

dr ir R. Plomp

Horen, een historisch-wetenschappelijke benadering

Afscheidsrede gegeven bij zijn aftreden als hoogleraar in de experimentele audiologie aan de faculteit der geneeskunde van de Vrije Universiteit te Amsterdam op 25 mei 1994.

vrije Universiteit *amsterdam*



Zeer gewaardeerde toehoorders,

In 1633 legde de Franse geleerde Marin Mersenne (1588-1648) aan Isaac Beeckman (1588-1637), rector van de Latijnse School te Dordrecht, de volgende vraag voor: bij nauwkeurig luisteren blijkt een trillende snaar niet één toon, maar gelijktijdig minstens nog vier tonen voort te brengen waarvan de toonhoogten corresponderen met 2, 3, 4 en 5 maal de frequentie van de grondtoon. We kunnen het Beeckman, en ook de filosoof René Descartes (1596-1650) aan wie Mersenne dezelfde vraag stelde, niet kwalijk nemen dat zij geen bevredigend antwoord konden geven.¹

Buitenwereld en binnenwereld

Ik ben met deze vraag van meer dan 350 jaar geleden begonnen omdat zij het wetenschappelijke grondprobleem van het horen zo goed illustreert. Mersenne stelde een vraag omtrent de *buitenwereld*: de trillende snaar. Hij besepte niet dat zijn observatie met evenveel recht als een vraagstuk van de *binnenwereld* kan worden gezien: het hoorproces dat periodieke trillingen omzet in gewaarwordingen. Men dient dit proces te kennen, wil men het oor als meetinstrument kunnen gebruiken. De natuurwetenschap kon pas goed op gang komen toen men leerde met behulp van *fysische* meetinstrumenten het zintuig zoveel mogelijk uit te schakelen. Intussen bleef het wel interessant de eigenschappen van horen en zien nader te leren kennen. Het in kaart brengen van de relatie tussen de buitenwereld van de fysische verschijnselen en de binnenwereld van onze psychische gewaarwordingen wordt sinds de fysisch Gustav Fechner (1801-1887) in 1860 zijn *Elemente der Psychophysik* publiceerde wel als *psychofysica* aangeduid. Het is het psychofysisch gehooronderzoek waarover wij deze middag willen spreken.

Mersenne was de eerste bij wie het vraagstuk van buiten en binnenwereld zo duidelijk naar voren treedt. Uit de Griekse schemering van de natuurwetenschap kennen we de legendarische vondst

van Pythagoras dat welluidende, consonante samenklanken worden gekenmerkt door eenvoudige lengteverhoudingen van trillende snaren. Deze ontdekking, een van de vroegste natuurwetten, vormde de grondslag van de westerse muziek. Het heeft daarna echter nog meer dan tweeduizend jaar moeten duren voordat de onoverholene minachting van Plato voor die liederen die snaren martelen en hun oren gebruiken om toonverschillen te ontdekken,² definitief overwonnen was. Galileo Galilei (1564-1642), Mersenne en Beeckman waren de eerste natuuronderzoekers die de toonhoogte op de *frequentie* van de trillingen baseerden en hiermede de buitenwereld van het trillen wisten te onderscheiden van de binnenwereld van het horen.³ Het door Mersenne aan de orde gestelde probleem vond meer en meer klaarheid naarmate het inzicht rijpte dat een periodieke trilling kan worden gedacht te zijn samengesteld uit sinusvormige trillingen, met als apotheose het in het begin van de vorige eeuw door Joseph Fourier (1768-1830) geleverde bewijs dat elke willekeurige periodieke functie wiskundig kan worden beschreven als de som van een reeks sinusvormige functies.

Proberen we de observatie van Mersenne in het kader van deze latere inzichten opnieuw te formuleren, dan komen we tot het volgende. De periodieke trillingen van een snaar zijn op te vatten als de som van sinusvormige trillingen, de harmonischen, waarvan wij, behalve de grondtoon, bij zorgvuldig luisteren een aantal als afzonderlijke tonen kunnen waarnemen. Wat is nu buitenwereld, wat binnenwereld? *Fysisch* zijn de trillingen geheel bepaald door de golfvorm en de tijd waarin deze zich herhaalt; het theorema van Fourier is immers een puur mathematisch grapje. *Perceptief* nemen we deeltonen waar en we moeten daarom tot de conclusie komen dat in het gehoororgaan een frequentie-analyse van de opgevangen trillingen plaatsvindt. Niet de duur van de trilling als geheel, maar de frequenties van de volgens Fourier in de trilling opgesloten harmonischen zijn de grondslag van de te onderscheiden deeltonen. De buitenwereld levert een periodieke trilling, de binnenwereld maakt er een serie tonen van. Conclusie: het is het oor dat de Fourieranalyse uitvoert.

Het probleem van de toonhoogte 1: periodeduur versus frequentie

Dit is een uiterst belangrijke conclusie. Buitenwereld en binnenwereld zijn nu duidelijk onderscheiden, maar de vraagstelling is verlegd naar de gehoortheorie. Daar doemt een groot probleem op. De periodieke luchtdrukvariaties van de menselijke stem en muziekinstrumenten worden gekenmerkt door een enkele, eenduidige toonhoogte, die correspondeert met de periodeduur van de trillingen. Dit suggereert dat het waarnemen van toonhoogte op *temporele* informatie berust. Het kunnen waarnemen van deeltonen alsmede van verschillen in klankkleur tussen op dezelfde toonhoogte voortgebrachte tonen veronderstelt frequentie-analyse, dus dat *spectrale* informatie in hoge mate bepalend is voor wat wij horen. Hier ligt het basisdilemma van de gehoortheorie: welke rol speelt de tijd als parameter en welke de frequentie? De hedendaagse, op het theorema van Fourier gebaseerde signaalanalyse leert dat beschrijvingen in termen van tijd en frequentie volkomen gelijkwaardig zijn en in elkaar kunnen worden overgezet. Hoe ligt dat bij de gehoorzin? Ziehier de boeiendste wetenschappelijke vraagstelling van het horen, ook nu nog volop actueel.

Als we deze gelijkwaardigheid van tijd en frequentie als leidraad nemen, valt het minder moeilijk de historische ontwikkeling van het gehooronderzoek en van de gehoortheorie te volgen. Steeds weer gaat het om de betekenis van het temporele versus het spectrale. Dat bleek reeds zeer spoedig na Fourier. In 1841 publiceerde August Seebeck (1805-1849) een artikel dat een lange en vaak heftige discussie inluidde over het fysisch correlaat van de toonhoogte.⁴ Seebeck produceerde tonen met behulp van een sirene en het is daarom niet verwonderlijk dat hij in het ritme van de luchtstootjes de oorsprong van de toonhoogtegevoelens zag. Deze opvatting riep de onmiddellijke reactie op van Georg Simon Ohm (1787-1854), welbekend als de grondlegger van de naar hem genoemde elektrische wet, die zich in wat hij de *definitie van de toon* noemde op Fourier beriep. De luchtstootjes van de sirene van Seebeck bestaan immers uit een reeks sinusvormige componenten. Ohm trok

de consequente conclusie dat het theorema van Fourier als een model kan worden opgevat van het vermogen van ons gehoororgaan periodieke trillingen in haar harmonische componenten te ontbinden. Zijns inziens was de grondtoon verantwoordelijk voor de door Seebeck waargenomen toonhoogte.

