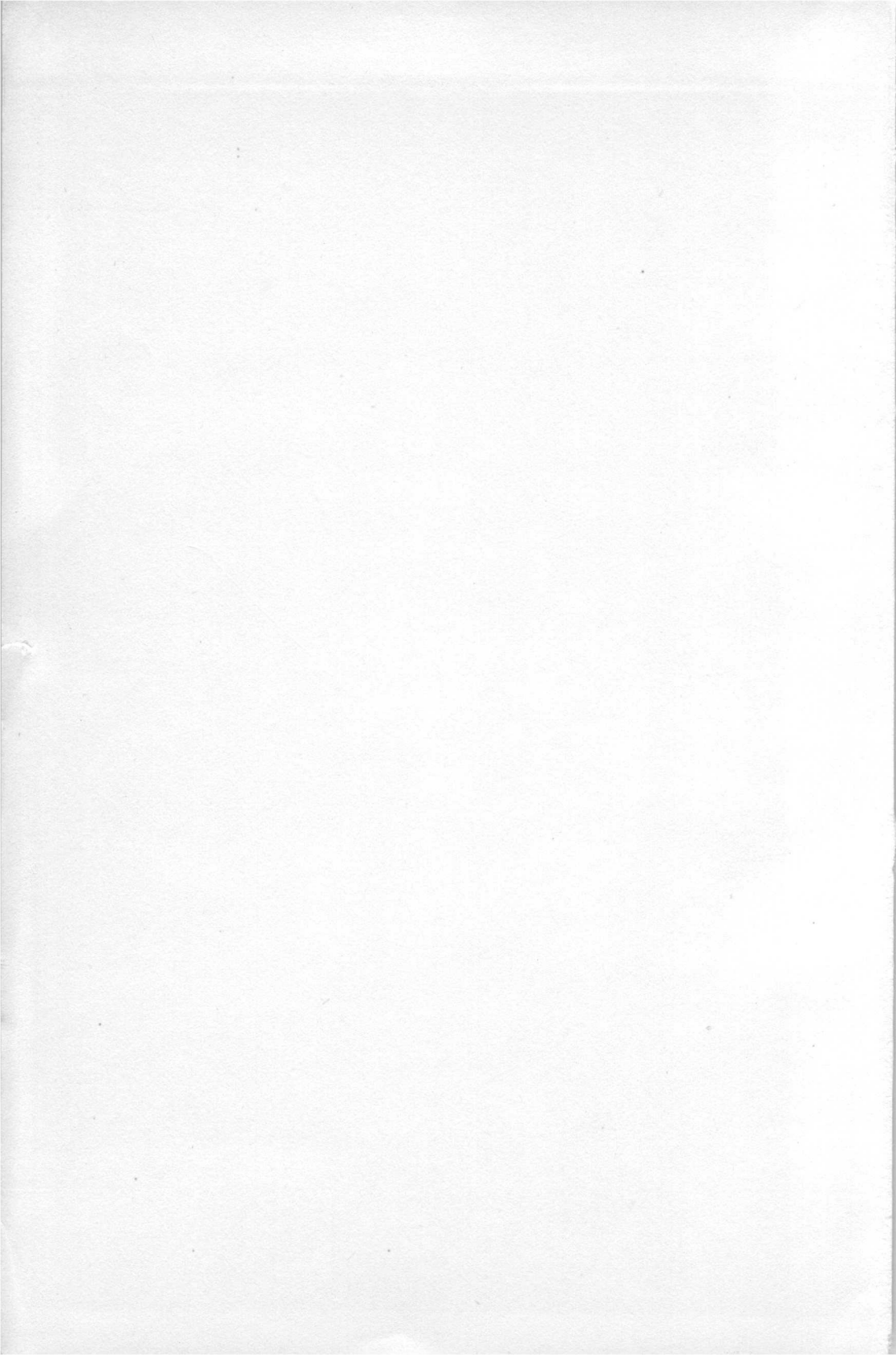


DR. IR. N. V. FRANSSEN

STEREOFONICA

STEREOFONICA

~~9/11/11~~
75



STEREOFONICA

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

STATION

N.V. UITGEVERSM AATSCHAPPIJ CENTREX EINDHOVEN

STEREOFONICA

door

DR. IR. N. V. FRANSSEN

1962

PHILIPS TECHNISCHE BIBLIOTHEEK

Mededeling van de uitgever:

Het boek wordt uitgegeven in het Nederlands, Frans, Duits, Engels en Spaans

Dit boek bevat 100 pagina's en 64 figuren

U.D.C. No. 534.76 : 534.88

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken - Eindhoven, Nederland, 1962

Nadruk, ook gedeeltelijk, verboden

Gedrukt in Nederland

VOORWOORD

Hoewel men bij het bladeren door dit boek zal kunnen opmerken dat hierin enige beschouwingen gegeven worden over opname-, weergave- en transmissiemethoden voor stereofonie, wil dit boek toch geenszins een praktische cursus in stereofonische geluidsoverdracht zijn. Zodoende zal men dan ook in dit boek slechts zeer summier gegevens vinden van direct technische aard. Het wil slechts inzicht en begrip geven wat betreft het richtingshoren en de hieraan direct verwante gebieden van stereofonie en zaalakoestiek. Dit is des te gereeder mogelijk, daar juist over de technische gegevens reeds een aantal werken bestaat welke deze materie in allerhande graden van moeilijkheid behandelen. Men kan zich dan ook afvragen of er aan een boek als het onderhavige behoefte is.

Akoestiek is een populaire wetenschap in de beste zin des woords. In zekere opzichten is zij het begin geweest van de fysica. In feite startte deze laatste haar loopbaan toen Pythagoras het verband aantoonde tussen consonantie en de verhoudingen van trillingsgetallen. In dit voorbeeld kan men eigenlijk al die typische plaats van de akoestiek te midden der andere natuurwetenschappen opmerken: de directe relatie tussen het fysisch gedrag van materie en de subjectieve waarneming als essentieel element. Dit subjectieve element is wellicht de oorzaak van de populariteit van de akoestiek. Daardoor komt zij in aanraking en contact met muziekwetenschappen, met de audiologie, fysiologie en de neurologie. Het is opmerkelijk met hoeveel verve orkestleden dirigenten of koorzangers de akoestiek van een bepaalde zaal bespreken en beoordelen; en hun oordeel is niet minder waardevol dan dat van erkende akoestici, hoewel zij geen verstand hebben van nagalmtijd of absorptiematerialen. Niet de interpretatie van de uitslag van een of andere voltmeter, maar de directe subjectieve waardering door het gehoor is de uiteindelijke maatstaf bij de beoordeling; en tot deze subjectieve beoordeling is iedereen die luisteren wil, gerechtigd.

Om de kwaliteit van een wijn te beoordelen heeft men geen wijnkenner in de technologische zin van het woord te zijn. Maar toch zal degene die zo'n glas weet te genieten geïnteresseerd zijn in het jaartal,

de afkomst en de verwerking, ook zonder van zins te zijn zelf eens een druivenperserij te beginnen. Met de subjectieve akoestiek is het min of meer eender gesteld; en daarom geloven wij dan ook de in het begin van dit voorwoord gestelde vraag in positieve zin te mogen beantwoorden.

