



**Keel-, neus- en  
oorheelkunde**

*Algemene KNO*

*Allergologie*

*Audiologie*

*Exp. audiologie*

*Ervenichtsonderzoek*

*Foniatris / Logopedie*

Dr. ir. T. Houtgast

# Horen en gehoorscherpte

**Illustratie:**  
**Omslagontwerp:**

**Koos Wolff**  
**Ilse Houtgast**

**dr ir T. Houtgast**

## Horen en gehoorscheppte

*Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar experimentele audiologie aan de faculteit der geneeskunde van de Vrije Universiteit te Amsterdam op 25 mei 1994.*

*vrije Universiteit amsterdam*



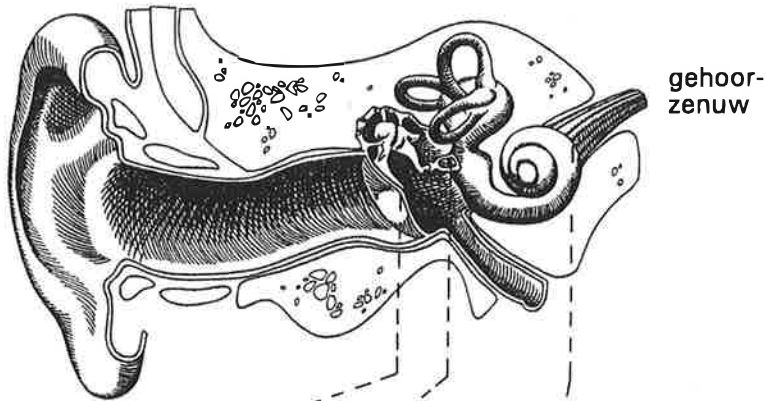


## Mijnheer de Rector Magnificus Dames en Heren

Een ieder die er een ogenblik bij stilstaat beseft hoe belangrijk een goed gehoor is voor ons dagelijks functioneren. Ik zal daar niet over uitweiden. Ook weten wij dat er een groot aantal slechthorenden is, dat dagelijks de lasten ondervindt van een slecht gehoor. Laten wij constateren dat slechthorendheid een zeer algemeen probleem is, waar velen onder ons in meerdere of mindere mate mee te maken hebben of mee te maken zullen krijgen.

De weg van de slechthorende op zoek naar hulp loopt doorgaans via de huisarts naar de KNO-specialist en de audioloog. Vanuit de medische discipline kunnen velen worden geholpen, maar een groot aantal ook niet. Deze laatste categorie is aangewezen op hulpmiddelen, meestal van technische aard, zoals een hoorapparaat. Hoe kunnen die hulpmiddelen optimaal worden aangepast aan de behoefte van de slechthorende? Om dat goed te kunnen doen is inzicht nodig in het hoorproces, en daar nu ligt het werkterrein van de experimentele audiologie. Ik wil graag proberen u een indruk van dat vakgebied te geven: van de aard van de problemen, van de manier van denken en de aanpak bij het onderzoek, van de stand van zaken en de vooruitzichten.

Het aandachtsgebied van de experimenteel-audioloog wordt geïllustreerd door Figuur 1. De geheimen van deze micro-wereld houden vele mensen reeds vele jaren bezig, en zijn vooral gelokaliseerd in de cochlea en in het zenuwstelsel. Maar laat ik systematisch van links naar rechts werken. Het deel tot aan het trommelvlies is akoestiek. Hoe een geluid het trommelvlies bereikt, al of niet met tussenkomst van electroakoestische middelen, is bij uitstek het domein van de fysicus of ingenieur. De trillingen worden overgedragen naar de cochlea via een stukje fijn-mechaniek. Als zich daarbij een



(electro-) akoestiek fysicus/ingenieur	fijn-mechaniek chirurg	cochlea bioloog/fysioloog	centraal zenuwstelsel neuro-wetenschapper psycholoog
Geluid		codering	"puzzelen"

*Figuur 1. Het aandachtsgebied van de audioloog.*

probleem voordoet (we spreken dan van geleidings-verliezen), kan dat meestal zeer goed langs chirurgische weg worden verholpen. Met de cochlea betreden we een ingewikkelde structuur, waar de mechanische trillingen leiden tot activatie van de zenuwvezels. Het is een uiterst delicaat samenspel van trillingen in de vloeistof, resonantiefrequenties, bewegingen van haarcellen, ionenstromen, electro-mechanische terugkoppelingen, membraanpotentialen, dat uiteindelijk leidt tot een stroom van activiteit in de circa 30.000 zenuwvezels die de gehoorzenuw omvat. Daarmee is het geluid dus gecodeerd in de "taal" van het zenuwstelsel. Wat we daadwerkelijk horen is het resultaat van neuronale processen die ik voor de eenvoud

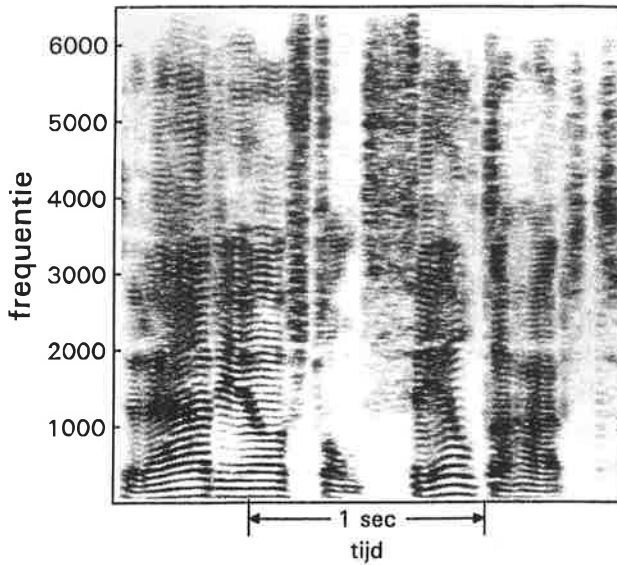
samenvat met de aanduiding "neuroonaal puzzelen en ordenen": het nagenoeg momentaan oplossen van een 30.000-stukjes puzzel. Vooral wanneer wij bestookt worden door meerdere geluiden tegelijk moet dat leiden tot een grote wanorde in de verdeling van de activiteit over de 30.000 vezels, en wordt er een sterk beroep gedaan op het neuronale puzzel-vermogen. Toch wordt die puzzel doorgaans goed opgelost, en zijn we in staat afzonderlijke geluiden te horen en te herkennen. Begrippen als patroonherkenning, data-reductie, verwachtingspatronen, selectieve aandacht, top-down sturing spelen hierbij een rol, maar de kennis op dit gebied is nog verre van compleet.