Helmholtz's Lehre von den Tonempfindungen

De controverse Seebeck-Ohm was het begin van wat als de eerste stroomvernelling van het wetenschappelijk gehooronderzoek kan worden beschouwd. Zoals voor het geheel van de natuurwetenschap van die dagen geldt, lag ook hier het zwaartepunt in Duitsland.⁵ Het onbetwistbare hoogtepunt vormde de in 1862 door Hermann von Helmholtz (1821-1894) uitgegeven *Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Deze universele geleerde heeft in een zo sterke mate de ontwikkeling van het gehooronderzoek bepaald, dat we wat langer bij hem moeten stilstaan.⁶

Hoewel Helmholtz's belangstelling in zijn jonge jaren het meest naar de natuurkunde uitging, kreeg hij om financiële redenen een medische opleiding die hem verplichtte enige jaren als militair arts werkzaam te zijn. Op 21-jarige leeftijd verwierf Helmholtz de doctorstitel op een proefschrift waarin hij de fundamentele anatomische ontdekking beschreef dat de zenuwvezels hun oorsprong hebben in ganglioncellen. Vier jaar later hield hij voor het natuurkundig genootschap van Berlijn zijn beroemd geworden lezing over het behoud van arbeidsvermogen, waarna zijn ster snel steeg. In 1855 wordt hij benoemd tot hoogleraar in de anatomie en fysiologie te Bonn. In dat jaar begint ook zijn bestudering van het gehoor. Immers, op 29 maart 1862 schrijft hij, inmiddels hoogleraar in de fysiologie te Heidelberg, aan zijn collega en vriend Franciscus Cornelis Donders (1818-1889) te Utrecht, dat hij reeds zeven jaar aan zijn boek gewerkt heeft en blij zal zijn met de voltooiing. Dit temeer, daar hij over de ontvangst niet optimistisch gestemd is. Filosofen en musici zullen het boek wellicht als een inbreuk op hun

eigen gebied opvatten, terwijl onder de fysici en fysiologen niet veel muzikale lieden zijn zoals Donders die hij als zijn meest deskundige criticus beschouwt. Daarom is hij zeer benieuwd naar zijn mening.⁷ Donders, de beroemdste Nederlandse medicus van de 19de eeuw, oprichter van het Ooglijdersgasthuis en hoogleraar in de fysiologie te Utrecht, interesseerde zich, evenals Helmholtz, voor de fysica en perceptie van spraakklanken, waarover hij enige artikelen heeft geschreven.⁸

De vrees van Helmholtz over de ontvangst van zijn boek is echter geheel ongegrond. Binnen twee jaar ligt een tweede druk ter perse, waarna nog vele volgen, terwijl spoedig ook een Engelse vertaling het licht ziet. Als Helmholtz in 1864 enige dagen bij Donders te Utrecht logeert, die hij, zoals hij aan zijn vrouw schrijft, "blühend, liebenswürdig und poetisch wie immer" aantreft, maakt hij daar een concert mee dat door de Utrechtse heren bij wijn en sigaren wordt aangehoord. Dank zij voordrachten van Donders is zijn boek aan een ieder bekend, ook de musici.⁹

Helmholtz's *Lehre von den Tonempfindungen* is inderdaad een mijlpaal in de ontwikkeling van onze kennis van het gehoor. Dit dankt het boek vooral aan de grote aandacht van de schrijver voor de *waarneming* en zijn genialiteit in het bedenken van hulpmiddelen, zoals de naar hem genoemde resonatoren, om het horen van de harmonischen van een samengestelde toon te vergemakkelijken. Het boek is een overtuigende illustratie van het succes van de natuurwetenschappelijke methode in de fysiologie. In zijn rede "Das Denken in der Medicin", in 1877 uitgesproken voor het instituut waar hij 35 jaar eerder zijn medische opleiding voltooide, heeft Helmholtz zijn visie hierop nader uiteengezet. Hij herinnert zijn toehoorders aan de minachting die hij indertijd nog aantrof voor auscultatie en percussie van de borstholte omdat met deze handelingen de mens tot machine zou worden gedenatureerd, en memoreert ook de opvatting van oude collega's dat het gebruik van een tijdmetrator bij het beluisteren van de pols niet van goede smaak zou getuigen.¹⁰ Zoals o.a. door Max Planck (1858-1947) de grondlegger van de quantumtheorie is beschreven, waren de colleges van Helmholtz

holtz, in tegenstelling tot zijn boeken en redevoeringen, weinig inspirerend.¹¹

Maar laten we na dit uitstapje haastig terugkeren naar *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Het boek representeert de klassieke gehoortheorie zoals zij vrijwel een eeuw het terrein heeft beheerst. Helmholtz beschouwt de cochlea (het binnenoor) als een soort piano waarvan de snaren mee gaan trillen als de frequentie van het geluid met de eigenfrequentie overeenstemt. Ernst Mach (1838-1916) heeft dit mechanisme goedvol beschreven in zijn omstreeks 1864 als *Privatdozent* te Wenen gehouden *Populäre Vorlesungen über musikalische Akustik*, waarin hij de dames onder zijn gehoor het meetrillen probeert duidelijk te maken door het te vergelijken met het onwillekeurig sneller kloppen van het vrouwelijk hart bij het zien van de geliefde. Door de frequentie-analyse à la Fourier worden de trillingen in hun sinusvormige componenten uiteengelegd, waarbij het timbre (of klankkleur) door de relatieve sterkten van de harmonischen wordt bepaald en de toonhoogte door de frequentie van de grondtoon. Helmholtz koos hierbij voor de opvatting van Ohm. Het argument van Seebeck dat volgens zijn sireneproeven ook zonder aanwezige grondtoon toch de ermee corresponderende toonhoogte wordt gehoord, pareerde Helmholtz door aan te tonen dat deze grondtoon door vervorming van het oor opnieuw wordt geïntroduceerd. De Fourieranalyse heeft echter een grens; dicht bij elkaar liggende frequentiecomponenten kunnen niet door het oor worden gescheiden en geven aanleiding tot zwevingen en ruwheid. Duidelijk blijkt dat Helmholtz in het dilemma *spectraal* of *temporeel* voor het eerste kiest. Zijn herleiding van dissonantie tot zwevingen en ruwheid betekende een breuk met de aloude verklaring van consonantie dat de ziel behagen schept in de ritmische relaties van de trillingen bij eenvoudige frequentieverhoudingen - in essentie een temporele verklaring.

We moeten ons voor een juiste waardering van deze eerste periode van intensief gehooronderzoek de historische omstandigheden goed realiseren. Helmholtz's boek is de verbale weergave van zijn eigen geniale observaties, echter zonder grafieken met meetpunten

zoals wij deze gewend zijn. Dat had twee oorzaken: er bestonden geen instrumenten om geluidsdrukken te meten en ook geen meetmethoden waarbij onder gecontroleerde omstandigheden waarnemingen konden worden verricht.

Opkomst van het Amerikaanse onderzoek: de "zuivere" toon

Die Lehre von den Tonempfindungen leidde in Duitsland tot een stroom van verder onderzoek dat in essentie echter relatief weinig aan de door Helmholtz ontwikkelde gehoortheorie toevoegde.¹² Maar zoals dat voor de natuurwetenschap in het algemeen gold, heeft dat land ook hier zijn vooraanstaande positie op den duur moeten afstaan aan de Verenigde Staten. De ontwikkeling van de technologie, een zo bij uitstek Amerikaanse aangelegenheid, heeft hierbij ongetwijfeld een grote rol gespeeld. Pas de opkomst van de electronica maakte het mogelijk de door een microfoon opgevangen geluidsignalen electrisch te versterken, te analyseren en in getallen vast te leggen.