Eindhoven, februari 1962

Dr. Ir. N. V. Franssen

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	V
I. INLEIDING	1
II. DE FENOMENOLOGIE VAN HET RICHTINGSHOREN	6
II.1. Binaurale verschijnselen	6
a. De intensiteitsverhoudingen-theorie	6
b. De timbreverschillen-theorie	8
c. De fazeverschillen-theorie	10
d. De tijdsverschillen-theorie	10
e. De tijd-intensiteit-combinatie	12
f. De binaurale frequentieanalyse	13
II.2. De begrippen tijd en intensiteit	15
II.3. De betekenis van inzetten	19
II.4. Het monaurale richtingshoren	23
II.5. Het afstandshoren	25
II.6. De projectie in de ruimte	26
III. STEREOFONIE	30
III.1. De stereofonische geluidswaergave	30
III.2. De stereofonische geluidsoverdracht	39
a. Registratie op een magnetische drager	40
b. Registratie op grammofoonplaten	40
c. Radio-overdracht via F.M.-zenders	41
d. Radio-overdracht via A.M.-zenders	42
e. Informatiebeperking bij stereofonie-overdracht	43
IV. ZAALAKOESTIEK	47
IV.1. Reflecties	47
IV.2. Nagalm en nagalmtijd	49

IV.3. Aanvullende criteria ter beoordeling van de zaalkwaliteit	51
a. De eigenschappen van de frequentiekaracteristiek	51
b. Richtingsdiffusiteit en duidelijkheid	53
IV.4. Kunstmatige nagalm en ambiofonie	54

APPENDIX I

Over het mechanisme voor richtingshoren	56
a. Beschrijving van een richtingszoeker	56
b. Enige berekeningen aan de kiezers	62
c. De richtingsbepaling	66
d. Selectiviteitsvergroting	73
e. De Haas - Meyer - Schodder-krommen	76

APPENDIX II

De waarneming van timbre en toonhoogte	82
a. Het gedrag van een model voor de waarneming van toonhoogte en timbre	84
b. Het periodiciteit-formant diagram	87
Literatuur	91

INLEIDING

De zintuigen van de mens hebben de taak hun eigenaar in contact te brengen met de wereld om hem heen. Met behulp van de tastzin kan hij voorwerpen voelen, met zijn ogen kan hij ze zien en indien zij geluid produceren, kan hij dit met zijn oren horen. Nu zouden al deze indrukken, welke hij kan verkrijgen, betrekkelijk waardeloos zijn, wanneer zij niet vergeleken zouden kunnen worden met reeds vroeger opgedane ervaringen. Dit betekent dat voor een zinvol gebruik van de zintuigen deze in verbinding moeten staan met het geheugen, waar ervaringen kunnen worden bewaard en vergeleken met nieuwe impressies. Om dit mogelijk te maken zal de door de zintuigen ontvangen informatie op een of andere wijze gecodeerd moeten worden.

Het ontvangen, coderen en opbergen van informatie is een probleem, waar wij allen dagelijks mee te maken hebben. Vanaf onze geboorte staan wij geadministreerd — d.w.z. gecodeerd — in een of ander kaartstelsel bij de burgerlijke stand; in een rekenmachine worden getallen gecodeerd en bewaard door middel van de stand van bepaalde tandwielen; bij een draaiorgel bedient een vooraf klaargemaakte ponsband — d.w.z. een gecodeerd muziekstuk — de luchttoevoer aan de diverse pijpen. Het schrift en de symbolen voor getallen zijn typische codeersystemen, waarmee men een geheugen, namelijk een boek een tijdschrift etc. van informatie kan voorzien.

Het vergelijken van onze subjectieve codering met de in de techniek gebruikelijke is bijzonder leerzaam; het brengt echter ook een gevaar met zich mee: het te ver doorvoeren van de vergelijking. Zouden wij bijv. voor de opdracht gesteld worden een machine te ontwerpen die het woord „Amsterdam” kan herkennen tussen een heel stel andere woorden, dan zouden wij van de volgende gedachte kunnen uitgaan: het woord „Amsterdam” bestaat uit een aantal letters; er bestaat praktisch geen betekenisvol woord dat uit precies dezelfde letters is opgebouwd. Het woord „Amsterdam” is dus gedefinieerd door een zeer specifieke dichtheidsverdeling van de letters van het alfabet. Wanneer de door ons ontworpen machine deze dichtheidsverdeling zou tegenkomen, weet hij dus dat hij geconfronteerd is met het woord „Amsterdam”. Verwisselen wij op een of andere willekeurige wijze de volgorde van de letters,

dan zal onze machine het woord dank zij zijn analyse-methode feilloos blijven herkennen. Ons gehoor noch onze gezichtszin is echter bereid het door omwisseling van letters verkregen woord als het begrip „Amsterdam” te herkennen. Ons subjectief codeersysteem werkt blijkbaar op een heel andere, mogelijk veel minder logische wijze. Nu lijkt dit voorbeeld overdreven, maar bij de toepassing van de Fourier-analyse op geluids-fenomenen beschouwen wij zonder enig gemoedsbezwaar, een logische analyse-methode tevens als de enige subjectief mogelijke. Zoals bekend kan men een periodieke trilling, en met enkele restricties ook niet-periodieke trillingen, opgebouwd denken uit een eindig of oneindig aantal sinusvormige of harmonische trillingen. Maar dat is helemaal geen vrijbrief om het gehoor ditzelfde analyse-systeem toe te dichten. Toch zeggen wij zonder gewetensbezwaren dat de toonhoogte van een klank bepaald wordt door zijn grondtoon en zijn timbre door de boventonen. En hierin zijn toonhoogte en timbre volledig subjectieve ervaringen terwijl grondtoon en boventonen slechts onderdelen zijn van de wiskundige omschrijving van een fysisch gebeuren.

Voorhands lijkt het praktisch onmogelijk uit anatomische gegevens te bepalen op welke wijze de subjectieve codering dan wel plaatsvindt. Uit de fenomenologie echter kunnen wij ons toch wel ongeveer een idee vormen welke elementen van een gewaarwording blijkbaar essentieel zijn. Wanneer men een kleuter van twee à drie jaar een tekening laat zien waarop een huisje, een auto of een vliegtuig afgebeeld zijn, dan zal hij deze voorwerpen inderdaad als zodanig herkennen, hoewel in feite niet deze voorwerpen maar slechts potloodkrabbels op een stuk papier aanwezig zijn. Blijkbaar zijn de onderlinge verhoudingen van de afmetingen een zeer essentieel element bij de herkenning. Een portretschilder weet — onbewust of bewust — zo goed welke individuele kenmerken van een bepaald persoon essentieel zijn voor diens herkenning, dat hij in staat is juist deze elementen in een schilderij weer te geven en zodoende een herkenbaar portret te maken.

Uiteraard bedient ook het gehoor zich van een of andere codering. Wanneer iemand tegen ons praat, bereiken de door hem opgewekte luchttrillingen onze oren en deze zullen door het gehoor en zenuwstelsel gecodeerd worden. In ons brein zal de aldus ontvangen informatie aanleiding geven tot allerhande associaties. Wij herkennen bijv. de stem van de spreker, wij begrijpen de woorden of wij merken op dat hij aan onze linkerzijde staat. Het blijkt nu, dat het gehoor bij deze codering vaak nauwelijks belemmerd wordt door allerlei vervormingen die ontstaan bij het transport van de geluidstrillingen door de lucht. Zo kan men van

een complex geluid de fazen van de Fourier componenten wijzigen zonder dat het gehoor hier iets van merkt; de trillingsvorm daarentegen wijzigt zich hierbij volkomen. Andere vervormingen echter, die de trillingsvorm in veel geringere mate beïnvloeden, worden wel direct door het gehoor opgemerkt. Hieruit blijkt al dat de momentane waarden van de geluidstrillingen geen essentiële rol spelen bij de codering. De vraag ligt dan ook voor de hand welke eigenschappen van de geluidstrillingen dan wel essentieel zijn voor de subjectieve gewaarwording.

Ditzelfde probleem doet zich ook voor bij het richtingshoren. Het ligt voor de hand dat onze „twee-origheid” voor een groot gedeelte het richtingshoren mogelijk maakt. Doordat namelijk beide oren meestal geen gelijkwaardige positie hebben ten opzichte van de aanwezige geluidsbron, zijn de geluidsgolven, die de beide oren bereiken, onderling niet gelijk. De optredende verschillen kunnen mogelijkerwijze waargenomen worden en in verband gebracht met de richting van de geluidsbron. Men kan nu kunstmatig verschillen aanbrengen tussen twee oorspronkelijk gelijke signalen en dan systematisch het verband trachten te vinden tussen de aangebrachte verschillen en de richtingsindruk, wanneer beide signalen gelijktijdig ieder aan één oor worden aangeboden. Om dit op volledig controleerbare wijze te doen, gebruikt men bij voorkeur hoofdtelefoons.