In het voorgaande zijn de contouren weergegeven van het onderzoekgebied experimentele audiologie, en de disciplines die het omvat: als ingenieur/akoestikus op het gebied van de geluidleer, als fysicus/fysioloog betreffende het proces van codering in de cochlea, en als neurowetenschapper/psycholoog aangaande de neuronale processen die ten grondslag liggen aan de geluidwaarneming. Over het begrip gehoorscherptheid kom ik nog uitvoerig te spreken. In het hier geschetste kader is het duidelijk dat de gehoorscherptheid - hoe goed iemand kan horen - bepaald wordt door de kwaliteit van de codering in de cochlea en van het neuronale puzzel-proces. Als zich daarin afwijkingen voordoen, dan kan dat leiden tot slechthorendheid. Heel vaak staat de medicus machteloos bij de vraag naar een doeltreffende behandeling van dergelijke afwijkingen, die immers zetelen in de cochlea of in het centraal zenuwstelsel. Ik wil hier een moment stilstaan bij recente en belangrijke ontwikkelingen, waarbij in het geval van een nagenoeg totaal disfunctioneren van de cochlea soms met succes langs technische weg kan worden ingegrepen. Als vervanging van de subtiele en delicate processen in de cochlea waarbij de zenuwen via de haarcellen worden gestimuleerd, blijkt het ook mogelijk de zenuwen te stimuleren via elektroden die van

buitenaf, langs operatieve weg, in de cochlea worden aangebracht. Dit leidt tot een hoorsensatie, een uitermate belangrijk gegeven voor een tot dan totaal dove patiënt. Wanneer een dergelijke electrode, of een stelsel van meerdere elektroden, wordt gevoed door een electricch signaal dat is afgeleid van een microfoon-opname van verschillende geluiden, kunnen ook verschillende hoorsensaties optreden. Dit biedt dus, in principe, de mogelijkheid tot geluiddiscriminatie. De toepassingsmogelijkheden van dergelijke cochleaire implantaten is thans volop in studie, en ook in Nederland wordt daarbij belangrijk werk verricht.

Wij zullen ons vooral richten op de wat mildere vormen van slechthorendheid, waarbij nog een zekere mate van gehoorcapaciteit aanwezig is waarop kan worden voortgebouwd. De middelen die de audioloog tot zijn beschikking heeft liggen in het voortraject, in het domein van het geluid tot aan het trommelvlies. Dit domein is toegankelijk voor de fysicus/ingenieur. Hij kan langs electronische weg geluiden filteren, versterken, allerlei eigenschappen manipuleren; hij kan, kortom, signaalbewerking toepassen op de geluiden die de cochlea krijgt aangeboden. Dat wordt op brede schaal toegepast in het moderne gehoorapparaat, en het doel is duidelijk: Pas dat type signaalbewerking toe waarbij de hoorprestatie van de slechthorende optimaal is. Ook de vragen en problemen zijn duidelijk. Welke zijn de belangrijke fysische eigenschappen van een geluid waarop de signaalbewerking zich moet richten? Wat gaat er precies mis bij slechthorendheid, dus bij het proces van de codering en van het puzzel-oplossen? Op deze vragen wil ik graag wat nader ingaan.



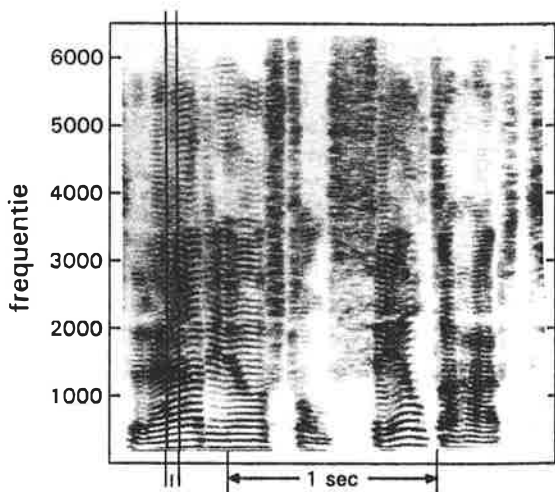


*Figuur 2.* Het bovenste plaatje geeft het spectrogram van een stukje spraak: de verdeling van de geluidintensiteit over frequentie en tijd. De betekenis daarvan voor de geluidwaarneming is enigszins vergelijkbaar met dat van een 'gewoon' plaatje voor de visuele waarneming.

## Geluid

Een ingenieur die geluid bestudeert pakt ogenblikkelijk een microfoon, maakt een opname, onderwerpt het signaal aan meer of minder ingewikkelde analyse-apparatuur, en bekijkt vervolgens het plaatje waarop de resultaten van die analyse worden weergegeven. Sommige van mijn visuele collega's zien hierin een duidelijk bewijs dat de visuele modaliteit superieur is aan de auditieve. In ieder geval onderstreept het de kracht van een plaatje om in één oogopslag ingewikkelde structuren duidelijk te maken, en ik zal daar dankbaar gebruik van maken. Ik wil u graag een aantal van dergelijke "geluid-plaatjes" laten zien. Het gaat hierbij vooral om de representatie van geluid op een wijze die van belang is voor de geluid-waarneming.

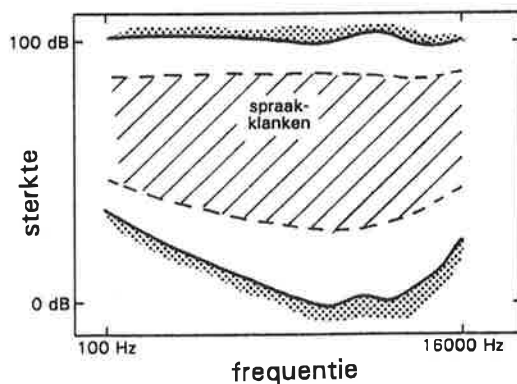
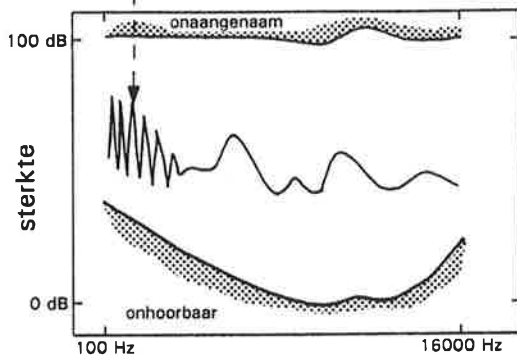
Voor de geluidwaarneming spelen twee aspecten een overheersende rol: De verdeling van de geluidintensiteit langs de frequentieschaal en langs de tijdschaal. Die verdeling kan in één plaatje worden weergegeven, de geluidintensiteit als functie van frequentie en tijd. Omdat het hier gaat om een illustratie van een aantal geluideigenschappen, ga ik even voorbij aan het punt dat frequentie en tijd eigenlijk niet geheel onafhankelijk van elkaar kunnen worden gedefinieerd. Figuur 2 geeft zo'n verdeling van de geluidintensiteit, het spectrogram van een willekeurig stukje spraak, een korte zin. Daarin zit dus de informatie verborgen die bepalend is voor wat wij horen. Globaal gesproken kan deze weergave van een geluidstimulus worden vergeleken met de betekenis van een "echt" plaatje voor de visuele perceptie, zoals dat in de onderste afbeelding is weergegeven. Dit illustreert dat geluid tot op zekere hoogte beschouwd kan worden als een twee-dimensionale stimulus, een patroon van geluidintensiteit met als twee belangrijke assen frequentie en tijd. Met deze illustratie van het spraak-spectrogram als uitgangspunt, wil ik graag aan de hand van drie voorbeelden aangeven hoe mooi de structuren in