De wezenlijke uitbreiding van de kennis over het horen in de interimperiode tussen wat ik als eerste stroomversnelling heb aangeduid en de tweede stroomversnelling van na de tweede wereldoorlog, werd in feite slechts door enkele onderzoekers beheerst. Als de belangrijkste zijn te noemen: Fletcher, Davis en Stevens. Hun verschillende benaderingswijze, als fysicus, fysioloog resp. psycholoog, illustreert het multidisciplinaire karakter van het gehooronderzoek.

Harvey Fletcher (1884-1981), de gelovige Mormon uit Provo, Utah, van wie verteld wordt dat hij in zijn jeugd rond de eeuwwisseling met een mes een prairiehond doodde, trok in 1908 naar Chicago waar hij bij Millikan (1868-1953) een belangrijke bijdrage leverde aan de bepaling van de lading van het electron waarvoor deze in 1923 een Nobelprijs kreeg. Na in 1911 *summa cum laude* te zijn gepromoveerd, trad Fletcher in 1916 in dienst van de Western Electric Company, waarna zijn briljante carrière in de akoestiek, de spraakcommunicatie en het gehooronderzoek begon. Van 1925

tot 1949 leidde hij het natuurkundig onderzoek van de Bell Telephone Laboratories, waar hij de eerste elektronische audiometer en het eerste moderne hoortoestel ontwikkelde. In 1929 was hij de eerste president van de Acoustical Society of America.¹³

Hallowell Davis (1896-1992) ontving in 1922 zijn M.D. van Harvard Medical School (Cambridge, Mass.) waarna hij zich in de electrofysiologie verder ontwikkelde en de pionier werd van het electrofysiologisch gehooronderzoek. De eerste duidelijke EEG-registraties in de Verenigde Staten werden door studenten van de schedel van Davis afgeleid. In 1946 kreeg hij de leiding van het gehooronderzoek van het fameuze Central Institute for the Deaf te St. Louis (Missouri) waar hij zich ook nog lang na zijn pensionering onvermoeibaar inzette voor slechthorenden en doven.¹⁴

Stanley Smith Stevens (1906-1973), in Amerika meer bekend als "Smitty" Stevens, stamde evenals Fletcher uit Utah. Na de High School wijdde hij zich, zoals gebruikelijk was bij de Mormonen, drie jaar aan de zending, en wel in België, kennelijk in het Waalse land want ik heb niet van hem vernomen dat hij ooit onze taal heeft gesproken. In 1933 behaalde Stevens zijn Ph.D. in de psychologie aan Harvard waar hij zijn verdere carrière met gehooronderzoek zou doorbrengen en blijvende bekendheid verwierf met zijn subjectieve schalen voor o.a. luidheid en toonhoogte. De bekende regel dat een factor twee in luidheid met 9 decibel overeenkomt, danken we aan Stevens.¹⁵

Het in 1938 door Stevens en Davis gezamenlijk gepubliceerde boek *Hearing - Its Psychology and Physiology* is de beste weergave van wat het vooroorlogse gehooronderzoek na de door Helmholtz beheerste eerste fase heeft opgeleverd. Wanneer men dit boek ter hand neemt, ervaart men echter een groot verschil met dat van de grote voorganger. Terwijl E.G. Boring in zijn "ten geleide" aan Helmholtz refereert om vervolgens te concluderen dat wij nu zeker toe zijn aan een nieuwe *Lehre von den Tonempfindungen*, heeft het boek in feite een veel engere scope. Vrijwel alle aandacht gaat naar de wijze waarop de sinusvormige trilling, de zgn. "zuivere toon", wordt gepercipieerd. Het dilemma of de toonhoogte is gebaseerd op

de *periodeduur* via de door Davis gevonden synchronie van de elektrische zenuwimpulsen, dan wel op de *frequentie* via de plaats van maximale trilling van het basilaire membraan in de cochlea wordt zonder veel discussie in laatstgenoemde zin beslist. De door Seebeck in de strijd geworpen *missing fundamental* wordt wel als zodanig genoemd, maar blijkbaar door de schrijvers niet als probleem ervaren. Dat is ook begrijpelijk als, in tegenstelling tot Helmholtz, de aandacht beperkt blijft tot de zuivere toon met haar één-op-één relatie tussen periodeduur en frequentie. De ontwikkeling van de electronica met haar voorliefde voor de sinusvormige trilling als meetsignaal zal ongetwijfeld tot deze beperking hebben bijgedragen.

Het boek van Stevens en Davis laat zien wat men inmiddels over de waarneming van de enkelvoudige toon te weten was gekomen: de gehoordrempel, het juist waarneembare verschil in geluidsdruk-niveau en frequentie en hun betekenis voor luidheid en toonhoogte. Hoewel deze reductie tot de waarneming van zuivere tonen als tussenfase in het onderzoek wel begrijpelijk is, betekende zij in feite wel dat de behandeling abstracter werd, minder gerelateerd aan de alledaagse geluiden die bij Helmholtz zo'n grote rol hadden gespeeld.

Het probleem van de toonhoogte 2: de rol van de frequentie-analyse

Dit boek en de in 1953 verschenen tweede druk van Fletchers *Speech and Hearing in Communication* vormden mijn eerste kennismaking met het gehooronderzoek toen ik in dat jaar, om mijn militaire diensttijd zo aangenaam mogelijk door te brengen, een aanstelling bij het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO (toen nog Werkgroep Waarneming geheten) aanvaardde. Aangezien het bij TNO om een nieuwe tak van onderzoek ging, na het enige jaren eerder door de directeur M.A. Bouman aangevangen visuele onderzoek, werd ik tijdelijk in het laboratorium van Groen op de zolder van het hoofdgebouw van het Academisch Ziekenhuis te Utrecht gestationneerd. J.J. Groen (1912-1973) en H.C. Huizing (1903-

1972) in Groningen waren op dat moment vrijwel de enige fysici in den lande die zich met psychofysisch gehooronderzoek bezighielden, beiden in klinisch verband.

Een belangrijk kenmerk van het onderzoek na ca. 1950 was dat niet meer volstaan werd met de eigenschappen van zuivere tonen als zodanig, maar dat de interactie van tonen en de perceptie van tooncomplexen en ruisbanden weer aandacht kregen. Ik kan hier geen recht doen aan de grote vooruitgang die het gehooronderzoek toen doormaakte. Slechts moge ik aanduiden dat deze o.a. de grenzen van het frequentie-analyserend vermogen van het oor betroffen (de zgn. kritische bandbreedte), het maskeerpatroon van zuivere tonen en ruisbanden, de luidheid, toonhoogte en timbre van samengestelde geluiden en het binauraal horen.

