen in de fase van een van de drie componenten in bijv. een drie-componenten signaal verklaard kan worden met behulp van combinatie-tonen. Een combinatie-tonen is een door niet-lineaire vervorming in het binnenoor gegenereerde (interne) component, die zich blijkens psychofysische en electrofysiologische metingen⁹⁾ gedraagt als een akoestische (externe) component. Deze combinatie-tonen bezitten de frequenties $2f_1-f_2$, $3f_1-2f_2$ etc., indien het oor gestimuleerd wordt met f_1 en f_2 .

Wanneer gestimuleerd wordt met drie componenten, dan vindt er in het binnenoor een interactie plaats tussen de laagste akoestische component en de combinatie-tonen van dezelfde frequentie. Deze interactie is wiskundig te beschrijven als een vectoroptelling. Het resultaat van deze vectoroptelling is logischerwijze afhankelijk van de fazen van de drie akoestische componenten onderling. Hieruit blijkt dus dat het "interne spectrum" zoals dat in het binnenoor ontstaat weliswaar wordt bepaald door het akoestische spectrum, maar niet identiek daaraan gelijk is. Bepaling van het hoorbaarheidsgebied van faseveranderingen en het hoorbaarheidsgebied van combinatie-tonen heeft de relatie tussen deze vorm van niet-lineaire vervorming en fasegevoeligheid van het gehoor onomstotelijk vastgesteld.

Enige conclusies die men kan trekken zijn de volgende. Alleen akoestische componenten die relatief dicht bij elkaar gelegen zijn (frequentieverhouding niet groter dan 1.3) zijn in staat combinatie-tonen op te wekken. Deze constatering is van praktisch belang voor akoestici.

Zij zijn gewend luidsprekers objectief, zowel als subjectief, te testen met een blokvormige geluidtrilling. Aangezien echter de blokgolf fourier-componenten heeft met alleen een oneven rangnummer en met afnemende amplitudo, hetgeen betekent dat de componenten die een rol spelen ver uit elkaar liggen, is een dergelijk signaal nauwelijks in staat combinatietonen te vormen en is het dus faze-ongevoelig. Een veel beter test-signaal voor de praktijk is een uit de digitale signaaltechniek bekend signaal, nl. de maximum-lengte-reeks. Dit signaal bevat even en oneven harmonischen van gelijke sterkte, waarvan de fazen pseudo-stochastisch zijn verdeeld.

Een constatering van meer algemene strekking is dat bij het onderzoek van combinatietonen en fazegevoeligheid door verschillende onderzoekers de psychofysische en de electrofysiologische methode met succes naast elkaar zijn gebruikt. Dit heeft geleid tot een aanzienlijke vergroting van ons inzicht in de fundamentele processen. Het lijkt een veelbelovende onderzoekfilosofie te zijn deze beide methoden steeds met gebruikmaking van dezelfde akoestische signalen naast elkaar toe te passen.

De belangrijkste conclusie voor de fundamentele kant van het probleem is evenwel de reeds genoemde relatie tussen fazegevoeligheid en intern spectrum. Geloofde men tot voor kort nog in fazegevoeligheid als een bewijs voor het vermogen van het gehoor de tijdinformatie van een signaal te coderen én te gebruiken, dit is slechts waar voor signalen met een grondfrequentie beneden ruwweg 200 Hz. Daarboven spelen de amplitudos van de interne spectrale componenten de belangrijkste rol. Een van de redenen dus waarom ik deze rede heb getiteld: "Spectrum en moderne gehoortheorie".