***Figuur 3.** Een verticale doorsnede van het spectrogram levert het geluidsspectrum van de klank op dat moment.*

*Voor vele spraakklanken levert dat een verzameling die met arcering is aangegeven in het onderste plaatje.*

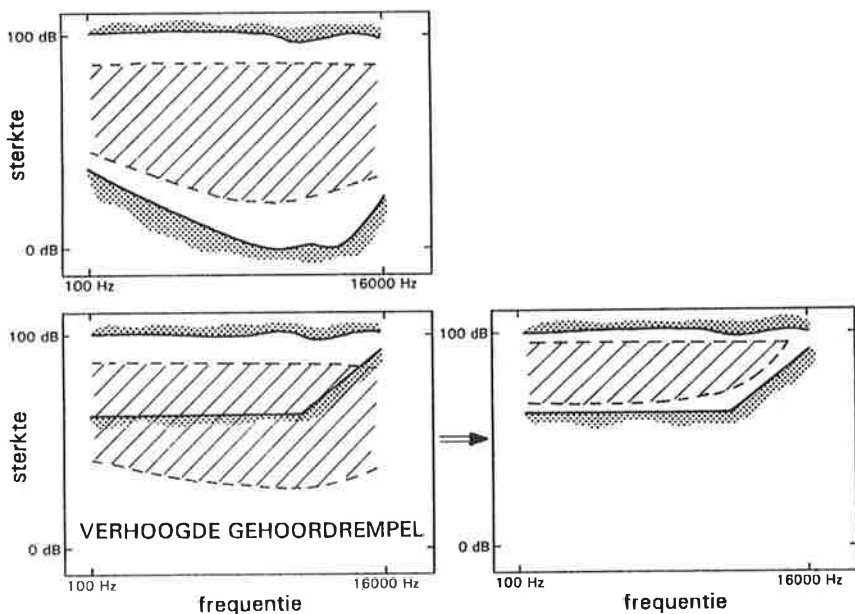
*Deze verzameling past mooi binnen het gebied dat het normale oor kan verwerken.*



dat twee-dimensionale geluidpatroon en de kenmerken van ons gehoor op elkaar zijn afgestemd. Ik zal dat doen in heel algemene kwalitatieve termen, waarbij veel details onbesproken blijven.

Het eerste voorbeeld leidt tot een klassiek en alom bekend resultaat, maar ik wil het voor de volledigheid toch niet ongenoemd laten. Het is gebaseerd op verticale doorsnijdingen in het spectrogram, zoals weergegeven in het bovenste deel van Figuur 3. Een verticale doorsnijding geeft de momentane verdeling van de geluidintensiteit langs de frequentieschaal, dus het geluidsspectrum van de spraakklank op dat bepaalde moment. In het middelste plaatje is dat schematisch weergegeven. Een groot aantal van deze doorsnijdingen levert dan een verzameling van geluidspectra. Voor spraak onder normale omstandigheden (niet extreem hard of zacht) bestrijkt de verzameling geluidspectra van spraakklanken een gebied dat door arcering is aangegeven in het onderste deel van de figuur. In deze figuur zijn ook de ondergrens en de bovengrens aangegeven van wat "het oor" kan verwerken. De ondergrens weerspiegelt de zachtste geluiden die nog kunnen worden waargenomen (de gehoordrempel) en de bovengrens de geluiden die als onaangenaam hard worden beleefd. Dit illustreert dus het bekende beeld dat het werkgebied van het oor en van de spraak, onder normale omstandigheden, goed op elkaar zijn afgestemd.

Dit plaatje geeft mij overigens de gelegenheid kort in te gaan op een klassiek probleem bij de geluidaanpassing voor slechthorenden, zoals geïllustreerd in Figuur 4. Het bovenste plaatje is overgenomen uit Figuur 3, en geeft de situatie weer voor normaalhorenden. Een veel voorkomend type slechthorendheid kenmerkt zich door een verhoogde gehoordrempel, terwijl de bovengrens waarbij geluiden als onaangenaam hard worden beleefd nagenoeg niet is gewijzigd. Een gedeelte van

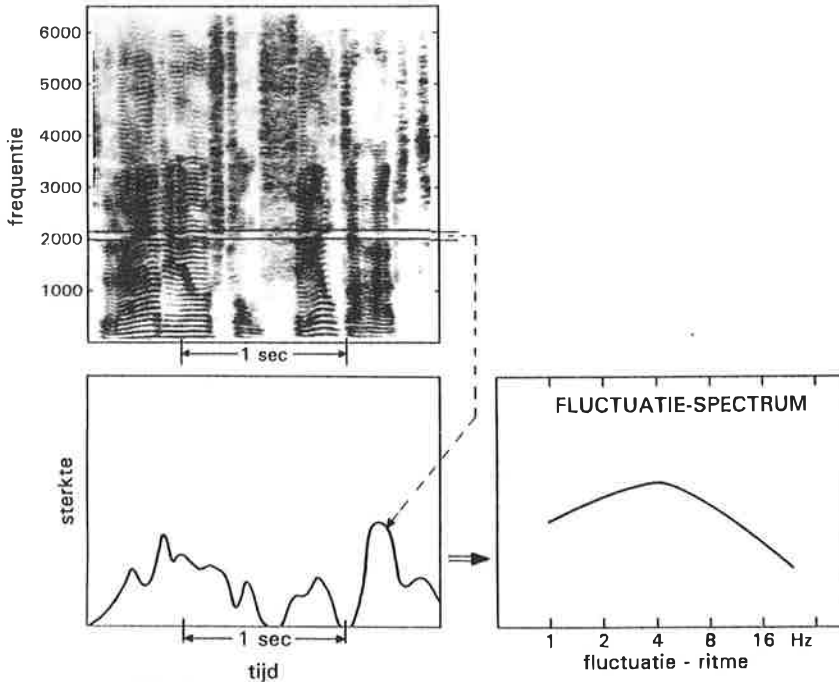


***Figuur 4.** Waar voor normaalhorenden (bovenste plaatje) het gearceerde gebied van de spraakklanken gunstig ligt, is dat niet het geval voor een slechthorende met een verhoogde gehoordrempel (plaatje links onder). Door het toepassen van een compressie-versterking kan dat worden hersteld (plaatje rechts).*