Hierbij doet zich nu een zeer specifieke moeilijkheid voor. Bij het natuurlijk luisteren beweegt men altijd onbewust het hoofd. Uiteraard is de plaats van de geluidsbron onafhankelijk van de toevallige stand van het hoofd bij deze bewegingen. Dit feit verschaft de toehoorder de inlichting dat de geluidsbron zich buiten het hoofd bevindt. Bij gebruik van hoofdtelefoons is de schijnbare plaats van de fictieve bron echter niet meer onafhankelijk van de hoofdstand; integendeel: zij volgt onmiddellijk en volledig alle bewegingen van het hoofd. Dit betekent, dat ons brein helemaal geen redenen meer heeft om aan te nemen dat de geluidsbron zich buiten het hoofd bevindt; men hoort inderdaad bij deze experimenten de geluidsbron binnen het hoofd. Juist dit soort ervaringen laat zien dat het natuurlijke richtingshoren een complex is van fysiologische en psychologische factoren en dat men in het algemeen zeer voorzichtig moet zijn met het algemeen geldig verklaren van resultaten die slechts uit één zeer bepaald experiment zijn verkregen.

In 1933 introduceerde Fletcher de stereofonische muziekweergave. Voor een orkest waren drie microfoons naast elkaar opgesteld die via aparte transmissielijnen en versterkers ieder verbonden waren met een

luidspreker in de weergave-ruimte. Fletcher ging hierbij van de gedachte uit, in de opnameruimte een groot gordijn op te hangen bedekt met een zeer groot aantal microfoons. Een tweede gordijn bedekt met een even groot aantal luidsprekers, ieder verbonden met de overeenkomstige microfoon zou dan in de weergaveruimte opgehangen moeten worden. Op deze wijze zouden dan de geluidsgolven aanwezig in de opnameruimte, exact weergegeven worden in de weergaveruimte. Uiteraard is een stereofonische overdracht volgens dit systeem in de praktijk niet te verwezenlijken en daarom dan ook door Fletcher vereenvoudigd tot een systeem met slechts drie microfoons en drie luidsprekers.

Stereofonische transmissie volgens dit systeem blijkt een zeer reële ruimtelijke weergave mogelijk te maken maar eigenlijk is dit resultaat toch wel verrassend. De benadering van het oorspronkelijk uitgangspunt met een stelsel van slechts drie microfoons en drie luidsprekers is immers zo primitief dat een pover resultaat veel meer in de lijn der verwachting ligt. Terecht doet het slagen van zo'n experiment ons dan ook twifelen aan de juistheid van de theoretische grondslag waarop Fletcher zijn systeem baseert. Het ligt veel meer voor de hand om de oorzaak van dit slagen te zoeken in specifieke eigenschappen van ons richtingsgehoor. Dit blijkt des te duidelijker bij een stereofonische geluidsoverdracht met slechts twee kanalen. Ook dan kan een volkomen bevredigende weergave bereikt worden. Blijkbaar is het gehoor in staat de geluiden van de twee luidsprekers te laten samensmelten tot een geluid van een denkbeeldige bron ergens tussen de luidsprekers. In zekere zin profiteren wij bij de stereofonische weergave van de onvolkomenheden van ons richtingsgehoor: Wij nemen immers niet de richtingen van de eigenlijke geluidsbronnen — in casu de twee luidsprekers — waar, maar de richting van een bron die helemaal niet bestaat.

Een soortgelijk verschijnsel treedt op wanneer wij in een besloten ruimte geluid horen. Wanneer de geluidsbron niet al te dicht bij ons staat zal slechts een klein gedeelte van het waargenomen geluid ons rechtstreeks bereiken; het meeste komt eerst na enkele reflecties aan wanden of plafond bij ons. Toch is men zich hiervan in het geheel niet bewust; het lijkt alsof alle geluid rechtstreeks van de bron afkomstig is. Blijkbaar nemen alle reflecties voor het gehoor de richting van het directe geluid aan en de oorzaak hiervan moet kennelijk weer in de eigenschappen van het richtingsgehoor terug te vinden zijn.

In dit boek zullen wij nader op het richtingsgehoor ingaan. De eigenschappen hiervan worden besproken en nagegaan wordt hoe deze gebruikt worden om een stereofonische geluidsoverdracht mogelijk te maken. Ook

wordt gewezen op het verband tussen deze eigenschappen en de appreciatie van de akoestiek van zalen. In de eerste Appendix wordt een model van het gehoor- en zenuwmechanisme besproken waarmee men de eigenschappen van het gehoor kan verklaren. Daar de anatomische en fysiologische gegevens omtrent deze mechanismen echter vrij pover zijn, blijft zo'n model uiteraard zeer speculatief. In de tweede Appendix wordt het gedrag van dit model vergeleken met subjectieve auditieve waarnemingen die niet speciaal betrekking hebben op het richtingshoren. Hierbij blijkt dat met name voor de toonhoogte — en timbregevaarwording een eenvoudige hypothese opgesteld kan worden. Toch lijkt hier een extra opmerking nuttig. De menselijke geest waar de gehoorindrukken geïnterpreteerd worden, waar bepaalde klankfenomenen naar voren gehaald worden en andere als oninteressant verdrongen, kunnen wij niet imiteren. Dit betekent, dat ieder model uiteindelijk slechts een zeer armzalige imitatie kan geven van de perceptie, welke bereikt kan worden door de gezamenlijke werkzaamheid van de menselijke zintuigen en de menselijke geest.

DE FENOMENOLOGIE VAN HET RICHTINGSHOREN

II-1 Binaurale verschijnselen

Wanneer het hoofd van een waarnemer zich in een geluidsveld bevindt, zijn meestal de geluidsgolven aan beide oren onderling niet volledig gelijk. Wanneer namelijk de geluidsbron buiten het symmetrievlak van het hoofd is geplaatst, zal het van die geluidsbron afgewende oor ten gevolge van de afscherpende werking van het hoofd een lagere geluidsdruk ontvangen dan het andere oor. Wanneer het aangeboden signaal een zuivere toon is, dan treedt er ten gevolge van het verschil in afstand van beide oren tot de bron een faseverschil op. Bij complexe signalen zoals ruis, spraak of muziek geeft dit afstandsverschil aanleiding tot tijdsverschillen tussen overeenkomstige variaties in de geluidsgolven aan beide oren. De grootte en het teken van al deze verschillen hangen af van de richting waarin zich de geluidsbron bevindt. Het is dan ook niet verwonderlijk dat men vanaf het begin van het onderzoek over richtingshoren de „twee-origheid” als essentieel beschouwd heeft en dat men aangenomen heeft dat één of meer dezer verschillen door het gehoor waargenomen kunnen worden. Juist het feit echter, dat er bij verandering van de richting van een geluidsbron zoveel grootheden tegelijkertijd veranderen, is er oorzaak van dat er vele theoriën over het richtingshoren bestaan welke beurtelings aanvaard en verworpen zijn. In het hierna volgende zullen wij de voornaamsten van deze theoriën nader beschouwen.

a) De intensiteitsverhoudingen-theorie

De theorie van de intensiteitsverhoudingen of intensiteitsverschillen, zoals men vaak ten onrechte zegt, is een van de eerste pogingen geweest om het richtingshoren te verklaren. Wanneer een geluidsbron zich buiten het symmetrievlak van het hoofd bevindt zijn in het algemeen de geluidsdrukken aan beide oren niet gelijk. Dit wordt veroorzaakt, enerzijds door de stuwende werking van het hoofd aan het oor dat naar de geluidsbron is toegekeerd, anderzijds door de afscherpende werking

van het hoofd voor het oor dat van de geluidsbron afgewend is. Het verschil in niveau zal in het algemeen toenemen naarmate de geluidsbron zich verder uit het symmetrievlak van het hoofd bevindt. Op het eerste gezicht lijkt dan ook de hypothese, dat deze verschillen door het gehoor als indicatie voor de richting gebruikt worden, vrij aannemelijk. Nu blijkt echter dat de grootte van deze verschillen niet alleen bepaald wordt door de hoek, welke de richting van de geluidsbron met het symmetrievlak van het hoofd maakt, maar voor een groot gedeelte ook door de aard van het aangeboden geluid. Voor zuivere tonen van lage frequenties is er praktisch geen niveauverschil tussen beide oren aanwezig, voor zuivere tonen van hoge frequentie kan dit verschil daarentegen grote waarden aannemen. Dit wordt geïllustreerd door de metingen van Sivian en White welke in figuur 1 zijn weergegeven. Sivian en White hebben bepaald welke intensiteitsvariaties aan de oren optreden als een geluidsbron, die zuiver sinusvormige tonen produceert om het hoofd heendraait.