Deze verbreding en verdieping van de kennis werd door twee belangrijke ontwikkelingen gestimuleerd. De eerste betrof de enorme uitbreiding van de technische mogelijkheden geluidsignalen te genereren. Terwijl men rond 1950 al blij was over een sinusgenerator te beschikken, namen de mogelijkheden snel toe, met name na de introductie van digitale technieken. De tweede, minstens zo essentiële vooruitgang betrof de meetprocedures. In dit verband moet bovenal de signaaldetectietheorie worden genoemd waaraan o.a. de namen van Tanner, Swets en Green verbonden zijn. Volgens deze theorie gaat het bij de waarneming steeds om het al of niet kunnen detecteren van een stimulus tegen een storende achtergrond, als ruis aangeduid. Een zeer kritische luisteraar zal pas zeggen de stimulus te hebben gehoord als hij heel zeker van zijn zaak is, terwijl een ander al veel eerder positief zal responderen, met een groter risico van fouten. Dergelijke verschillen in het criterium leiden tot aanmerkelijke verschillen in uitkomst en dus tot onbetrouwbaarheid van de meetresultaten. De signaaldetectietheorie heeft ons geleerd met dit criteriumprobleem om te gaan en de invloed zoveel mogelijk te reduceren met behulp van de gedwongen-keuzemethode, tegenwoordig zo wel bekend van de door velen (terecht) verfoeide methode voor het testen van tentamenkennis. Voor het zintuigonderzoek was deze methode echter een zege.

Als tweede eveneens zeer belangrijke vooruitgang in de methodiek kan de binnen de sociale wetenschappen ontwikkelde zgn. multivariate analyse worden genoemd, waarmede verschijnselen met meerdere tegelijkertijd veranderende parameters kunnen worden onderzocht. Het ideaal van de fysicus is alle parameters constant te houden behalve degene die men variëren wil. Deze aanpak is in het zintuigonderzoek echter niet vol te houden. Zo worden timbreverschillen door een groot aantal getallen, teweten het geluiddruk-niveau als functie van de frequentie, bepaald. Door uit een verzameling geluiden de proefpersoon achtereenvolgens verschillende drietallen aan te bieden, waarvan deze steeds het meest op elkaar lijkende paar en het minst op elkaar lijkende paar moet aanwijzen, kunnen de perceptuele verschillen tussen in meer dan één dimensie verschillende gewaarwordingen worden vastgelegd. Door Kruskal¹⁶ en anderen zijn algoritmen ontwikkeld waarmede deze verschillen meerdimensionaal in kaart kunnen worden gebracht. Dergelijke procedures kan men vergelijken met het reconstrueren van een landkaart uitgaande van een afstandentabel.

De introductie van de computer betekende niet alleen een veel grotere vrijheid in de aanmaak van geluidstimuli, maar gaf ook de mogelijkheid min of meer automatische meetstrategieën bij de aanbieding van de stimuli toe te passen, de responsies digitaal op te slaan en hierop statistische analyses uit te voeren. Kortom, zoals op zovele terreinen, is de aanpak van het onderzoek ook hier binnen enkele decennia radicaal veranderd.

Terwijl, zoals gezegd, het zwaartepunt van het naoorlogse gehooronderzoek onbetwist in de Verenigde Staten ligt, mag worden geconstateerd dat, naast de Duitse bijdrage van met name Eberhard Zwicker (1924-1990),¹⁷ de Nederlandse naar verhouding aanzienlijk is geweest. In de periode tot ca. 1975 betrof deze bijdrage vooral de toonperceptie van het normale, gezonde gehoororgaan. Reeds kort voor de tweede wereldoorlog had J.F. Schouten (1910-1980) van het Natuurkundig Laboratorium van Philips de oude controverse tussen Ohm en Seebeck over de oorsprong van de toonhoogte nieuw leven ingeblazen met de door hem geconstrueerde optische

sirene. Zijn experimenten bevestigden wat Seebeck een eeuw vroeger had gevonden, dat de grondtoon niet essentieel is voor de toonhoogte van periodieke geluiden. Hiermede was het dilemma *temporeel versus spectraal* weer springlevend.

Na de tweede wereldoorlog begon dit pas goed door te werken. Groen, mijn *coach* in Utrecht en een besliste aanhanger van Helmholtz's gehoortheorie, liet de KNO-arts in opleiding G.A. Hoogland nieuwe experimenten uitvoeren die z.i. aantoonde dat de resultaten van Schouten moesten worden verklaard uit vervorming in diens apparatuur waardoor de *missing fundamental* opnieuw werd geïntroduceerd. Dat kon Schouten uiteraard niet op zich laten zitten. Het gerucht liep dat hij bij de promotie van Hoogland in 1953 zijn bezwaren schriftelijk aan de rector heeft kenbaar gemaakt. Het was echter een besloten zitting zodat Schouten zijn kritiek niet naar voren kon brengen.

De kwestie begon nog meer te leven toen de gerenommeerde Amerikaanse onderzoeker J.C.R. Licklider (1915-1990)¹⁴ zich voor dit probleem begon te interesseren en op de 47ste bijeenkomst van de Acoustical Society of America in juni 1954 met behulp van ruis, die een eventueel door vervorming geïntroduceerde grondtoon onhoorbaar maakte, overtuigend aantoonde dat de toonhoogte van samengestelde tonen niet op de grondtoon, maar op de harmonischen moet zijn gebaseerd.¹⁹ In september van 1955 kwam Licklider naar ons land, bezocht Schouten in Eindhoven en de volgende dag Groen en Hoogland in Utrecht. Ik kan me nog levendig herinneren hoe Licklider in mijn kamer op de zolder van het hoofdgebouw van het Academisch Ziekenhuis via een bandopname zijn inmiddels klassieke demonstratie liet horen dat een melodie behouden blijft als men de grondtoon met ruis maskeert. Bij deze demonstratie was ook E. de Boer aanwezig die op dat moment aan de Universiteit van Amsterdam de summere observatie van Schouten dat de toonhoogte verandert als men de harmonischen gezamenlijk in frequentie verschuift, nader experimenteel en theoretisch uitwerkte, zijn promotie-onderzoek.

Het zal duidelijk zijn dat dit alles mijn eigen belangstelling voor

de vragen rondom de perceptie van tonen flink versterkte. De bestudering van *Die Lehre von den Tonempfindungen* bracht mij helemaal in de ban. Onweerstaanbaar kwam de vraag op of de vraagstukken die Helmholtz slechts kwalitatief had kunnen onderzoeken, inmiddels met betere apparatuur en meetmethoden tot een kwantitatieve oplossing waren gebracht. Het boek van Stevens en Davis en de latere literatuur toonde dat dit geenszins het geval was. Daarom legde ik mij er op toe de vragen van Helmholtz opnieuw aan een onderzoek te onderwerpen, maar nu met behulp van moderne apparatuur en meetmethoden. Dit onderzoek betrof de waarneembaarheid van individuele harmonischen, van in het oor gegenereerde verschiltönen en zwevingen en hun rol t.a.v. consonantie en dissonantie en de vraag welke harmonischen voor de toonhoogte het meest belangrijk zijn. Deze studies leverden de stof voor mijn proefschrift in 1966.

In dit geschrift meende ik op grond van de experimentele evidentie van anderen en het eigen onderzoek voor de periodiciteit als fysisch correlaat van de toonhoogte te moeten kiezen, dus *pro* Schouten en *contra* Groen. Die keuze werd spannend toen verwacht kon worden dat ik beiden bij de promotie in de illustre senaatszaal van de Utrechtse universiteit als opponenten tegenover mij zou vinden. Om de kritiek van Groen een slag voor te zijn, onderzocht ik op de valreep of het spuiten van koud water in het oor tot een verschuiving van de toonhoogte leidde. Zoals dit bij de evenwichtszin het geval is, zou men een effect op de hydrodynamische eigenschappen van de vloeistoffen in de cochlea mogen verwachten, dus wellicht op de toonhoogte als deze niet op de periodeduur maar op de plaats van maximale stimulering van het basilaire membraan zou zijn gebaseerd. Het experiment leverde de voorspelde duizeligheid op, maar geen toonhoogteverschuiving. Helaas koos Groen tijdens de promotiezitting een andere bedenking.