het gearceerde gebied, het gebied van de normale geluiden, verdwijnt daarmee onder de gehoordrempel, en gaat daardoor verloren voor de waarneming. Een simpele versterking, waarmee het gearceerde gebied boven de verhoogde gehoordrempel kan worden getild, heeft tot gevolg dat daarmee het gearceerde gebied ook de bovengrens overschrijdt, zodat harde geluiden onaangenaam luid worden. Er moet dus een selectieve versterking worden toegepast, waarbij zachte geluiden meer worden versterkt dan harde geluiden. Hierdoor krimpt de omvang van het gearceerde gebied ineen. Het resultaat van een dergelijke

compressie-versterking is schematisch weergegeven in het plaatje aan de rechter zijde, waarbij het gearceerde gebied in omvang en ligging is aangepast aan de onder- en bovengrens in dit voorbeeld. Het nuttige effect van een dergelijke compressie-versterking voor de geluiddiscriminatie en de spraakherkenning van slechthorenden is thans volop in studie. Eén van de problemen is dat met het inkrimpen van het gearceerde gebied ook het spectrale verschil tussen verschillende klanken vermindert, wat juist weer een negatieve invloed kan hebben op de mogelijkheid tot geluid-discriminatie. Over de voor- en nadelen van compressie-versterking is zeker nog niet het laatste woord gezegd, maar ik zal daar nu niet verder op ingaan.

Voor het tweede voorbeeld maken we een horizontale doorsnijding door het spectrogram. Deze doorsnijding geeft, voor een beperkt frequentiegebied, het verloop van de geluid-intensiteit in de tijd. Als we dit uittekenen ontstaat een sterk fluctuerende lijn die de opeenvolging van de verschillende spraakklanken reflecteert. In termen van informatie zijn het juist deze fluctuaties die een signaal interessant maken. Immers, wanneer de sterkte constant zou zijn, dan heeft dat in termen van informatie-overdracht weinig betekenis. Net als in het klassieke Morse-signaal, waar de informatie opgesloten is in het patroon van aan- en uitschakelen, zijn de sterkte-wisselingen de dragers van de informatie in het spraaksignaal. Een manier om die te karakteriseren is door na te gaan hoe sterk verschillende fluctuatie-ritmes daarin voorkomen. Dit kan worden weergegeven door het fluctuatie-spectrum. Wanneer we normale spraak (niet extreem snel of langzaam gesproken) onderwerpen aan een dergelijke analyse, zien we dat het fluctuatie-spectrum piekt bij circa 4 Hz. Het meest dominerende ritme is dus ongeveer 4 Hz, en weerspiegelt de snelheid waarmee de verschillende spraakklanken elkaar opvolgen.



*Figuur 5. Een horizontale doorsnede door het spectrogram levert, voor een smal frequentiegebied, het verloop van de geluidintensiteit in de tijd. Daaruit kan het fluctuatie-spectrum worden afgeleid, dat interessante gegevens over het spraaksignaal bevat.*

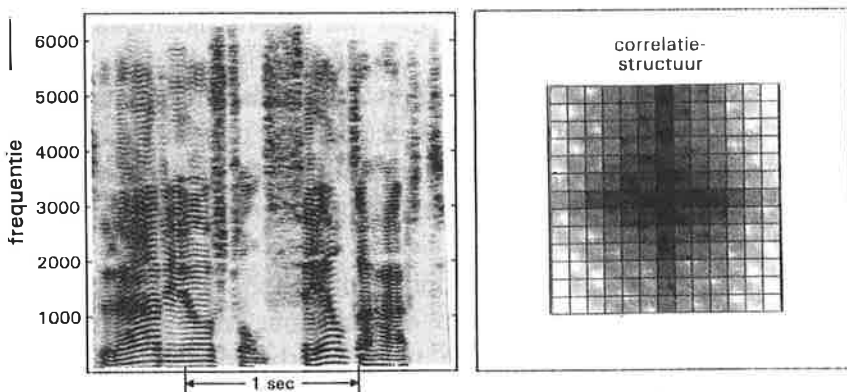
Interessant daarbij is de vraag hoe het staat met de gevoeligheid van het oor voor het waarnemen van fluctuaties. Het blijkt dat de duidelijkheid waarmee een fluctuatie in de geluidintensiteit kan worden waargenomen afhangt van het fluctuatie-ritme, waarbij het meest gevoelige gebied ligt rond de 4 Hz.

Na deze beschouwing over het belang van fluctuaties als dragers van de informatie in een spraaksignaal, kan ik niet nalaten er op te wijzen hoe belangrijk en vruchtbaar dit concept is geweest voor ons werk bij TNO op het gebied van de

spraakverstaanbaarheid. Doorgaans is het spraaksignaal dat de luisteraar bereikt slechts een matige copie van wat de spreker oorspronkelijk heeft geproduceerd, als gevolg van allerlei storende invloeden bij de geluidoverdracht. Het is gebleken dat het nadelige effect daarvan op de spraakverstaanbaarheid zich goed laat kwantificeren op grond van de invloed van de geluidoverdracht op het fluctuatiespectrum. Daarmee is het mogelijk geworden de kwaliteit van de spraakoverdracht in een objectieve maat vast te leggen. Deze kwaliteitsmaat is ook bijzonder geschikt om een situatie te beoordelen vanuit het perspectief van de slechthorende. Immers, voor slechthorenden moet de kwaliteit van de geluidoverdracht aan hogere eisen voldoen dan voor normaalhorenden, en de genoemde objectieve kwaliteitsmaat biedt de mogelijkheid dergelijke eisen in maat en getal te specificeren.