Bij geluiden van telkens wisselende samenstelling, zoals bijv. spraak, zal het niveauverschil tussen beide oren voortdurend variëren en kan men slechts spreken over een gemiddeld niveauverschil. In figuur 2 is de gemiddelde intensiteitsverdeling van de spraak van een mannenstem

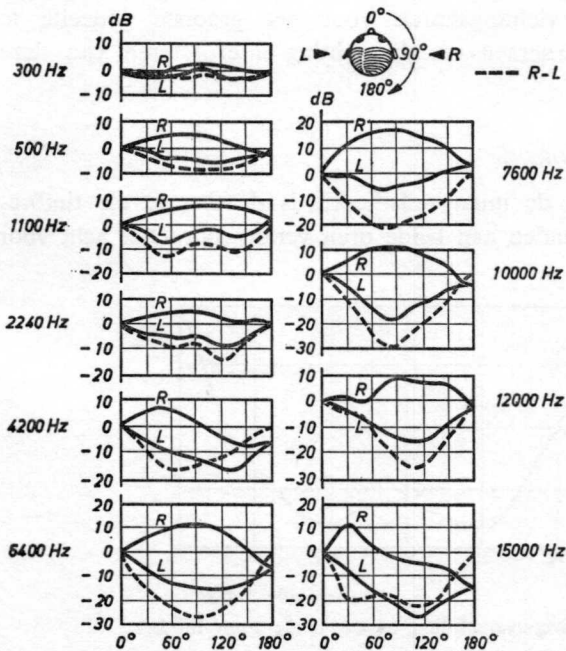


Fig. 1.
Intensiteitsvariaties aan de oren als een geluidsbron die sinusvormige tonen afstraalt, om het hoofd heendraait.

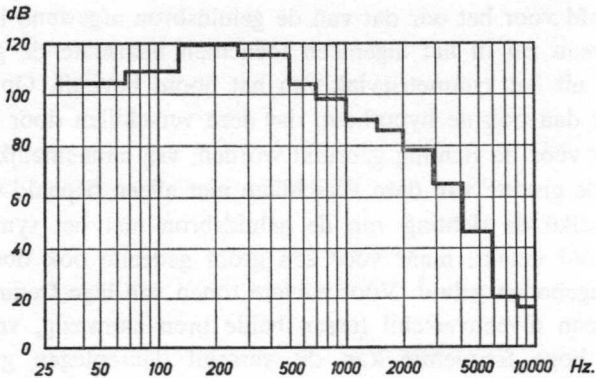


Fig. 2. Spectrale verdeling van een gemiddelde mannenstem.

over het frequentiespectrum gegeven. Met behulp van deze curve en die welke in fig. 1 zijn weergegeven heeft De Boer de intensiteitsverhoudingen bij spraak berekend tussen beide oren als functie van de richting. Het resultaat van deze berekening is in fig. 3 weergegeven. Hierbij blijkt dat voor hoeken tussen 0 en 50 graden het niveauverschil in dB praktisch lineair toeneemt met de waarde van de hoek. De maximale intensiteitsverhouding bedraagt ongeveer 7 dB. De Boer neemt nu aan dat het vermogen tot het richtingshoren voor het grootste gedeelte te danken is aan het waarnemen en als richting interpreteren van deze intensiteitsverhoudingen.

b) De timbreverschillen-theorie

Zeër nauw verwant aan de intensiteitstheorie is de theorie die timbreverschillen tussen de signalen aan beide oren verantwoordelijk acht voor

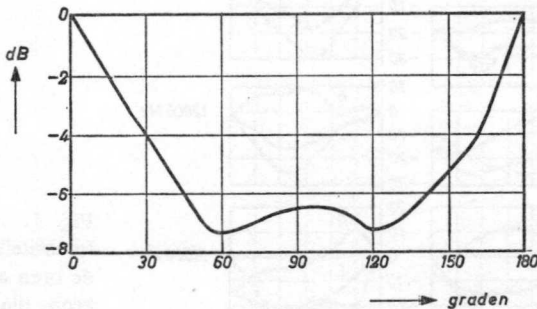


Fig. 3. Niveauverschillen tussen beide oren bij het waarnemen van spraak.

de richtingswaarneming. Het mag bekend verondersteld worden, dat men een complex geluid kan beschouwen als te zijn opgebouwd uit grond- en boventonen. In figuur 1 was aangegeven hoe het niveauverschil tussen beide oren ten gevolge van de buiging om het hoofd van de frequentie afhangt. Deze afhankelijkheid heeft tot gevolg dat bij een complex geluid de verhouding van de amplituden van grond- en boventonen aan de oren van de luisteraar bepaald wordt door de hoek waaronder dit geluid de luisteraar bereikt. Dit betekent dus, dat de samenstelling van het geluid en zodoende ook het timbre hiervan, van deze hoek afhangt (fig. 4). De timbreverschillen tussen beide oren zouden dan ook een maatstaf kunnen zijn om de richting van een geluid te bepalen. Een bijna noodzakelijke voorwaarde hierbij is echter dat men het timbre van het geluid reeds uit ervaring kent.

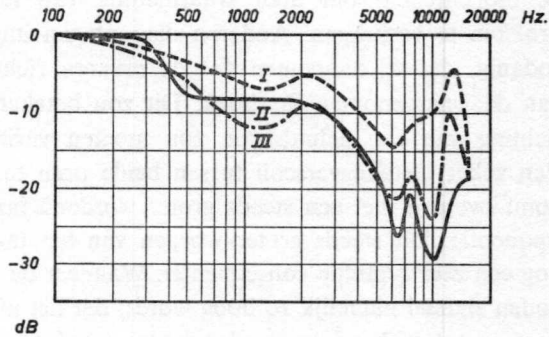


Fig. 4. Frequentiecarakteristiek van de buiging om het hoofd. De krommen I, II en III gelden voor een geluidsbron onder een hoek van $\alpha = 30^\circ$, 60° en 90° .