Nog in hetzelfde jaar werd mij de gelegenheid geboden de Verenigde Staten te bezoeken in een "grand tour" van drie maanden. Hiervan maakte ik een dankbaar gebruik om niet alleen zoveel mogelijk vakgenoten te ontmoeten, maar ook de grote voortrekkers

die ik via de literatuur had leren kennen.²⁰ Ik beperk mij hier tot de drie eerder genoemde grondleggers: Stevens, Davis en Fletcher. Het bleek onvermijdelijk bij Stevens in Harvard een proefje van zijn beroemde schalering van gewaarwordingen te ondergaan. Verborgen door een doekje schoof hij mij stukjes schuurpapier toe waarvan ik de ruwheid in een getal moest uitdrukken. Natuurlijk wist hij uit zijn hoofd te concluderen dat mijn antwoorden geheel overeenkwamen met de door hem ontwikkelde machtsfunctie. Voor een bezoek aan Fletcher moest ik, hetgeen mij niet onwelkom was, op de oversteek naar Californië ook de staat Utah aandoen. Na zijn pensionering bij Bell Telephone was hij naar het land van zijn vaders teruggekeerd waar hij aan de Brigham Young University te Provo akoestisch onderzoek verrichtte. Davis trof ik, eveneens emeriteerd en zeer actief, in zijn kleine, geheel met oorkonden en certificaten behangen werkkamer te St. Louis aan.

Inmiddels was ook in ons land de bedrijvigheid op het terrein van de toonperceptie flink toegenomen. Achteraf is het verbazingwekkend te zien in welke hoge mate het in verschillende centra verrichte onderzoek van allerlei aspecten van het horen van tonen op elkaar was afgestemd. Zonder dat van een formele sturing sprake was - de Stichting voor Biofysica bestond nog niet - kon men van een typisch Nederlandse school spreken. Na de oprichting van het Instituut voor Perceptie-Onderzoek te Eindhoven in 1957 met Schouten als directeur, had deze zijn oude liefde weer opgevat. Samen met R. J. Ritsma en B.L. Cardozo werd de rol van de samenwerkende harmonischen in de totstandkoming van de toonhoogte, door hem als *residu*toonhoogte aangeduid, nader onder de loep genomen. Voor de verklaring van de frequentieverandering wanneer men de harmonischen eenzelfde waarde in frequentie verschuift werd het, o.a. uit metingen van F.A. Bilsen te Delft, meer en meer duidelijk dat vooral de lage harmonischen rond de vierde belangrijk zijn. Zoals Smoorenburg in het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg aantoonde, konden ook in het oor gegenereerde combinatie-tonen hierbij een rol spelen.

Voor het toonhoogtemechanisme betekende dit een forse

wijziging: Niet de door de beperkte frequentie-analyse van het oor samenwerkende *hogere* harmonischen, maar de nog wel in dit proces gescheiden *lagere* harmonischen bleken de toonhoogte van periodieke geluiden te bepalen. De Boer had in zijn dissertatie al aangetoond dat er wiskundig twee gelijkwaardige mogelijkheden zijn: de periodiciteit van de golfvorm van ongescheiden harmonischen of een soort patroonherkenning van de frequenties van wel gescheiden deeltonen. Dit laatste hoeft niet automatisch te betekenen dat we toch weer bij een *spectrale* verklaring van de toonhoogte terecht zijn gekomen. We blijven immers met de vraag zitten of in een hoger centrum de toonhoogte van de plaats van maximale stimulering van de zenuwvezels in de cochlea dan wel van de periodiciteit van de op die plaats gefinitieerde zenuwimpulsen wordt afgeleid. Door de Amerikanen J.L. Goldstein en F.L. Wightman die resp. een jaar bij het IPO en twee jaar bij het IZF-TNO hadden doorgebracht, werden onafhankelijk van elkaar in 1973 modellen van de toonhoogte-extractor uitgewerkt. Uiteraard hielden ook anderen zich met deze problematiek bezig.

De relatieve betekenis van temporele en spectrale informatie in het hoorproces werd ook vanuit geheel andere invalshoeken benaderd. Mijn eigen aandacht was vooral gericht op het verband tussen frequentiespectrum en timbre van periodieke geluiden. De daarbij geconstateerde irrelevantie van faserelaties bevestigde de visie dat de golfvorm van ongescheiden harmonischen nauwelijks of geen betekenis kan hebben voor de toonhoogte. Het consonantie-onderzoek van W.J.M. Levelt, J.P. van de Geer en mij in 1966 was het eerste experiment in Nederland waarbij op de eerder aangeduide wijze uitgaande van een matrix van perceptieve verschillen een meerdimensionale afbeelding van een onderliggende perceptieve ruimte werd geconstrueerd. Levelt moest naar Düsseldorf reizen om een computer te vinden waarop het zo bekend geworden *multidimensional scaling program* van Kruskal, door hem op ponskaarten aangeleverd, kon worden gedraaid. Daarna kon het dankbaar gebruikt worden voor het onderzoek van timbre en toonhoogte als onafhankelijke dimensies, alsmede van de relatie tussen het *fysische* spec-

trum van muzikale tonen en spraaklinkers en hun afbeelding in een meerdimensionale *perceptieve* ruimte. Deze aanpak bleek een zo goed model van het hoorproces op te leveren dat hierop door L.C.W. Pols met succes een woordherkenningsalgoritme kon worden ontwikkeld.

Deze summier samenvatting kan niet worden afgesloten zonder de belangrijke ontdekking van T. Houtgast te noemen dat, evenals de zgn. Machbanden van het oog, ook bij het gehoor een opscherpingsmechanisme in de vorm van laterale inhibitie werkzaam is, een psychofysische bevestiging van fysiologische gegevens. Zijn in 1974 gepubliceerde proefschrift trok internationaal meer belangstelling dan enig ander Nederlands proefschrift op het onderhavige gebied na dat van De Boer in 1956.²¹

Het zal geen verwondering wekken dat de omvang en ook de *impact* van het Nederlandse gehooronderzoek aanmerkelijk groter was en is dan de 1.5 à 2% die ons land gemiddeld aan de totale internationale wetenschap bijdraagt. Nemen we het aantal artikelen op het gebied van het psychofysisch gehooronderzoek in het veruit meest representatieve tijdschrift *The Journal of the Acoustical Society of America* als maatstaf, dan komen we in de buurt van de 5%.²²

Aandacht voor de slechthorendheid

Uit wat tot nu toe is gezegd, mag niet worden geconcludeerd dat de wetenschappelijke inspanning beperkt bleef tot het gezonde oor. Tot ca. 1970 ging inderdaad de meeste aandacht uit naar de gehoortheorie en waren de experimenten gericht op het doorgronden van het normale horen. Maar na dat jaar kwam hierin verandering. Allerwege, en met name ook in de Verenigde Staten, ging men zich afvragen hoe de verkregen inzichten zouden kunnen worden gebruikt ten behoeve van slechthorenden, het terrein dat met de term audiologie pleegt te worden aangeduid. Men vindt deze toegenomen belangstelling weerspiegeld in de tijdschriften. Terwijl er vóór 1950 geen enkel specifiek audiologisch tijdschrift bestond, kan

men er op dit moment minstens zes noemen die dit terrein vertegenwoordigen.²³ Dit geeft tevens aan dat de productie in aantal artikelen op dit gebied in de laatste decennia sterk is toegenomen.