Een volgend argument stamt uit het onderzoek naar de toonhoogte van akoestische signalen. De waarneming van toonhoogte is wellicht een van de meest fascinerende aspecten van de auditieve perceptie. In een van zijn publikaties stelt de nobelprijswinnaar von Békésy: "Elke gehoortheorie is eigenlijk een toonhoogtetheorie". Met name de bovengenoemde ideeën en inzichten over frekwentieanalyse zijn sinds von Helmholtz sterk bevorderd door het toonhoogteonderzoek. Toonhoogte is een wezenlijk bestanddeel van de sensatie teweeggebracht door spraak en muziek. Vooral bij de klassieke muziek wordt het thema, de melodie, gedragen door individuele klanken, in de partituur aangegeven door noten en gekarakteriseerd door

een bepaalde toonhoogte. In de moderne serieuze muziek lijkt men dit principe te willen verlaten en meer aandacht te schenken aan het timbre, de klankkleur, zoals dat wordt geproduceerd door afzonderlijke instrumenten en groepen van instrumenten. Doch men ontkomt er niet aan dat elke klank voortgebracht door een muziekinstrument, gerangschikt kan worden langs een schaal van hoog naar laag die de hoogte van het geluid aangeeft.

Een belangrijk experimenteel gegeven is dat men het timbre van muziek en spraak aanzienlijk kan veranderen zonder de toonhoogte, de melodie, of de spraakverstaanbaarheid drastisch te verminken. In de communicatietechniek wordt om economische redenen bandbreedte-reductie toegepast. En een meer alledaags voorbeeld: transistorradios, die vooral aan de laag-frekvente kant beperkt zijn in bandbreedte, zijn in staat een melodie onvervalst weer te geven. Het verschijnsel dat door bandbreedtereductie de toonhoogte niet verandert is door Schouten¹⁰⁾ in de jaren '40 uitvoerig onderzocht en door hem het "residu-effect" genoemd.

Later heeft vooral Ritsma¹¹⁾ aangetoond dat in het bijzonder de lagere harmonischen van een complex signaal in staat zijn deze zogenaamde residu-toonhoogte op te wekken. Ter verduidelijking denke men daarbij aan het volgende experiment. Door een complexe toon A bestaande uit frekwentiecomponenten met lage harmonische rangnummers wordt een melodie I voortgebracht als de grondfrequentie wordt gevarieerd in overeenstemming met de nootwaarde. Evenzo wordt met een complexe toon B bestaande uit hoge harmonischen een melodie II gespeeld. Worden beide melodieën tegelijk aangeboden, dan neemt men melodie I waar. Luisteren we naar II apart, dan is ook deze melodie te herkennen. Spelen we melodie II met complex A en melodie I met complex B, dan is natuurlijk melodie II overheersend. Een dergelijke proef^{o)} toont aan dat de lagere harmonischen domineren over de hogere bij de waarneming van toonhoogte.

Welke conclusie moet men uit dit simpele experiment trekken. Zoals we hiervoor gezien hebben, worden de lagere harmonischen van een complex signaal beter geanalyseerd door het binnenoer dan de hogere. Dacht men tot voor kort dat de tijdstructuur van de onopgeloste hogere harmonischen bepalend was voor de residu-toonhoogte, dit experiment toont aan dat veeleer de lagere, opgeloste, harmonischen hiervoor verantwoordelijk zijn. Dit feit is in 1972 op indringende wijze onderkend en aangetoond door

Houtsma en Goldstein¹²⁾. Zij boden hun proefpersonen een dichotisch signaal aan bestaande uit één harmonische aan het ene oor en de daaropvolgende harmonische aan het andere oor. Onder deze omstandigheden hoort de proefpersoon een even sterke residu-toonhoogte als in het geval dat beide harmonischen aan het zelfde oor worden aangeboden. Frekwentieanalyse blijkt dus een voorwaarde te zijn voor de waarneming van de voor de perceptie zo belangrijke residu-toonhoogte. Ook dit illustreert het belang van het "intern" of "centraal spectrum".