Hoewel, zoals reeds vermeld is, de timbreverschillen theorie zeer verwant is aan de intensiteitstheorie, is er toch een groot verschil aan te wijzen. Van een richtingsbepaling die plaatsvindt op basis van intensiteitsverhoudingen kan men zich zeer goed voorstellen, dat deze plaatsvindt voordat de van het geluid afgeleide zenuwpulsen het brein bereikt hebben, daar intensiteit een typisch meetbare grootheid is; met andere woorden deze detectie kan plaatsvinden in het aurale gedeelte van het gehoor. Bij een richtingsbepaling op grond van timbres daarentegen zullen waarschijnlijk de aangeboden signalen vergeleken moeten worden met reeds vroeger opgedane ervaringen. Hierbij heeft dus het geheugen een zeer essentiële functie bij het richtingshooren. De richtingsbepaling kan dan eerst plaatsvinden na ontvangst van de met het geluid gecorreleerde zenuwpulsen in het brein. De richtingswaarneming op deze wijze is nu veel minder een richtingsbepaling dan wel een richtingsinterpretatie; zij is hoofdzakelijk van psychologische aard.

c) De fazeverschillen-theorie

In de paragraaf over de theorie van de intensiteitsverhoudingen is er reeds opgewezen dat bij lage frequenties het geluidsniveau aan beide oren nauwelijks afhankelijk is van de richting, van waaruit het geluid de luisteraar bereikt. Het lijkt dan ook onaannemelijk dat een luisteraar de richting van lage tonen op grond van niveauverschillen zou kunnen bepalen. Van deze grondgedachte ging dan ook Lord Rayleigh uit toen hij in 1907 zijn fazetheorie publiceerde. Deze theorie geeft aan dat het aan de oren optredende fazeverschil beslissend moet zijn voor de richtingsbepaling. Wanneer immers een geluid onder een zekere hoek een luisteraar nadert, zal het beide oren niet tegelijkertijd bereiken. Voor zuivere tonen geeft dit aanleiding tot een fazeverschil tussen de geluidsgolven aan beide oren. Verscheidene onderzoekers ontkennen echter de mogelijkheid om door waarneming van fazeverschillen richtingsindrukken te verkrijgen. Anderen daarentegen interpreteren de fazetheorie zodanig, dat zij aannemen dat de ervaren richtingshoek gelijk zou zijn aan de waargenomen fazehoek. Dit zou betekenen dat de waargenomen richting van een geluidsbron zou moeten variëren met de toonhoogte. Een zeker afstandsverschil tussen beide oren tot de geluidsbron immers, komt overeen met een steeds groter wordend fazeverschil bij toenemende frequentie. Dit steeds groter worden van het fazeverschil heeft overigens nog een zeer typische consequentie. Wanneer de frequentie van het aangeboden signaal namelijk zo hoog wordt, dat het afstandsverschil tussen beide oren tot de bron overeenkomt met een fazeverschil van 180° of meer, kan men niet meer onderscheiden welke van de beide geluidsgolven aan de oren in fase voorloopt en welke achter. Een bepaald fazeverschil kan dan overeenkomen met verscheidene richtingen. Een eenduidige richtingsbepaling aan de hand van fazeverschillen is dan niet meer mogelijk.

d) De tijdsverschillen-theorie

De laatste conclusie bij de beschouwing van fazeverschillen wekt terecht twijfel aan de mogelijkheid om aan de hand van de tussen de oren optredende fazeverschillen de juiste richting van een geluid te bepalen. Er zijn echter nog meer bezwaren tegen deze theorie te formuleren. Van de faze van een bepaald signaal kan men immers slechts dan spreken wanneer dit signaal een zuiver sinusvormige trilling is. In de natuur komt dit soort trillingen echter slechts weinig voor. Praktisch alle geluid dat wij om ons heen waarnemen heeft een veel complexere samenstelling. Het is dan ook veel meer voor de hand liggend om een bepaald weg-

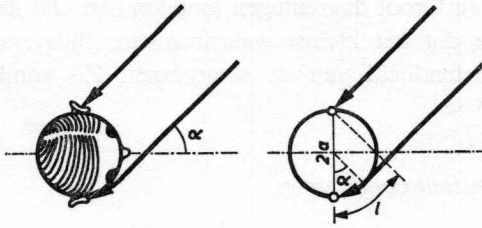


Fig. 5. Benaderende berekeningsmethode voor het tijdsverschil tussen beide oren.

verschil tussen beide oren tot de bron uit te drukken in een overeenkomstig tijdsverschil. Onder het tijdsverschil verstaat men dan het verschil in aankomsttijd aan beide oren van overeenkomstige punten van de geluidsgolven.

Beschouwt men het hoofd als een zuivere bol waarop diametraal de oren geplaatst zijn, dan kan men gemakkelijk de wegverschillen en zodoende ook de tijdsverschillen voor een geluid uit een bepaalde richting berekenen (fig. 5 en 6). Men vindt dan voor het tijdsverschil

$$\Delta t = 0,24 (\alpha + \sin \alpha) \quad (1)$$

Sommige onderzoekers geven gezien het niet bolvormig zijn van het hoofd de voorkeur aan de formule

$$\Delta t = 0,62 \sin \alpha. \quad (2)$$

Von Hornborstel en Wertheimer, van wie de tijdsverschillen theorie afkomstig is geven $3 \cdot 10^{-5}$ sec aan als minimaal waarneembaar tijdsver-

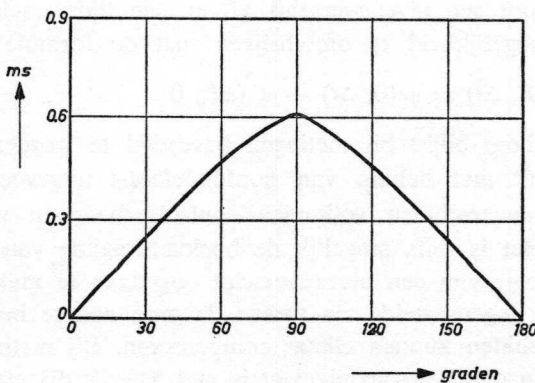


Fig. 6. Tijdsverschil tussen beide oren.

schil. Van Soest en Groot daarentegen toonden aan, dat deze drempel niet aanwezig was en dat het kleinst waarneembare tijdsverschil afhankelijk was van de geoefendheid van de waarnemer. Zo vonden zij zelf een waarde van 10^{-6} sec.

e. De tijd-intensiteit-combinatie

Bij het natuurlijke richtingshoren zullen tijds- en niveauverschillen praktisch altijd te samen optreden. Het ligt dan eigenlijk ook wel voor de hand, dat beide grootheden door het gehoor gebruikt worden bij de richtingsbepaling. Zo lijkt het bijv. a priori niet onmogelijk dat alleen dan een richtingsindruk zal ontstaan, wanneer de aangeboden tijds- en niveauverschillen bij elkaar passend zijn, d.w.z. dat voor een bepaald frequentiegebied alleen zeer speciale combinaties van tijds- en niveauverschillen, die ook bij natuurlijk richtingshoren kunnen voorkomen, een richtingsgewaarwording veroorzaken.

Ook kan men zich voorstellen dat de tijds- en niveauverschillen bij het richtingshoren verschillende functies hebben. Deze opvatting wordt door Van Soest naar voren gebracht, wanneer hij veronderstelt dat de tijdsverschillen gebruikt worden voor de bepaling van de hoek tussen de richting van het geluid en de ooras en dat de niveauverschillen voor de vaststelling van de elevatie van de geluidsbron dienen.

Een derde mogelijkheid is tenslotte gegeven door de veronderstelling, dat zowel tijds- als niveauverschillen een richtingsindruk geven en dat de uiteindelijk ervaren richtingshoek, wanneer tijds- en niveauverschillen tezamen optreden verkregen wordt door een sommatie van beider invloed. Wanneer $\psi(\Delta L, \Delta t)$ de uitwijkingshoek van het geluidsbeeld is veroorzaakt door een niveauverschil ΔL en een tijdsverschil Δt , dan is deze derde mogelijkheid te omschrijven met de formule

$$\psi(\Delta L, \Delta t) = \psi(0, \Delta t) + \psi(\Delta L, 0). \quad (3)$$

Deze hypothese blijkt bij metingen bevestigd te worden. (Dit soort metingen wordt met behulp van hoofdtelefoons uitgevoerd zodat de tijds- en niveauverschillen volkomen controleerbaar en willekeurig te kiezen zijn.) Het is zelfs mogelijk de hoekverdraaiing van een geluidsbeeld ten gevolge van een niveauverschil ongedaan te maken door een tijdsverschil in tegengestelde zin tussen de oren aan te brengen. Tijds- en niveauverschillen kunnen elkaar compenseren. Bij metingen hieromtrent vindt men dat 1 ms equivalent is met 5 à 12 dB afhankelijk van de aard van het geluid.