Voor het derde voorbeeld keren we weer terug naar het spraak-spectrogram. Na het maken van verticale of horizontale doorsnijdingen, zullen we nu het patroon als geheel beschouwen. Daarbij valt op dat de contouren in het spectrogram voornamelijk horizontaal en vertikaal zijn georiënteerd. De structuur is dus niet willekeurig, maar kent twee voorkeursrichtingen. Dat kan ook kwantitatief worden uitgewerkt, bijvoorbeeld door na te gaan hoe de correlatie tussen de momentane intensiteit op twee punten afhangt van de onderlinge afstand en oriëntatie van de twee punten in het spectrogram. Dit leidt tot de figuur aan de rechter zijde. De zwarting in elk hokje weerspiegelt de correlatie voor een puntenpaar, waarbij de onderlinge oriëntatie van de twee punten gekarakteriseerd is door de positie van het hokje ten opzichte van het middelpunt van de figuur. Hokjes ver van het middelpunt hebben dus betrekking op de correlatie tussen twee punten in het spectrogram op een grote onderlinge afstand. Het blijkt dan dat de correlatie niet alleen afhangt van de onderlinge





*Figuur 6. De overheersende structuur van een spectrogram bestaat uit horizontale en verticale elementen. Dit kan worden gekwantificeerd door een correlatie-patroon zoals afgebeeld in het rechter plaatje. De tekst geeft hierover meer informatie.*

afstand tussen de punten (hoe groter de afstand, hoe lager de correlatie, zoals te verwachten), maar ook van hun onderlinge oriëntatie. Immers, de correlatie-structuur vertoont een duidelijk kruisdraad-patroon, wat betekent dat voor een horizontaal of een vertikaal georiënteerd puntenpaar de correlatie hoger is dan voor een willekeurig schuin georiënteerd puntenpaar. De correlatie-structuur geeft dus aan wat we reeds met het blote oog zagen: De in een spraak-spectrogram overheersende structuur bestaat uit horizontale elementen (klanken met een tonaal karakter, zoals klinkers) en verticale elementen (klanken met een puls-karakter, zoals ploffers). Ik ga hier niet in op een verdere kwantitatieve uitwerking. Wel wil ik nog vermelden dat een dergelijk patroon niet uniek is voor spraak, en ook wordt aangetroffen bij andere geluiden, zoals muziek. Een geluidspectrogram laat dus twee voorkeursrichtingen zien voor de verdeling van de geluidenergie, horizontaal en vertikaal. Spelen deze voorkeursrichtingen ook een bijzondere rol bij de geluidwaarneming? Het antwoord is ja. Luisterexperimenten

hebben aangetoond dat, als het gaat om de waarneembaarheid van een geluid, het juist tonen of pulsen zijn die het beste scoren. Wanneer de geluidintensiteit anders dan horizontaal of vertikaal is verdeeld over het spectrogram, dan is de waarneembaarheid minder. Wederom een illustratie van de nauwe relatie tussen geluidkenmerken en gehooreigenschappen.

Met de voorgaande voorbeelden heb ik een indruk gegeven van de wijze waarop de structuur van geluid kan worden onderzocht. De laatste twee voorbeelden waren wat persoonlijk ingekleurd, en het mag duidelijk zijn dat er nog een scala van andere analysemethoden bestaat waarmee geluideigenschappen in kaart kunnen worden gebracht. Vooral het spraaksignaal is in vele laboratoria onderworpen aan vele verschillende analysemethoden, en dat heeft een grote hoeveelheid kennis opgeleverd. Zo zijn er mogelijkheden om kenmerken uit het spraaksignaal af te leiden die inzicht geven omtrent het al dan niet goed functioneren van de stembanden. Wij hebben het voornemen de toepasbaarheid te onderzoeken van dergelijke meetmethoden als objectief hulpmiddel bij de stemband-chirurgie, waarbij het belangrijk is om tijdens de fono-chirurgische ingreep de fysische veranderingen van de stem te kunnen bepalen.

Een aantal malen heb ik gewezen op de relatie tussen bepaalde geluidkenmerken en gehooreigenschappen. In het algemeen is natuurlijk de vraag van belang welke de essentiële geluidkenmerken zijn, die bepalend zijn voor de hoorprestatie. Bijvoorbeeld, is elk detail in het spraak-spectrogram van even groot belang voor het spraakverstaan, of zijn er specifieke structuren en kenmerken zoals ik er enkele heb getoond die daarbij van bijzondere betekenis zijn? Die vraag is voor ons van belang omdat signaalbewerking ten behoeve van slechthorenden zich specifiek op dié kenmerken zou moeten richten.

Wij hebben het voornemen een onderzoekprogramma uit te voeren om een bijdrage te leveren aan het opsporen van die essentiële geluidkenmerken. Daarbij is ook de vraag aan de orde hoe die kenmerken gecodeerd worden in de cochlea, en welke rol die spelen bij het oplossen van de neuronale puzzel, bijvoorbeeld als het gaat om spraakverstaan onder moeilijke omstandigheden. Laten we nu de stap maken van de fysica van het geluid naar de codering in de cochlea.

### **Codering in de cochlea**

We betreden nu een terrein waar de fysioloog, de bioloog of de medicus eigenlijk beter thuis is dan de fysicus. Toch speelt ook de fysicus een rol bij het onderzoek naar de eigenschappen van de codering in de cochlea, de omzetting van geluidtrillingen naar zenuwimpulsen. Er kunnen daartoe, globaal gesproken, drie verschillende benaderingen worden gevolgd. Met twee daarvan heb ik zelf geen ervaring, maar ik zal ze voor de volledigheid toch kort noemen. De eerste is de meest directe aanpak, namelijk het afleiden van de activiteit in de zenuwen met micro-electroden. Veel electrofysiologisch onderzoek is en wordt gedaan, ook in Nederland, aan diermodellen waarbij de relatie in kaart wordt gebracht tussen de activiteit in de gehoorzenuw en diverse geluideigenschappen. De tweede aanpak is het bestuderen van de structuren en processen in de cochlea, teneinde het mechanisme dat aan de codering ten grondslag ligt te doorgronden. Dit type onderzoek richt zich bijvoorbeeld op de cochleaire mechanica, de eigenschappen van de haarcellen of de optredende potentiaalverschillen in de cochlea. Soms verraden bepaalde cochleaire eigenschappen zich door hele curieuze bijverschijnselen, zoals geluid dat vanuit de cochlea naar buiten treedt, hetgeen ook een handvat biedt om die eigenschappen te bestuderen.