Dames en Heren, tot nu toe hebben we onze beschouwingen beperkt tot de monaurale perceptie, de waarneming met één oor. Dat wil zeggen dat alle tot nu toe besproken fenomenen in principe met een hoofdtelefoon aan één oor opgewekt en bestudeerd kunnen worden. De waarneming wordt dan subjectief gelocaliseerd in het gestimuleerde oor. Het is alsof het akoestisch signaal in dat oor wordt geproduceerd. De sensatie kan worden verplaatst uit het oor in de richting van het andere oor door tegelijkertijd het andere oor van signaal te voorzien. Zo men wil, duide men dit aan met het reeds aangehaalde nederlandse gezegde: "Het ene oor in, het andere oor uit". De verplaatsing van de schijnbare bron kan zowel zijn in de richting van het midden van het hoofd, als in een richting uit het hoofd naar buiten. Het eerste treedt op bij conventionele geluidweergave via hoofdtelefoons. Onze Duits-talige vakgenoten bezigen hiervoor de term: "Im Kopf Lokalisation". Lokalisatie buiten het hoofd treedt steeds op wanneer de geluidbron zich buiten het hoofd van de waarnemer bevindt (Ausser Kopf Lokalisation). Deze constatering lijkt wellicht triviaal maar is dat niet, als men bedenkt dat het ook met hoofdtelefoons mogelijk is gebleken een sensatie van geluid buiten het hoofd en zelfs op grote afstand van het hoofd teweeg te brengen. Zeer speciale eisen worden daarvoor gesteld aan het elektroakoestisch overdrachtsysteem.

De ontwikkeling van dergelijke akoestische overdrachtsystemen is sterk gestimuleerd door de behoefte daaraan vanuit de subjectieve zaalakoestiek. Er is met name door enige groepen in Duitsland de laatste jaren hard aan gewerkt. Men kan het probleem ook stellen als volgt: bij een conventionele stereo-opname van een orkest met twee microfoons en bij weergave hiervan via een normale hoofdtelefoon ontstaat weliswaar een geluidbeeld met een zekere uitgestrektheid rond het hoofd, echter geen localisatie duidelijk ver buiten het hoofd. Door nu de twee opname-

microfoons in te bouwen in een kunsthoofd kan men een natuurgetrouwe weergave verkrijgen tijdens afluisteren met een normale hoofdtelefoon. Het is daarbij zaak dat het kunsthoofd en met name de oorschelpen zo natuurgetrouw mogelijk worden nagebootst. Het is verbazingwekkend welk een natuurgetrouwe weergave hiermee is te bereiken. Deze opnametechniek kan van grote betekenis zijn voor de studie van concertzalen. Een direct subjectief vergelijk van verschillende zalen is nu mogelijk, zodat subjectieve kenmerken door successief vergelijk in een kort tijdbestek bepaald kunnen worden (Een alternatieve methode, nl. het snel op en neer reizen van de ene concertzaal naar de andere, zou onoverkomelijk hoge eisen stellen aan ons geheugen).

Perceptieonderzoek heeft uitgeezen waaraan de signalen aan beide oren moeten voldoen, wil deze natuurgetrouwe localisatie buiten het hoofd optreden. Daarvoor is nodig dat het frekwentiespectrum van het signaal gemeten aan het trommelvlies van elk van beide oren bij hoofdtelefoon-weergave zo exact mogelijk gelijk is aan dat bij normaal luis-teren in de opname-ruimte (bijv. de concertzaal) op de plaats van de opname-microfoons. Hoofdbewegingen blijken hierbij niet die essentiële rol te spelen die men ze vroeger wel toeschreef. Het belang van het frekwentiespectrum voor met name de localisatie in het verticale vlak is door Blauert¹³⁾ aangetoond. Hij vond dat geluiden met een zwaartepunt in het spectrum bij ongeveer 1 kHz achter worden gelocaliseerd, geluiden met maxima's bij 0.5 en 3 kHz vóór, en geluiden met een maximum bij 8 kHz boven.

De plaats van deze maxima blijkt in hoge mate overeen te stemmen met de plaats van maxima die ontstaan in het spectrum van een signaal ten gevolge van diffractie en interferentie van de geluidgolven aan het hoofd en de oorschelpen. Blijkbaar heeft de mens geleerd verschillende spectrale eigenschappen te associëren met verschillende richtingen in het verticale vlak. Terwijl dus enerzijds het gehoor tijd- en intensiteitsverschillen tussen de signalen aan beide oren benut voor richtinghoren in het horizontale vlak, speelt voor richtinghoren in het verticale vlak het spectrum, met name de z.g. "Richtungsbestimmende Frequenz Bänder", de belangrijkste rol.