Opmerkelijk is dat ons gehoor blijkbaar in staat is, een richtingsindruk te verkrijgen uit combinaties van tijds- en niveauverschillen die bij het natuurlijke richtingshooren niet voorkomen. Dit geeft ons een aanwijzing dat het vermogen om richtingen auditief te bepalen, voor een groot gedeelte van fysiologische aard moet zijn en dat — bij de hier beschreven experimenten althans — het geheugen en de psyche nog geen rol spelen.

f) *De binaurale frequentieanalyse*

In de voorafgaande paragrafen hebben wij er reeds op gewezen dat de richtingsbepaling waarschijnlijk voor een groot gedeelte plaatsvindt voordat de door beide oren afgegeven signalen het brein bereikt hebben. Men moet zich hierbij een mechanisme voorstellen, waarin de signalen van het linkeroor en het rechteroor vergeleken worden en op grond van deze vergelijking de richting bepaald wordt. Vanuit dit mechanisme wordt dan het signaal naar richting gecodeerd, verder naar het brein toegeleid (fig. 7). Een dergelijk schema, hoe aanvaardbaar ook, is echter beslist te eenvoudig van opzet.

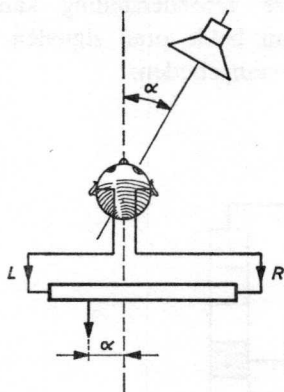


Fig. 7. Voorstellingswijze van het richtingshooren.

Wanneer men bijv. naar een orkestuitvoering luistert, waarbij talrijke instrumenten — over een tamelijk grote ruimte verspreid — optreden, zal men kunnen opmerken dat men deze instrumenten inderdaad verspreid waarneemt. Dit betekent, dat men blijkbaar verschillende richtingen tegelijkertijd kan bepalen of althans minstens verschillende richtingsindrukken tegelijkertijd kan bewaren. Wanneer men aanneemt dat een richtingsindruk verkregen en bewaard wordt met behulp van een of ander mechanisme, zal men blijkbaar tevens moeten aannemen dat

niet slechts één discriminator aanwezig is zoals in fig. 7 geschetst, maar dat een aantal hiervan op een of andere wijze parallel staan en dat ieder van hen een richting kan waarnemen. Men kan zich dan verder de vraag stellen of iedere discriminator reageert op elk soort geluid dat aangeboden wordt, of dat er een bepaalde keuze gedaan wordt, waarbij de aangeboden geluiden in categorieën verdeeld worden, die ieder voor zich zulk een discriminator ter beschikking hebben.

Bij het verdelen van geluid over bepaalde categorieën denkt men uiteraard het eerste aan een analyse van het aangeboden signaal in frequentiebanden. Von Békésy heeft aangetoond dat het gehoor inderdaad een dergelijke analyse verricht; deze vindt plaats in het slakkenhuis en wordt verzorgd door het basilair membraan. Men kan zich nu voorstellen dat elk gedeelte van een basilair membraam, corresponderend met een zekere frequentieband verbonden is met een aparte richtingsdiscriminator en dat de corresponderende delen van de basilaire membranen van beide oren verbonden zijn met de twee uiteinden van hetzelfde systeem. Zulk een hypothetische opbouw is geschetst in fig. 8. Hieruit zou volgen dat men alleen dan een richtingsindruk verkrijgen kan, wanneer de signalen welke aan beide oren toegevoerd worden in dezelfde frequentieband liggen. Deze veronderstelling kan getoetst worden aan experimenten, waarbij aan beide oren signalen van onderling verschillende frequentie worden aangeboden.

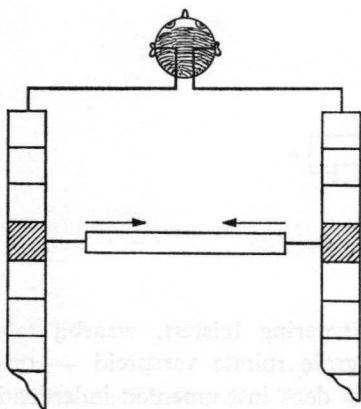


Fig. 8. Modelvoorstelling voor het versmelten van twee tonen tot één indruk.

Bij deze experimenten is gebleken dat niet te hoge sinusvormige tonen met een onderlinge afstand kleiner dan een halve toon bij binaurale aanbieding tot één geluidsindruk tesamen smelten; bij een grotere afstand zijn beide afzonderlijk waarneembaar, de een aan het linkeroor en de

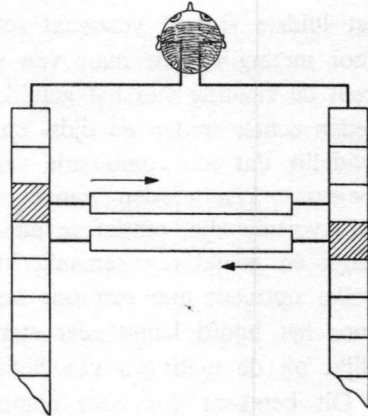


Fig. 9. Modelvoorstelling van het niet-versmelten van twee tonen tot één indruk.

andere aan het rechteroor. In figuur 8 en 9 is aangegeven hoe men zich het gedrag van het gehoor in deze beide gevallen kan voorstellen. Wanneer beide tonen boven 3000 Hz liggen treedt de samensmelting reeds bij een hele-toons afstand of meer op.

Opmerkelijk is, dat de frequentieafstand waarbinnen de samensmelting van beide geluiden optreedt, veel groter is dan de minimale toonhoogte afstand die men monoraal onderscheiden kan. Deze laatste bedraagt namelijk ongeveer 3 Hz beneden 500 Hz en 6‰ boven die waarde. De binaurale frequentieanalyse daarentegen heeft, zoals vermeld, een scheidend vermogen van een halve toon en deze waarde komt overeen met ongeveer 6 %.

II-2 De begrippen tijd en intensiteit

In de voorafgaande paragrafen is gewezen op de betekenis van tijds- en niveauverschillen voor de richtingsbepaling. Er van uitgaande dat de richtingswaarneming op grond van deze verschillen een fysiologisch verschijnsel is, kan men terecht vragen naar de aard van het mechanisme dat uit deze grootheden de informatie omtrent de richting afleidt.

Wanneer alleen tijdsverschillen een rol zouden spelen, zou een mechanisme denkbaar zijn dat het eerstaankomende signaal zover vertraagt totdat de signalen afkomstig van linker en rechteroor volledig coherent zijn, waarna door het meten van de hiervoor benodigde vertraging de richting gedefinieerd is.

Wanneer daarentegen alleen niveauverschillen aanwezig zouden zijn, dan zou men een mechanisme kunnen verzinnen dat op soortgelijke wijze

het luidste signaal verzwakt tot het niveau van het zwakste, waarna door meting van de mate van verzwakking eveneens een indicatie omtrent de richting van het geluid mogelijk is. Onder normale omstandigheden echter treden de tijds- en niveaoverschillen gelijktijdig op. Het is duidelijk dat een combinatie van vertraging en verzwakking alleen dan toegepast kan worden wanneer de signalen aan beide oren volkomen gelijkvormig zijn, omdat ze alleen dan door vertraging en verzwakking gelijk en gelijktijdig gemaakt kunnen worden. De verzwakking echter, welke optreedt aan een oor tengevolge van de afscherpende werking door het hoofd hangt zeer sterk van de golf lengte af, zoals duidelijk blijkt uit de metingen van Sivian en White (fig. 1).

Dit betekent dat voor complexe tonen, waarin dus meerdere frequenties te onderkennen zijn de golfvormen aan beide oren verschillend zijn. Wilska heeft nader onderzocht hoe afhankelijk de trillingsvorm is van de hoek waaronder een complex geluid wordt aangeboden (fig. 10).