De derde benadering, waarmee ik wel enige ervaring heb, is de psychofysica, dus met behulp van luisterexperimenten. Zonder overdrijving kan gezegd worden dat Nederland, relatief gezien, een belangrijke traditie heeft op het gebied van onderzoek naar de wetmatigheden in de relatie tussen de fysische en perceptieve kenmerken van een geluid. Op het gebied van de toonhoogte en de luidheid, van de waarneembaarheid en onderscheidbaarheid van geluiden en van de geluidlokalisatie is belangrijk en interessant werk gedaan. Voor het bestuderen van de eigenschappen van de cochleaire codering is het een indirecte methode, waarbij het uitgangspunt is: Wanneer een luisteraar twee geluiden kan discrimineren, dan moet er een onderscheid zijn in de neuronale codering van die twee geluiden. Deze aanpak leent zich dus voor het onderzoeken van de limiet, het oplossend vermogen, van het coderingsproces. Laat ik een eenvoudig voorbeeld noemen. Als uit een luisterexperiment blijkt dat een luisteraar duidelijk en reproduceerbaar een onderscheid kan maken tussen een zuivere toon van 1000 Hz en van 1010 Hz, dan leidt dat tot de conclusie dat het coderingsproces blijkbaar gevoelig genoeg is om dat verschil door te geven in de kenmerken van de neuronale activiteit in de gehoorzenuw. Met ditzelfde voorbeeld kan ik een aantal inherente zwakheden van deze benadering aangeven. Ten eerste, wanneer het gaat om inzicht in de limieten van het coderingsproces in de cochlea, is de methode eenzijdig. Immers, wanneer een verschil tussen een zuivere toon van 1000 Hz en van 1005 Hz niet gehoord kan worden hoeft de oorzaak daarvan niet te liggen in de limiet van de cochleaire codering; het kan ook een gevolg zijn van beperkingen in de meer centrale neuronale processen die aan de hoorsensatie ten grondslag liggen. Ten tweede, de conclusie dat een zuivere toon van 1000 Hz anders gecodeerd is dan een toon van 1010 Hz laat de boeiende vraag onbeantwoord in welk opzicht die coderingen dan verschillend zijn. Het is duidelijk dat de

eerstgenoemde methode van onderzoek, het afleiden van de activiteit in de gehoorzenuw, deze interpretatieproblemen niet kent. Immers, daar speelt niet het probleem van een mogelijke verwarring met centrale processen, en ook de aard van de neuronale codering is meer direct inzichtelijk. Ook deze aanpak kent echter haar beperkingen, al was het alleen maar dat de mogelijkheden van dergelijk onderzoek bij de mens zeer beperkt zijn, en de praktische onmogelijkheid om signalen af te leiden van 30.000 afzonderlijke zenuwvezels. In onderzoek naar de eigenschappen van de cochleaire codering, in het bijzonder in het geval van slechthorendheid, pleit ik daarom voor een intensiever samengaan en onderlinge afstemming van de psychofysische en de electrofysiologische benadering.

Ik wil nog wijzen op een principiële probleem als het gaat om de interpretatie van experimentele gegevens uit het type onderzoek dat ik net heb aangeduid, en dat geldt eigenlijk voor alle drie de methoden van onderzoek. Het gaat dan om de vraag naar de relevantie van die gegevens voor het horen in de praktijk. Laat ik weer een voorbeeld uit de psychofysica nemen. Stel dat uit een meting bij een bepaalde persoon blijkt dat deze, anders dan de meeste anderen, niet 1000 Hz kan onderscheiden van 1010 Hz, maar dat die grens bij 1050 Hz ligt. Is dit slechte toonhoogte-onderscheidingsvermogen belangrijk voor het horen in de praktijk, voor het spraakverstaan of het herkennen van geluiden uit de omgeving? De achterliggende vraag is natuurlijk algemener dan dit eenvoudige voorbeeld. Er kunnen zeer vele van dergelijke gehoorfuncties worden bepaald; het scala aan psychofysische testen naar het auditieve onderscheidingsvermogen met laboratoriumsinalen is bijna onuitputtelijk door de vele combinatiemogelijkheden van de verschillende parameters, zoals amplitude, frequentie, spectrale vorm, faserelaties, temporele eigenschappen, en nog

vele meer. De vraag is dan welke van deze testen relevant zijn in het kader van de gehoorscherpthe. Met welke psychofysische test worden juist dié eigenschappen van de cochleaire codering aangeboord die bepalend zijn voor de hoorprestatie in de dagelijkse praktijk? Met andere woorden: wat is een goede gehoorscherpthe-test? Met enige jaloezie in de richting van mijn visuele collega's moet ik constateren dat er in ons vak geen equivalent bestaat van de Landolt-test voor het vaststellen van de gezichtsscherpthe. Het klassieke toonaudiogram, hoe relevant ook voor de diagnostiek, geeft slechts aan wanneer geluiden al dan niet gehoord kunnen worden. Het geeft echter geen inzicht in het discriminatievermogen, de kwaliteit van het horen, voor geluiden in het gebied boven de gehoordrempel.

Ik roep in herinnering dat ons onderzoek gezien moet worden in het kader van de mogelijke betekenis van signaalbewerking als hulpmiddel voor slechthorenden. Ik heb er reeds op gewezen dat die signaalbewerking zich zal moeten richten op de essentiële fysische geluidkenmerken. Voor het antwoord op de vraag hoe die kenmerken dan het beste kunnen worden gemanipuleerd is het van belang een goed inzicht te hebben in de aard van de beperkingen van de cochleaire codering van de individuele slechthorende. Een goede en relevante psychofysische gehoorscherpthe-test die dat inzicht kan verschaffen is daarom van grote betekenis. Ons onderzoek zal zich daar ook op richten.

### **De neuronale puzzel**

Na de cochlea spelen zich nog vele neuronale processen af die leiden tot de hoorsensatie. Velen zullen zelfs zeggen dat het wezenlijke hoorproces eigenlijk pas na de cochlea begint. Ik moet mezelf hier, wegens gebrek aan echte kennis op dit gebied, zeer bescheiden opstellen. Het beeld dat ik wil benadrukken is dat van de cochlea die, als een moderne inter-

face, geluid codeert en vertaalt in de taal van de zenuwen, en daarmee de elementen aandraagt van de puzzel die door het centraal zenuwstelsel moet worden opgelost. Een van de meest verbluffende eigenschappen is het vermogen om uit vaak fragmentarische informatie een consistent beeld op te bouwen van de geluidswereld om ons heen. Denk bijvoorbeeld aan een orkest, waarbij we in staat zijn ons te concentreren op een bepaald muziekinstrument. Denk aan een rumoerige omgeving waar u luistert naar het bericht van een krakende omroepinstallatie. Er is een speciale uitdrukking in ons vakgebied, het cocktail-party effect, waarmee het vermogen wordt aangeduid dat wij in een omgeving met vele gelijktijdige sprekers, selectief één bepaalde spreker kunnen volgen. De aard van de neuronale processen die ten grondslag liggen aan het scheiden en sorteren van de informatiestroom in termen van gewenst en ongewenst, signaal en achtergrond, het foreground-background concept, zijn natuurlijk niet exclusief voor het horen, maar zijn kenmerkend voor de werking van het centraal zenuwstelsel. Op grond van boeiende studies aan artificiële neurale netwerken begint er enig begrip te dagen omtrent de eigenschappen van dergelijke processen.