Beide oren zijn niet alleen onmisbaar voor het richting horen, doch spelen ook een belangrijke rol bij het waarnemen van bepaalde geluiden

temidden van stoornissen uit de omgeving (het z.g. dichotisch drempel-effect). Recente onderzoeken hebben het idee doen post vatten dat ten gevolge van tijd (faze) verschillen in de signalen aan beide oren interactiepatronen ontstaan in het centraal zenuwstelsel die gelijken op een centraal spectrum. Het vermogen van het auditieve systeem om toonhoogte te onttrekken aan dergelijke signalen, lijkt de juistheid van deze opvatting te bevestigen. Ik wil thans over dit eigen onderzoek niet teveel uitwijden daar ik dit bij andere gelegenheden reeds uitvoerig heb gedaan voor mijn vakgenoten¹⁴⁾.

Ter afsluiting van deze rede wil ik U echter nog vergasten op een monuraal fenomeen, nl. de pulsatiedrempel, herontdekt en nader onderzocht door Houtgast¹⁵⁾. Overgesimplificeerd weergegeven, komt het verschijnsel neer op het volgende: wanneer twee verschillende geluiden in een bepaald ritme afwisselend nã elkaar worden aangeboden, dan wordt het zwakke van de twee signalen continu, dus niet meer pulserend, waargenomen^{o)}. Algemeen wordt gedacht aan een verklaring in spectrale termen, waarbij temporele aspecten slechts van secundair belang zijn. In eerste benadering lijkt men nl. te kunnen stellen dat de sensatie van continuïteit optreedt wanneer alle delen van het intern spectrum van het zwakke geluid vallen binnen de contour van het intern spectrum van het sterke geluid. Ook hier dus een spectrale theorie.

Zeër gewaardeerde toehoorders,

Ik ben thans aan het eind van mijn sprongsgewijze rondreis door het onderzoekerrein van de auditieve waarneming. Ik hoop U duidelijk te hebben gemaakt, dat er een uitgebreid scala van auditieve functies bestaat waarbij het spectrum, het intern spectrum, of centraal spectrum van een akoestisch signaal een essentiële rol speelt. Wanneer ik naar de zin van mijn vakgenoten teveel heb gepraat in termen van spectrum en te weinig in termen van tijd, dan moet U bedenken dat de redeneringen niet wezenlijk veranderen, wanneer we in plaats van het "long-term spectrum" het "short-term spectrum" beschouwen.

Uiteraard konden in dit korte tijdbestek niet alle andere facetten van de auditieve waarneming worden belicht. Ook diverse toepassingen gestoeld op de verworven fundamentele kennis, konden niet aan de orde komen. Ik noem U hiervan in Nederland o.a.: het bepalen van de eisen

te stellen aan hoortoestellen en met name voor het dragen van twee hoortoestellen (denk aan het cocktail party effect); automatische spraakherkenning en spraakproductie door computers gebaseerd op de eigenschappen van het menselijk gehoor en het short-term spectrum van de spraak; de ontwikkeling van nieuwe audiologische testmethoden ter bepaling van de frekwentieanalyse bij gehoorgestoorden; de ontwikkeling van trainingsapparatuur voor het obstakelhoren door blinden gebaseerd op de subjectieve evaluatie van interferentie-spectra (denk aan de herhalingstoonhoogte); etc. etc. Ik hoop naar mijn beste vermogen een steentje bij te dragen aan deze fundamentele en toegepaste zaken.

Het past mij bij het aanvaarden van mijn ambt als lector aan deze Technische Hogeschool mijn dank te betuigen aan Hare Majesteit de Koningin die mijn benoeming heeft bekrachtigd, aan U heren van het College van Bestuur die de voordracht heeft gedaan, en aan U heren van het Bestuur van de Afdeling der Technische Natuurkunde die de benoeming heeft voorbereid.