Men zou zich nu kunnen voorstellen dat complexe geluiden eerst in Fouriercomponenten (grond- en boventonen) ontbonden worden en dat voor iedere component apart op bovenvermelde wijze het niveau- en fazeverschil gemeten wordt. Zoals reeds vermeld is kan men het basilaire membraan in het slakkenhuis, als een harmonische analysator beschouwen; de trillingspatronen op overeenkomstige plaatsen van de basilaire membranen in linker- en rechteroor zullen dan ook min of meer sinusvormig zijn. Von Békésy echter heeft aangetoond dat de frequentieanalyse door het basilair membraan tamelijk pover is en onvoldoende om alle harmonischen van elkaar te scheiden. Het lijkt dan ook onwaarschijnlijk, dat een voortdurend vergelijken van de momentane waarden van de geluidsgolven aan beide oren de basis is, waarop de meting van tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen en zodoende ook de richtingsbepaling berust.

Wanneer men inplaats van de momentane waarden uitgaat van de gemiddelde of middelbare waarden van de amplituden, vermijdt men de moeilijkheid die de ongelijke golfvormen opleveren. Het meten en gebruiken van een gemiddelde waarde heeft echter een zeer typische consequentie voor de waarneembaarheid van tijdsverschillen. Daar dit middel neerkomt op een integratie over een zeker tijdsbestek heeft men geen nauwkeurige aanwijzing meer over het tijdstip zelf. Voor het richtingshoren zou dit betekenen dat de tijdsverschillen nauwelijks nog een rol kunnen spelen. Daar dit nu niet overeenkomt met de resultaten van talloze metingen kan men met vrij grote zekerheid aannemen, dat men bij het richtingshoren de intensiteit van de aan beide oren op-

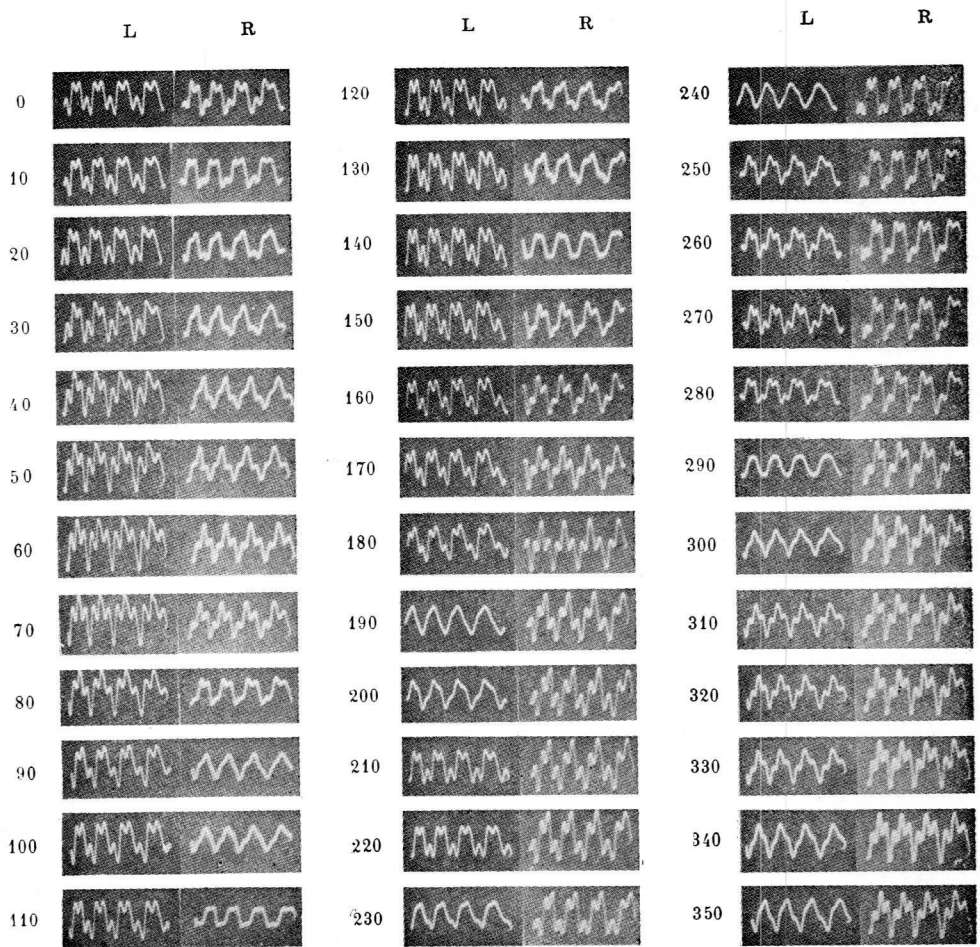


Fig. 10. Invloed van de invalshoek op de golfvorm van een complex geluid.



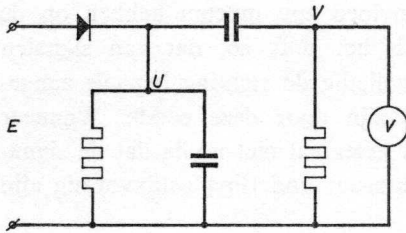


Fig. 11. Schakeling voor piekdetectie.

trekende geluidsgolven niet meet als gemiddelde of middelbare waarden.

Een indruk van de intensiteit van een geluid zou men ook nog kunnen verkrijgen door de amplituden te meten die in de pieken van het signaal optreden. Nu heeft Mol er op gewezen dat de zenuwcellen van het basilair membraan mogelijkerwijze als piekwaardemeters fungeren. Het ligt voor de hand dat de pieken ook gebruikt kunnen worden bij de richtingsbepaling. De tijdsverschillen blijven dan bewaard en kunnen gemeten worden als het tijdsinterval tussen de corresponderende pieken aan linker- en rechteroor. Nu is het echter een bekende en essentiële eigenschap van piekwaardemeters, dat de aanwijzing van een zekere piek bepaalde nawerkingen veroorzaakt en voor de volgende piek de kans vermindert om waargenomen te worden. Fig. 11 toont ons een eenvoudige schakeling om pieken te detecteren en in fig. 12 zijn de pieken aangegeven die in een bepaald signaal aangewezen worden. Het zal duidelijk zijn dat de eerste piek in een signaal altijd waargenomen wordt; een voorafgaande piek en de daarvan afkomstige maskering ontbreken ten enenmale. Hieruit zou men dan ook mogen concluderen dat het

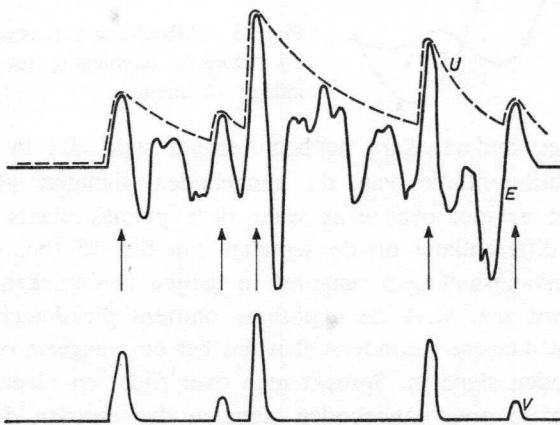


Fig. 12. De spanningen E , U en V uit fig. 11 als tijdsfunctie. De pijlen geven de pieken aan die gedetecteerd worden.

begin van een bepaald signaal veel invloed zou moeten hebben op de richtingsbepaling hiervan. Misschien is het zelfs zo, dat van signalen van korte duur de eerste piek reeds volledig de richting bepaalt aangezien de daaropvolgenden gemaskeerd zijn door deze eerste. Wanneer dit inderdaad zou optreden, dan is het helemaal niet nodig dat de signalen toegevoerd aan het linker- en rechteroor onderling gelijkvormig zijn om tot een indruk te versmelten.