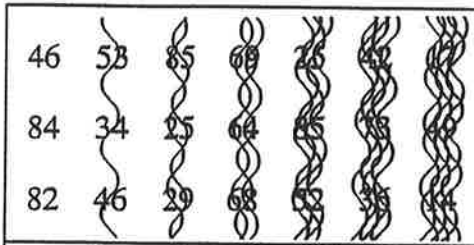
De vraag die speciaal voor ons van belang is, is of slechthorendheid voornamelijk een gevolg is van slechte codering in de cochlea (dus van beperkingen van de interface), of dat daarbij ook centrale problemen een rol kunnen spelen, dus het vermogen tot puzzel-oplossen. Neemt dit vermogen af bij ouderen? Hebben psycho-farmaca daarop wellicht een invloed? Vanuit de psychofysica, dus op grond van luisterexperimenten, is het bijzonder moeilijk daarin inzicht te krijgen, omdat bij het horen nu eenmaal altijd zowel de cochlea als de centrale processen zijn betrokken. Toch lijken er experimenten mogelijk, vooral met meerdere stimuli die tegelijk worden aangeboden, waarbij de prestatie meer bepaald wordt door de

centrale processen, dus door het vermogen tot puzzel-oplossen, dan door de limieten van de cochleaire codering. Wij hebben het voornemen om na te gaan of langs die weg wellicht een relevante luistertest ontwikkeld kan worden die specifiek gericht is op de meer centrale processen bij het horen. Dat zou een belangrijke aanvulling betekenen op de hiervoor genoemde luistertest die specifiek gericht is op de beperkingen van de cochleaire codering.

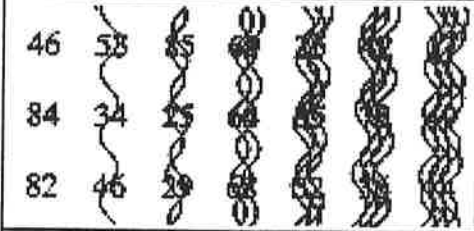
### **Horen en gehoorscherpheid, een illustratie**

Ik wil proberen het beeld dat ik heb geschetst samen te vatten en te illustreren, op een wijze waarbij ik wederom een beroep doe op uw visuele voorstellingsvermogen. Stel u voor dat iemand een aantal getallen uitspreekt. Deze worden in Figuur 7 voorgesteld door de overeenkomstige geschreven symbolen. Wanneer alles in orde is (geen stoorsignalen, een scherpe codering, zoals in de linker kolom van het bovenste plaatje), zijn die natuurlijk gemakkelijk te herkennen. De taak wordt moeilijker wanneer er ook stoorsignalen aanwezig zijn. In het plaatje wordt dat gesymboliseerd door een van links naar rechts toenemende dichtheid van storende elementen. Het onderscheiden van de getallen wordt daardoor moeilijker, maar blijft toch goed mogelijk. Dit wordt geïllustreerd door het resultaat van een informeel experiment met een tiental proefpersonen, waarbij de score per kolom is weergegeven in de grafiek aan de onderzijde. Hoe belangrijk een goede en scherpe codering is voor het scheiden van signaal en achtergrond kan worden geïllustreerd door het gehele patroon met een grove codering af te beelden, zoals in het middelste plaatje. Waar de ongestoorde getallen in de linker kolom nog goed kunnen worden herkend, wordt het onderscheiden van signaal en achtergrond door die onscherpe ernstig belemmerd. Hiermee wil ik illustreren dat een goede en scherpe cochleaire codering een belangrijke en essentiële voorwaarde is voor een





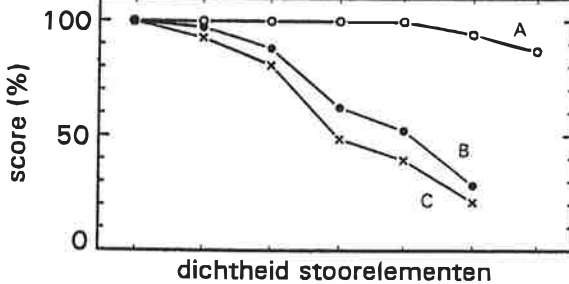
A  
Een aantal willekeurige getallen, met van links naar rechts een toenemende dichtheid van storelementen.



B  
Als A, afgebeeld met een grove codering.



C  
Als B, waarbij de verticale structuur in de storelementen is onderbroken.



*Figuur 7. Illustratie van de mogelijkheid tot het scheiden van signaal en storing bij (A) een scherpe afbeelding, (B) een slechte codering en (C) een onderbreking van de structuur in de storende elementen. De grafiek aan de onderzijde geeft het percentage goed gescoorde cijfers in elk van de kolommen.*

juiste herkenning van geluiden onder sub-optimale omstandigheden, dus waar het gaat om het scheiden van signaal en achtergrond. Anders gezegd: een verminderde gehoorscherpthe als gevolg van een slechte codering betekent vooral een verminderde tolerantie voor storende geluiden. In dit licht is het ook begrijpelijk dat een relevante test voor slechthorenden in verband met het spraakverstaan er juist op gericht moet zijn die tolerantie voor stoorlawaai in kaart te brengen. Het audiologisch onderzoek aan de VU heeft er in belangrijke mate toe bijgedragen dat dit inzicht thans alom wordt gedeeld. In vakkringen neemt deze zogenaamde SRT-test voor slechthorenden een niet meer weg te denken plaats in.

Ik wil nog een stap verder gaan met deze visuele illustratie. Waar de grove codering van de afbeelding symbool stond voor een slechte cochleaire codering, kan een volgende manipulatie worden uitgevoerd waarbij vooral de invloed van meer centrale processen bij het puzzel-oplossen in het geding zijn. Bij het onderscheiden tussen de getallen en de storende elementen speelt de verticale continuïteit in de storende lijntjes een rol. De herkenning van de getallen wordt enigszins belemmerd wanneer die continuïteit wordt onderbroken, zoals blijkt uit het onderste plaatje. Bij deze afbeelding is dus een gedeelte van de storende elementen weggenomen, maar toch is de puzzel, het scheiden van signaal en achtergrond, iets moeilijker oplosbaar, zoals blijkt uit het scoreverloop in de grafiek. Dergelijke verschijnselen spelen ook een rol bij de auditieve waarneming. Denken we nog even terug aan de eerder getoonde geluidplaatjes, dan is voor de centrale processen die een rol spelen bij het ontrafelen van zo'n spectrogram in termen van signaal en achtergrond het héle plaatje van belang, dus de continuïteit en onderlinge relaties van de intensiteitverdeling over een breed gebied van frequentie en tijd. Het manipuleren daarvan biedt ons ook de mogelijkheid, naar wij hopen, tot het ontwikkelen van een test die specifiek gericht is op de meer

centrale processen, zoals ik eerder aangaf.