Deze activiteiten betroffen deels de verbetering van de diagnostiek, maar hiervoor heeft het electrofysiologisch georiënteerde onderzoek méér betekend. Het psychofysisch onderzoek beperkte zich meer tot de problematiek van de niet-operabele slechthorendheid en haar relatie tot fundamentele gehoorfuncties als het frequentie-analyserend vermogen en de temporele resolutie van het gehoororgaan. Het zal duidelijk zijn dat in verband met de sociale betekenis van het horen de verstaanbaarheid van spraak hierbij een dominerende rol speelde.

Ook hier heeft Nederland zijn partijtje aardig meegeblazen.²⁴ Als illustratie moge dienen dat Ritsma in 1970 van het IPO naar Groningen vertrok als hoogleraar en opvolger van Huizing en dat mij in 1972 vanuit het IZF-TNO een part-time aanstelling aan de Vrije Universiteit werd aangeboden, terwijl in 1983 de na de dood van Groen in 1973 niet vervulde vacature beëindigd werd door de eveneens part-time benoeming van Smoorenburg. In alle drie gevallen ging het om personen die zich voordien nauwelijks of niet met het pathologisch horen hadden bezig gehouden, maar daarna een aanzienlijke activiteit op dat gebied ontplooiden.

Dit onderzoek, weer met de Verenigde Staten voorop, maar daarnaast ook sterk vertegenwoordigd door Engeland, Scandinavië en Nederland, heeft aanzienlijk bijgedragen tot een beter inzicht van de communicatiemoeilijkheden van de slechthorenden en de compensatiemogelijkheden van het moderne hoortoestel, al moet worden gezegd dat deze mogelijkheden beperkter zijn dan wel eens in al te groot optimisme in het verleden is gedacht. Het probleem van de signaal-ruisverhouding waarover eertijds op deze plaats mijn inaugurele rede handelde, is sindsdien vrijwel allerwege als hoofdprobleem van de slechthorendheid erkend, maar nog niet tot een oplossing gebracht. Het onderzoek in onze experimenteel-audiologische groep, mede geleid door J.M. Festen, heeft zich, naast het meer klinisch gerichte onderzoek van T.S. Kapteyn, in sterke mate ge-

concentreerd op het signaal-ruisprobleem en de mogelijkheden van hoortoestellen waarin de frequenties van de spraak in een aantal kanalen worden opgesplitst.²⁵

De toekomst van het gehooronderzoek

Wanneer ik mij, aan het eind van mijn historische verhandeling gekomen, waag aan de vraag wat de toekomst nog zal brengen, dan meen ik in de eerste plaats vast te mogen stellen dat het terrein inmiddels aardig in kaart lijkt te zijn gebracht. Ik haast mij echter hierbij aan te tekenen dat dit vooral de wat ik zou willen noemen "harde" eigenschappen van het auditieve systeem betreft. Traditioneel is de aanpak van het gehooronderzoek gericht op die verschijnselen die bij herhaald meten na enige training stabiele waarden opleveren, zoals de gehoordrempel, het frequentie-analyserend vermogen e.d. Maar daarmee is bij lange na niet alles gezegd. Men denke met name aan het vermogen gelijktijdige geluiden, bijv. stemmen of muziekinstrumenten, gescheiden te horen. Hier hebben we misschien wel met de meest raadselachtige eigenschap van het gehoor te maken, reeds door Helmholtz onderkend, maar na hem weinig bestudeerd. Het oor voert, puur op basis van de frequentie, een analyse uit waarbij van de samenhang van wat bij het ene en wat bij het andere geluid hoort in feite weinig overblijft. Ondanks de schijnbaar onontwarbare superpositie van de luchttrillingen, horen we zonder enige moeite de individuele geluiden alsof zij nooit vermengd zijn geweest. Zelfs delen van het ene geluid die door het andere volledig zijn gemaskeerd, blijken subjectief toch aanwezig te zijn. Op de analyse in het perifere gehoororgaan volgt in de hersenen een synthese die er op uit is de geluiden die tot ons komen te reconstrueren en daar ook wonderlijk wel in slaagt. Opnieuw een aardige kluit voor het vaststellen van de rol die de temporele tegenover de spectrale factoren in het auditieve proces spelen. Aangezien hierbij onbewuste zowel als bewuste verwachtingsprocessen van belang blijken te zijn, schieten de traditionele meetmethodieken met hun herhaalde aanbieding van dezelfde sti-

muli hopeloos tekort. Dergelijk onderzoek overschrijdt de totnogtoe stilzwijgend geëerbiedigde grens tussen het puur auditieve en het cognitieve. Hier ligt een heel terrein braak waaraan nog weinig aandacht is gegeven.

Deze leemte geldt in de eerste plaats het psychofysisch onderzoek, maar in feite in nog veel sterkere mate het electrofysiologisch onderzoek.²⁶ In het verleden hebben vooral de analytische eigenschappen van het hoorproces, met name het frequentie-analyserend vermogen, aandacht gekregen. Daarbij kon nog met enkele elektroden in de verschillende centra van de gehoorbaan worden volstaan. Wil men echter meer inzicht krijgen in de wijze waarop in de hersenen de synthese van de in het perifere gehoororgaan uiteengelegde componenten plaatsvindt, dan zal een nieuwe aanpak nodig zijn waarbij niet aan grote aantallen elektroden voor gelijktijdige registratie zal kunnen worden ontkomen. Wellicht zal men dan ook een definitief antwoord kunnen geven op de vraag waarmee ik gepoogd heb de historische verworvenheden van het gehooronderzoek in deze voordracht aan elkaar te rijgen: de rol van het temporele tegenover het spectrale, de rol van de *synchronie* van de zenuwimpulsen tegenover de *plaats* van maximale trilling langs het basilaire membraan.

Toen ik als aankomende student in 1946 een kamer betrok in de binnenstad van Delft, trof ik een situatie aan die wij ons nu niet meer kunnen voorstellen. Elke ochtend en avond fietsten mannen rond om met lange stokken de gaslantaarns van de straatverlichting te doven of aan te steken. Automatisch telefoonverkeer was er onbekend. Aangezien er langs de grachten geen riolering was, kwam er op dinsdag- en vrijdagmorgen een dekschuit langs om de gevulde tonnen in de toiletten van de huizen voor lege te verwisselen, een activiteit die met zoveel stank gepaard ging dat het maar beter was om, of men wilde of niet, via de Oostpoort de stad te verlaten en buiten de veste bescherming in de collegezalen te zoeken. Een tafereel dat aan een vorige eeuw herinnert, aan de tijd van Helmholtz. Net zo als die situatie in een ver verleden lijkt te liggen, kunnen we ons de stand van zaken in het gehooronderzoek

van een halve eeuw geleden nauwelijks meer voorstellen. De sindsdien ingezette ontwikkeling, door mij met enkele grote lijnen geschetst, heeft onze kennis van het hoorproces radicaal vernieuwd.