Hooggeachte Kosten en van Wulfften Palthe,

Als student en als promovendus heb ik veel aan U te danken gehad. U heeft mij vertrouwd gemaakt met de boeiende wereld van het geluid. Uw specifiek technisch-fysische, respectievelijk theoretische benadering van akoestische problemen heeft mij zeer aangesproken. Ik ben U dankbaar dat U mij in de gelegenheid hebt gesteld aandacht te besteden aan de subjectieve akoestiek, mēer dan voorheen gebruikelijk was in de toenmalige werkgroep Akoestiek. Uw belangstelling en kritische begeleiding zijn mij zeer van dienst geweest. Het spijt mij, hooggeleerde Kosten, dat ik U vanwege Uw vroegtijdige dood vandaag niet tot mijn gehoor mag rekenen.

Hooggeachte Schouten,

Het zijn in een belangrijke mate Uw enthousiasme voor het perceptie-onderzoek en de duidelijke verklaring daarvan in Uw I.P.O. geweest, die mij in mijn studententijd de ogen hebben geopend voor de jonge tak van wetenschap die ik thans mag beoefenen. Ik ben U en de medewerkers van het I.P.O. zeer erkentelijk voor de vele uren die ik luisterend en filosoferend tezamen met U mocht doorbrengen. Het is niet verwonderlijk dat o.a. juist Uw Amerikaanse en Nederlandse discipelen, door U geïnspireerd in

de studie van de residutoonhoogte, een zo belangrijke wending hebben gegeven aan de theorie van de toonhoogteperceptie.

Hooggeachte Ritsma,

Op het gebied van de toonperceptie heb je in Nederland een dominante plaats ingenomen. De verschuiving van het residu van hogere naar lagere harmonischen, en daarmee van tijd- naar frekwentiedomein, is mede door jouw werk in gang gezet. Jouw raadgevingen en didactische adviezen hebben in niet geringe mate destijds mijn promotiewerk beïnvloed. Ik ben je er dankbaar voor.

Hooggeachte Goldstein, Durlach en Colburn,

Mijn verblijf in 1971 op het Massachusetts Institute of Technology is geworden tot een onvergetelijke tijd. Onze discussies, soms tot diep in de nacht, over toonhoogte en binaurale processen staan mij nog levendig voor de geest. Ik ben U daar zeer erkentelijk voor.

Hooggeachte van den Brink,

Toen ik in 1967 voor de keus stond een baan te aanvaarden bij het Instituut voor Perceptie Onderzoek (het I.P.O.) in Eindhoven, of jou te helpen bij het oprichten van een groep Biologische Natuurkunde in Delft, heb ik voor het laatste gekozen. Ik heb daar tot nu toe geen spijt van gehad. Onze vrijdagse discussies over je opvattingen betreffende de functionele parallellen in het visuele en auditieve systeem hebben mijn inzicht verruimd in de mogelijkheden en beperkingen van psychofysisch onderzoek. Jouw huidige voorliefde voor "centrale processen" behoedt mij ervoor het auditieve systeem te zeer alleen te zien als fysisch systeem. Ik ben je voor dit alles dank verschuldigd.

Waarde vakgenoten,

Nederland mag zich verheugen in een sterk ontwikkelde en internationaal hoog gewaardeerde onderzoekactiviteit op het gebied van het gehoor. Ik heb de sfeer tijdens diverse werkbesprekingen met U, colloquia, landelijke en deels internationale symposia als zeer stimulerend gevonden voor mijn eigen onderzoek. Het onderzoekerterrein dat voor ons ligt, is ruim en uitgestrekt. Dit blijkt o.a. uit het feit dat wij elkaar qua

onderzoekthema's niet hoeven te beconcurreren, integendeel wij elkaar aanvullen. Ik hoop dat, ondanks de krapper wordende geldmiddelen, wij deze voor de kwaliteit van het werk noodzakelijke situatie kunnen behouden.