## Het perspectief

Tot zover de visuele illustratie van de problematiek rond het thema horen en gehoorscherpthe, naar analogie van het thema zien en gezichtsscherpte. De motivatie voor ons werk bij de VU als experimenteel-audiologen is de mogelijke hulp die vanuit de audio-techniek geboden kan worden aan de groep niet-zeer-ernstig slechthorenden, waarvoor vanuit de medische discipline geen doeltreffende behandeling mogelijk is. Het perspectief daarbij is, kort samengevat, als volgt. Een slechthorende wordt onderworpen aan een aantal psychofysische testen, die inzicht geven in de status van zowel de cochleaire codering als van de meer centrale processen. Op grond van die gegevens kan dan bepaald worden wat, voor dié slechthorende, de meest doeltreffende wijze van signaalbewerking is. Ik heb aangegeven dat, om dat perspectief te bereiken, aanvullend onderzoek nodig is op drie gebieden.

Ten eerste, onderzoek op het gebied van geluid, voor het definiëren van de voor het horen essentiële fysische geluidkenmerken waarop de signaalbewerking zich speciaal moet richten. Dat type onderzoek sluit zeer goed aan bij het onderzoekprogramma op het gebied van spraak waarbij ik ben betrokken bij TNO. Graag wil ik mijn erkentelijkheid uitspreken jegens TNO, dat mij in staat stelt deze combinatie van werkzaamheden te realiseren. Ik ben mij er terdege van bewust dat mijn wetenschappelijke bagage voor een belangrijk deel gevormd is, en nog steeds wordt aangevuld, door het participeren in een TNO-Instituut waar het waarnemen door de mens een centraal thema vormt. De gezamenlijke kennis op het gebied van spraakperceptie en spraakanalyse, zowel bij TNO als bij de groep aan de VU, is groot. Zoals gezegd, zullen wij nagaan of het mogelijk is deze kennis toepasbaar te maken voor het bestuderen van het functioneren van de stem-

banden.

Een tweede lijn van onderzoek zal gericht zijn op het ontwikkelen van psychofysische testen die inzicht geven in de status van de cochleaire codering. Daarbij streven wij naar nauwe samenwerking met de groep klinische en experimentele audiologie bij het AMC. Daarnaast achten wij bij dit type onderzoek een intensief overleg en onderlinge afstemming van belang met een onderzoeksgroep op het gebied van de neuronale codering van geluid. In dit verband willen wij streven naar nauwere contacten met de onderzoeksgroep binnen de afdeling KNO van het Academisch Ziekenhuis in Leiden. Het derde onderzoeksgebied is, vanuit mijn optiek, het minst vast omlijnd, maar daarom juist ook uitdagend. Hoe kunnen wij met psychofysische testmethoden doordringen tot de meer centrale processen die bij het horen een rol spelen? Ik hoop dat wij daarbij geïnspireerd worden door de vele activiteiten die, bij de VU en in de regio, gebundeld zijn in de onderzoeksschool neurowetenschappen. Meer nog, ik hoop dat wij via deze weg een relevante bijdrage kunnen leveren aan het totale pakket van onderzoek binnen deze onderzoeksschool.

### Tenslotte

Dames en heren, de plannen zijn er, de lijnen zijn uitgezet, maar de mogelijkheden van een deeltijd-aanstelling zijn nu eenmaal beperkt. Wie gaat dat werk doen? Ik prijs mij buitengewoon gelukkig met de toewijding en de inzet van twee medewerkers, Dr. Festen en de heer van Beek, die onontbeerlijk zijn voor de continuïteit in het werk. Dan zijn er de studenten. Waar het hier gaat om het raakvlak tussen de techniek en de mens, toegespitst op het horen, laten zich interessante kleine deelprojecten definiëren van een zeer uiteenlopend karakter. Voor studenten die zich aangetrokken voelen tot dit vak, hetzij vanuit de natuurkunde, medicijnen, biologie of de psychologie, biedt dit goede mogelijkheden om

kennis te maken met doelgericht onderzoek, en ik wil dat graag bevorderen. Het momentum in het onderzoek moet verkregen worden uit de omvangrijker projecten, uitgevoerd door AIO's vanuit de Universiteit, of gesteund vanuit de tweede of derde geldstroom. Wij, en velen met ons, maken met de toewijzing daarvan thans moeilijke tijden door. Ik hoop dat kwaliteit daarbij zal zegevieren.

Ik verkeer nu ongeveer een jaar in de kringen van de Vakgroep KNO binnen de Medische Faculteit van deze Universiteit. Het hoofd van deze Vakgroep, professor Snow, ben ik erkentelijk voor zijn inzet bij het bevorderen van de continuïteit in het onderzoekgebied experimentele audiologie. Ik ben mij ervan bewust dat het nog geruime tijd zal duren voordat ik enigszins vertrouwd ben met de vele aspecten van het werk dat binnen de vakgroep gebeurt. De meeste verwantschap is er natuurlijk met de groep klinische audiologie, waar het gaat om de directe audiologische patiëntenzorg. Dat is, zij het iets meer op afstand, toch ook de motivatie voor ons werk, en dat vormt de basis voor een goede onderlinge samenwerking.

Tenslotte wil ik een ogenblik stilstaan bij de grote betekenis en invloed, ook voor mij persoonlijk, van mijn voorganger in deze functie, professor Plomp. De wortels van onze samenwerking in het onderzoek liggen bij het Instituut voor Zintuigfysiologie van TNO in Soesterberg, en die samenwerking heeft een historie van dertig jaar. De betekenis daarvan voor mij persoonlijk kan nauwelijks worden overschat. Uit alles blijkt dat de belangstelling voor het thema horen en gehoorscherpheid niet is gestopt bij het terugtreden uit deze functie, en daarin verheug ik mij bijzonder.

Ik heb gezegd.















**VU Boekhandel / Uitgeverij Amsterdam**  
**ISBN 90 - 5383 - 321 - 8**

# Keel-, neus- en oorheelkunde