Ik prijs mij gelukkig deze ontwikkeling te hebben meegemaakt en daaraan een bijdrage te hebben kunnen geven. Maar het eind is nog lang niet in zicht. Indertijd gaf ik aan mijn proefschrift als *Leitmotiv* een uitspraak van Ernst Mach mee over de nauwe verwantschap van fysiologie en techniek die mij als ingenieur zeer aansprak.²⁷ Kort gezegd: op beide terreinen gaat het om de middelen tot een bepaald doel, in de techniek om de ontwikkeling van nieuwe, in de fysiologie om bestudering van gerealiseerde middelen. Onverminderd geldt ook nu dat psychofysisch en fysiologisch onderzoek essentieel is voor de ontwikkeling van geavanceerde signaalbewerkingstechnieken ten behoeven van slechthorenden. Voor het bereiken van enig succes zullen ook in de toekomst *fundamenteel* en *toegepast* gehooronderzoek onlosmakelijk met elkaar verbonden dienen te blijven. Een toekomst, waarbij ik helaas niet meer als deelnemer betrokken zal zijn. Immers, zoals Hippocrates, de vader van de geneeskunde, reeds constateerde: de kunst is lang, maar het leven is kort.

Ik heb gezegd.

Noten

1. Zie voor Isaac Beeckman de dissertatie van K. van Berkel, *Isaac Beeckman (1588-1637) en de mechanisering van het wereldbeeld*, Rodopi, Amsterdam, 1983, en de bewaard gebleven aantekeningen van Beeckman in: *Journal tenu par Isaac Beeckman de 1604 à 1634 publié avec une introduction et des notes par C. de Waard*, 4 delen, Martinus Nijhoff, Den Haag, 1939-1953. De brief van Beeckman, gedateerd 30 mei 1633, is opgenomen in deel 4, blz. 214-217, eveneens in: *Correspondance de P. Marin Mersenne, Religieux Minime, vol. 3, 1631-1633, publié par Mme Paul Tannery, Éditée et annotée par Cornélls de Waard*, Presses Universitaires de France, Paris, 1946.
2. *De Republiek van Plato*, vertaald door Dr. D. Burger, Jr., Van Kampen, Amsterdam, 1849, blz. 252.
3. Zie hiervoor: C. Truesdell, *The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies, 1638-1788, Introduction to Leonhardi Euleri Opera Omnia Vol. X et XI Seriei Secundae*, Orell Füssli, Zürich, 1960, blz. 23 e.v. en: S. Dostrovsky, *Early vibration theory: physics and music in the seventeenth century*, *Archive for History of Exact Sciences* 14, 169-218, 1975.
4. Deze discussie heb ik uitvoeriger, met referenties, beschreven in: R. Plomp, *Pitch of complex tones*, *Journal of the Acoustical Society of America* 41, 1526-1533, 1967.
5. Z. Hongzhou en J. Guohua, *Shifting of world's scientific center and scientists' social ages*, *Scientometrics* 8, 59-80, 1985.
6. Zijn leven is beschreven in: L. Koenigsberger, *Hermann von Helmholtz*, 3 delen, Vieweg, Braunschweig, 1903.
7. Koenigsberger, deel 2, blz. 11-12: "Von meiner akustischen Arbeit 'Physiologische Grundlagen für die Theorie der Musik' sind die Holzschnitte jetzt gemacht, der Druck des Textes soll beginnen, zwei Drittel des Manuscriptes sind abgeschickt; an dem letzten Drittel ist noch mancherlei zu flicken und zu ändern, es ist aber der Hauptsache nach auch schon aufgeschrieben. Ich werde sehr vergnügt sein, wenn ich die letzten Worte dieser sehr langathmigen Arbeit werde niedergeschrieben haben; denn ich arbeite jetzt sieben Jahre daran, was man dem Umfang des Buches nicht ansehen wird. Und dann werden Philosophen und Musiker das Buch vielleicht als einen Einbruch in ihr

eigenes Gebiet betrachten, während unter den Physikern und Physiologen wieder nicht viele musikalische Leute sind, wie Sie z. B. Sie werden zunächst mein hochverständigster Kritiker sein, und ich bin deshalb sehr gespannt, ob mein kecker und verwegener Versuch, naturwissenschaftliche Methode in das Gebiet des Aesthetik hineinzu-treiben, Ihren Beifall haben wird."

8. Zie voor Donders de boeiende levensbeschrijving van F.P. Fischer en G. ten Doesschate, *Franciscus Cornelis Donders*, Van Gorcum, Assen, 1958. Over zijn onderzoek van spraaklinkers schreef P.H. Kylstra, Enige Nederlandse bijdragen tot de vocaalanalyse, *Logopedie en Foniatrie* 44, 1-8, 1972.
9. Koenigsberger, deel 2, blz. 49.
10. Nog enkele treffende voorbeelden: "In Bezug auf den Augenspiegel [een uitvinding van Helmholtz zelf, R.P.] sagte mir ein hoch berühmter chirurgischer College, er werde das Instrument nie anwenden, es sei zu gefährlich, das grelle Licht in kranke Augen fallen zu lassen; ein Anderer erklärte, der Spiegel möge für Aerzte mit schlechten Augen nützlich sein, er selbst habe sehr gute Augen und bedürfe seiner nicht. Ein durch bedeutende literarische Thätigkeit berühmter, als Redner und geistreicher Mann gefeierter Professor der Physiologie jener Zeit hatte einen Streit über die Bilder im Auge mit dem Collegen von der Physik. Der Physiker forderte den Physiologen auf, zu ihm zu kommen und den Versuch zu sehen. Der letztere wies dies Ansinnen entrüstet zurück: "ein Physiologe habe mit Versuchen nichts zu thun, die seien gut für den Physiker." Ein anderer bejahrter und hochgelehrter Professor der Arzneimittellehre, der sich viel mit Reorganisation der Universitäten beschäftigte, um die alte gute Zeit zurückzuführen, drang inständigst in mich, die Physiologie zu theilen; den eigentlich gedanklichen Theil selbst vorzutragen und die niedere experimentelle Seite einem Collegen zu überlassen, den er dafür als gut genug sah. Er gab mich auf, als ich ihm erklärte, ich betrachtete selbst die Experimente als die eigentliche Basis der Wissenschaft." Indrukwekkend zijn de woorden: "Man muss vielleicht dem brechenden Auge des Sterbenden und dem Jammer der verzweifelnden Familien gegenüber gestanden haben, man muss sich die schweren Fragen vorgelegt haben, ob man selbst Alles gethan habe, was man zur Abwehr des Verhängnisses hätte thun können, und ob die Wissenschaft auch wohl alle Kenntnisse und Hülfsmittel vorbereitet habe, die sie

hätte vorbereiten sollen, um zu wissen, dass erkenntnistheoretische Fragen über de Methodik der Wissenschaft auch eine bedrängende Schwere und eine fruchtbare praktische Tragweite erlangen können." In: *Vorträge und Reden von Hermann von Helmholtz*, deel 2, Vieweg, Braunschweig, 1884, blz. 179-180 en 169.