Waarde medewerkers van de groep Biologische Natuurkunde,

Zoals ik hierboven reeds terloops heb vermeld, ben ik voorstander van gecombineerd psychofysisch, fysiologisch en modeltheoretisch onderzoek m.b.v. één en hetzelfde akoestisch signaal. Ik meen te mogen stellen dat deze onderzoek-filosofie voor onze groep in het recente verleden reeds vruchten heeft afgeworpen. De realisering van een dergelijke filosofie vereist teamwork, waarbij de inzet van allen (op het gebied van de fysica, fysiologie, electronica, computer-hardware en software etc.) vereist is. Ik zal naar beste vermogen trachten U te helpen ook in de toekomst in deze geest verder te werken, daarbij steeds zoekend naar een passend evenwicht tussen de individuele belangen en het belang van de groep.

Dames en heren studenten,

U heeft mij veel horen vertellen over onderzoek en weinig over onderwijs. Dat komt omdat ik primair voor het eerste ben aangesteld. Desalniettemin beschouw ik een groot deel van het onderzoek in onze groep als onderwijs-gebonden onderzoek, en dus als onderwijs. Ik hoop U behulpzaam te zijn bij het zelfstandig ontdekken hoe boeiend en nuttig het is de tijdens Uw studie verworven kennis van de fysica toe te passen bij de bestudering van een biologisch systeem als het oor.

Ik dank U voor Uw aandacht.

NOTEN

- o) Figuren en demonstraties gepresenteerd tijdens het uitspreken van deze rede, zijn hier niet weergegeven.
- 1) Helmholtz, H.L.F. von (1954), *Sensations of tone*, Dover reprint, New York.
 - 2) Békésy, G. von (1960), *Experiments in hearing*, Mc Graw-Hill, New York.
 - 3) Johnstone, B.M., and Boyle, A.J.F. (1967), "Basilar membrane vibration examined with the Mössbauer technique", *Science* 158, 389-390.
 - 4) Rhode, W.S. (1971), "Observations of the vibration of the basilar membrane in squirrel monkeys using the Mössbauer technique", *J.Acoust.Soc.Amer.* 49, 1218-1231.
 - 5) Wilson, J.P., and Johnstone, J.R. (1975), "Basilar membrane and middle-ear vibration in guinea pig measured by capacitive probe", *J.Acoust.Soc.Amer.* 57, 705-723.
 - 6) Kohlöffel, L.U.E. (1972), "A study of basilar membrane vibrations I-III", *Acustica* 27, 49-89.
 - 7) Kiang, N.Y.S. (1965), *Discharge patterns of single fibers in the cat's auditory nerve*, Research monograph 35, M.I.T. Press, Cambridge Mass.
 - 8) Buunen, T.J.F. (1976), *On the perception of phase differences in acoustic signals*, Proefschrift T.H. Delft.
 - 9) Goldstein, J.L. (1970), "Aural combination tones", in *Frequency Analysis and periodicity detection in hearing*, Plomp, R. and Smoorenburg, G.F. Eds., Sijthoff, Leiden, p 230-245.
 - 10) Schouten, J.F. (1940), "The residue, a new component in subjective sound analysis", *Proc.Kon.Nederl.Akad.Wetensch.* 43, 356-365.
 - 11) Ritsma, R.J. (1967), "Frequencies dominant in the perception of the pitch of complex sounds", *J.Acoust.Soc.Amer.* 42, 191-198.
 - 12) Houtsma, A.J.M., and Goldstein, J.L. (1972), "The central origin of the pitch of complex tones: Evidence from musical interval recognition", *J.Acoust.Soc.Amer.* 51, 520-529.
 - 13) Blauert, J. (1974), *Räumliches Hören*, Hirzel, Stuttgart.
 - 14) Bilsen, F.A. (1976), "The pitch of noise signals. Evidence for a central spectrum", Ter publikatie aangeboden aan *J.Acoust.Soc.Amer.*
 - 15) Houtgast, *Lateral suppression in hearing; a psychophysical study on the ear's capability to preserve and enhance spectral contrasts*, Proefschrift V.U. Amsterdam, 1974.