11. "Im Frühjahr verliess ich München für zwei Semester, um meine Studien in Berlin fortzusetzen, wo sich unter den Auspizien von *Hermann von Helmholtz* und *Gustav Kirchhoff*, deren bahnbrechende, in der ganzen Welt Beachtung findende Arbeiten ihren Schülern leicht zugänglich waren, mein wissenschaftlicher Horizont beträchtlich erweiterte. Allerdings muss ich gestehen, dass mir die Vorlesungen keinen merklichen Gewinn brachten. *Helmholtz* hatte sich offenbar nie richtig vorbereitet. Er sprach immer nur stockend, wobei er in einem kleinen Notizbuch sich die nötigen Daten herausuchte, ausserdem verrechnete er sich beständig an der Tafel, und wir hatten das Gefühl, dass er sich selber bei diesem Vortrag mindestens ebenso langweilte wie wir. Die Folge war, dass die Hörer nach und nach wegblieben; schliesslich waren es nur noch drei, mich und meinen Freund, den späteren Astronomen *Rudolf Lehmann-Filhés* eingerechnet." In: Max Planck, *Vorträge und Erinnerungen*, Hirzel, Stuttgart, 1949, blz. 3-4. Anderen bevestigen deze negatieve ervaringen, zie Fischer en Ten Doesschate, blz. 192.
12. Enkele namen: L. Hermann, R. König, F. Krueger, M. Meyer, W. Preyer, K.L. Schaefer, C. Stumpf, E. Waetzmann. De Nederlandse inbreng bleef beperkt tot de dissertatie van de keel-, neus- en oorarts Th.E. ter Kuile in 1904 en enkele artikelen van de Utrechtse hoogleraar in de fysiologie H. Zwaardemaker. De bijdragen van deze personen en anderen zijn verwerkt in mijn dissertatie: *Experiments on Tone Perception* (1966), waarvan vijf hoofdstukken afzonderlijk zijn gepubliceerd in *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1964-1967.
13. Necrologie van Fletcher in *The Journal of the Acoustical Society of America* 70, 1536-1537, 1981.
14. Necrologie van Davis in *The Journal of the Acoustical Society* 93, 1655-1656, 1993. Davis was, op 9 dagen na, 96 jaar toen hij overleed, net iets jonger dan Fletcher die bijna 97 jaar werd. In 1989 mocht ik Davis nog ontmoeten in de pauze van een concert in St. Louis tijdens de najaarsvergadering van de Acoustical Society of

America. Zowel het gezichts- als het gehoorsvermogen van de 93-jari-ge waren sterk achteruitgegaan maar, actief als hij altijd is geweest, deelde hij nog mede bezig te zijn met zijn memoires.

15. Necrologie van Stevens in *The Journal of the Acoustical Society of America* 53, 1190-1192, 1973. Een uitvoeriger biografie in: *Dictionary of Scientific Biography*, deel 18, Charles Scribner's Sons, New York, blz. 869-875, 1990.
16. J.B. Kruskal, Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis, *Psychometrika* 29, 1-27, 1964, en: Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method, *Psychometrika* 29, 115-129, 1964.
17. Necrologie van Zwicker in *The Journal of the Acoustical Society of America* 89, 2471, 1991.
18. Necrologie van Licklider in *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88, 2899-2900, 1990. Tijdens de voorjaarsvergadering van de Acoustical Society of America in Baltimore, Maryland, werd op 30 april 1991 een zitting aan Licklider gewijd. Mij was gevraagd te spreken over "J.C.R. Licklider and the case of the missing fundamental"; belangstellenden kunnen bij mij een afschrift van deze voordracht bekomen.
19. Zie voor een samenvatting van deze voordracht onder de titel "Periodicity" pitch and "place" pitch: *The Journal of the Acoustical Society of America* 26, 945, 1954.
20. Georg von Békésy (1899-1972), die in 1961 een Nobelprijs ontving voor zijn belangrijk werk over de frequentie-analyse van de cochlea, was in 1966 reeds naar de universiteit van Hawaii vertrokken. Naar aanleiding van mijn proefschrift ontving ik van hem een lange en zeer vriendelijke brief (gedateerd 28 september 1966), waarin hij als belijstte verdediger van de frequentie/plaatstheorie op mijn verwijzingen naar zijn onderzoek nader ingaat. De op blz. 109 uitgesproken aarzeling of het door hem optisch waargenomen trillingspatroon van het basilaire membraan bij het hiervoor benodigde geluidsdruk-niveau van 140 dB wel representatief is voor normale luisterniveaus, kon hij niet waarderen. Latere onderzoekingen hebben echter bevestigd dat bij meer fysiologische niveaus het trillingspatroon inderdaad veel scherper is dan de metingen van von Békésy suggereerden. De oorspronkelijke Duitse artikelen uit 1941-1944 waarin deze experimenten zijn beschreven, die hem de Nobelprijs opleverden, zijn in een Engelse vertaling

opgenomen in *Experiments in Hearing*, McGraw-Hill, New York, 1960. Zijn publicaties contra Seebeck's sireneproeven vindt men in *The Journal of the Acoustical Society of America* in de jaren 1961 en 1963. Zie voor een biografie met verdere verwijzingen naar zijn werk: *Dictionary of Scientific Biography*, deel 17, Charles Scribner's Sons, New York, 1990, blz. 62-64.

21. Een overzicht van het toonperceptie-onderzoek heb ik gegeven in *Aspects of Tone Sensation - A Psychophysical Study*, Academic Press, London/New York/San Francisco, 1976.
22. Dat deze 5% geen te gunstige schatting is van de impact van het Nederlandse gehooronderzoek moge blijken uit de percentages Nederlandse referenties in enkele representatieve boeken:
D.M. Green: *An Introduction to Hearing* (1976): 4.8% (16/335);
B.C.J. Moore: *An Introduction to the Psychology of Hearing* (1982): 10.4% (45/432);
R.M. Warren: *Auditory Perception - A New Synthesis* (1982): 7.8% (37/475);
B.C.J. Moore (Editor): *Frequency Selectivity in Hearing* (1986): 11.2% (116/1033);
A.S. Bregman: *Auditory Scene Analysis* (1990): 5.6% (29/514).
23. Audiologische tijdschriften met jaar van oprichting: *Audiology* (1961), *British Journal of Audiology* (1967), *Scandinavian Audiology* (1972), *Ear and Hearing* (1980), *Journal of the American Academy of Audiology* (1990), *American Journal of Audiology* (1992).
24. Een overzicht van de activiteiten vindt men in *Veertig jaar audiologie in Nederland*, in 1990 door de Nederlandse Vereniging voor Audiologie uitgegeven ter gelegenheid van haar 40-jarig bestaan.
25. Zie hiervoor de overzichtsartikelen:
R. Plomp, Auditory handicap of hearing impairment and the limited benefit of hearing aids, *The Journal of the Acoustical Society of America* 63, 533-549, 1978, herdrukt in: J.S. Lim (Editor), *Speech Enhancement*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1983, blz. 40-56, en in: J.L. Miller, R.D. Kent and B.S. Atal (Editors), *Papers in Speech Communication: Speech Perception*, Acoustical Society of America, Woodbury, N.Y., 1991, blz. 661-677.
R. Plomp, A signal-to-noise ratio model for the speech-reception threshold of the hearing impaired, *Journal of Speech and Hearing Research* 29, 146-154, 1986. (Dit artikel kreeg de Editor's Award for

the article of highest merit published in 1986.)

R. Plomp, Noise, amplification, and compression: Three main issues in hearing-aid design, *Ear and Hearing* 15, 2-12, 1994.

26. Een uitvoerig overzicht van de psychofysische literatuur betreffende de perceptie van al of niet gelijktijdige geluiden geeft A.S. Bregman, *Auditory Scene Analysis*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1990.
27. "Probleme der Technik und Probleme der Physiologie sind oft sehr verwandt. Die Technik stellt uns die Aufgabe, gewisse Zwecke zu erreichen, und lässt innerhalb bestimmter Grenzen die Wahl der Mittel frei. In der Physiologie hingegen finden wir gewisse Zwecke erreicht und haben nach den Mitteln zu forschen, welche wirklich zur Anwendung gekommen sind."