De hier gegeven hypothese kan men op juistheid toetsen door experimenten waarbij aan de oren korte niet-gelijkvormige signalen aangeboden worden. Wij zelf zijn uitgegaan van twee trillingskringen die door een stapfunctie worden aangestoten. De hierbij ontstane gedempte trillingen worden via hoofdtelefoons gescheiden aan de oren toegevoerd. Wanneer beide kringen op dezelfde wijze afgestemd zijn en de luidheden even groot zijn, ontstaat bij de waarnemer een klankbeeld midden in het hoofd. Door de luidheden ongelijk te maken verschuift dit beeld naar de zijde van het luidste signaal. Het blijkt nu dat men deze verschuiving ook teweeg kan brengen door de resonantiefrequentie van één der kringen te wijzigen. Deze verschuiving kan weer gecompenseerd worden door de onderlinge intensiteitsverhouding te veranderen. Het blijkt dan, dat het geluid weer precies in het midden gelocaliseerd wordt wanneer de aanvangshellingen van beide signalen gelijk zijn (fig. 13). De rest van het signaal is blijkbaar volkomen onbelangrijk hierbij.

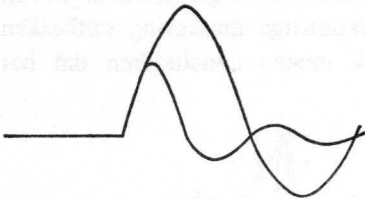


Fig. 13. Afbeelding van twee signalen die bij binaurale aanbieding tot een middenindruk versmelten.

Verscheidene onderzoekers hebben verondersteld dat in het gehoor ergens een differentiatie van de aangeboden signalen plaats vindt, al is men het er niet over eens waar deze precies plaats vindt. Past men nu een differentiatie op de signalen van fig. 13 toe, dan worden de gelijke aanvangshellingen omgezet in gelijke beginpieken. Dit resultaat ondersteunt zeer sterk de hypothese omtrent piekdetectie. We mogen met reden daarom veronderstellen dat het oor reageert op de pieken in de aangeboden signalen. Spreekt men over tijds- en niveauverschillen tussen de aan de oren aangeboden signalen dan worden deze waargenomen als de tijds- en niveauverschillen tussen corresponderende pieken, voorzover deze althans voor het gehoor gedetecteerd worden.

II-3 De betekenis van inzetten

In het algemeen wordt de tekenkunst beschouwd als een tamelijk gewoon uitdrukkingsmiddel voor de menselijke geest. Reeds een kleuter van slechts enkele jaren oud kan tekeningen — hoe onbeholpen ook — herkennen en begrijpen. Bij nader inzien is het echter toch wel bijzonder merkwaardig, dat de mens in staat is bepaalde lijnen en punten op een stuk papier te interpreteren als een afbeelding van een huisje, een boom, een auto etc. Nu zijn uiteraard deze lijnen en punten niet zo maar willekeurig op dit papier aangebracht; ze corresponderen met zeer bepaalde punten en overgangen in het oorspronkelijk aanwezige of verbeelde gezichtsveld. Blijkbaar ontleedt onze gezichtszin ontvangen beelden in twee grootheden: snelle overgangen en vlakken van constante of bijna constante visuele eigenschappen. Bij het tekenen beperken wij ons slechts tot het aangeven van deze overgangen en deze informatie is blijkbaar voldoende om een herkenbaar beeld te scheppen. De meest consequente toepassing van deze toch eigenlijk zeer merkwaardige methode van waarnemen vindt men bij het caricatuurtekenen: de essentiële kenmerken van de overgangen worden op een groteske wijze overdreven.

Ons gehoor lijkt volgens een soortgelijk principe te werken. Het is bekend dat de klankkleur van muziekinstrumenten niet alleen bepaald wordt door de verhouding van grond- en boventonen maar ook door de wijze waarop de tonen beginnen. Veel organisten hebben iets tegen geëlektrificeerde speeltafels. Vraagt men hen naar de reden hiervan, dan is het stereotype antwoord, dat ze dan niet meer de inzet van de tonen in de hand hebben. Een ander voorbeeld over de invloed van het begin van klanken op de waarneming is te vinden bij spraak. Medeklinkers zijn min of meer te beschouwen als de inzetten van de daaropvolgende klinkers. Vervangt men in een tekst alle klinkers door een bepaalde klinker, dan is deze tekst nog wel ongeveer te volgen. Vervangt men daarentegen alle medeklinkers door een bepaalde medeklinker dan is de tekst volkomen onbegrijpelijk.

Soortgelijke effecten blijken ook bij het richtingshoren op te treden. Het is mogelijk in een galmende ruimte de richting van een geluidsbron te bepalen hoewel het directe geluid (het geluid dat de weg van de bron naar de waarnemer zonder reflecteren tegen obstakels aflegt) slechts een zeer klein gedeelte van de totale geluidsenergie is, die door de oren van de waarnemer wordt opgevangen. Het meeste geluid bereikt de waarnemer eerst na enige reflecties en van deze reflecties nemen wij meest-

al de richting in het geheel niet bewust waar. Dit effect wordt in de literatuur wel eens de wet van het eerste golffront genoemd. Men zou kunnen zeggen dat het gehoormechanisme hoofdzakelijk geïnteresseerd is in nieuwe bijzonderheden van het geluid en dat nieuwe verschijnselen (het directe geluid; dit komt immers het eerste aan bij de waarnemer) gebruikt worden voor de richtingsbepaling van de totale geluidsenergie. De reflecties worden immers waargenomen alsof ze van de bron direct afkomstig waren en niet eerst een omweg gemaakt hadden. Op het eerste gezicht lijkt het dat dit gedrag het nut van richtingshoren twijfelachtig maakt: er treden immers grote fouten op. Aan de andere kant echter zou er wel heel weinig zin toe te kennen zijn aan een richtingsgehoor, wanneer dit alle reflecties afzonderlijk — ieder in hun eigen richting — zou onderscheiden; het was dan namelijk praktisch onmogelijk uit te zoeken welke van al die schijnbare geluidsbronnen nu de eigenlijke geluidsbron was.

Wanneer wij geluid analyseren met behulp van een aantal gedempte filters (bijv. een „visible speech apparatus”), dan kunnen wij waarnemen dat spraak of muziek een „spectrum” van frequentiebanden heeft, dat gedurende een zekere tijd constant of bijna constant blijft en dan plotseling verandert. Spraak zou men dan ook in eerste benadering mogen opvatten als een aantal opeenvolgende toonpulsen, waarvan de frequentieinhoud ten naaste bij constant is. Men kan nu verwachten dat de duur van deze toonpulsen verlengd wordt door reflecties die in een zaal optreden. Immers na afloop van de toonpuls zelf komen bij de waarnemer nog steeds reflecties van deze toonpuls aan. Volgens de wet van het eerste golffront worden deze reflecties niet naar richting onderscheiden, maar nemen zij de richting van het directe geluid aan. Met andere woorden het laatste gedeelte van zo een verlengde toonpuls komt schijnbaar uit de richting van het eerste gedeelte. Het is niet onwaarschijnlijk dat dit veel algemener geldig is.

Volgens de wet van het eerste golffront zou men dan ook mogen verwachten, dat de richting van een willekeurige toonpuls bepaald wordt bij het begin of de inzet en dat de dan verkregen richtingsindruk gedurende de rest van de toonpuls bewaard blijft. Dit komt overeen met de opvatting, dat de zintuigen vooral geïnteresseerd zijn in nieuwe verschijnselen. De inzet van een toon is zo'n nieuw verschijnsel, waarop zich de oplettendheid van de waarnemer richt. Deze hypothese wordt bevestigd door talrijke onderzoeken, waarbij gebleken is dat het zeer moeilijk is de juiste richting van langzaam aanzwellende tonen te bepalen en dat een duidelijke inzet onmisbaar is om correct de richting van een

geluid vast te stellen.

De invloed van de inzet op de richtingsbepaling kan men gemakkelijk onderzoeken door de inzet van een toonpuls uit een andere richting te laten klinken dan de rest van deze toonpuls. Nu is het vrijwel onmogelijk om exact te definiëren wat men onder de inzet van een toon verstaat, maar het zal toch wel een signaal zijn dat in het allereerste begin gelijk is aan de toon zelf en dan wegsterft. Dit is te bereiken met de schakeling van fig. 14. De op de draaggolf van de toonpuls afge-

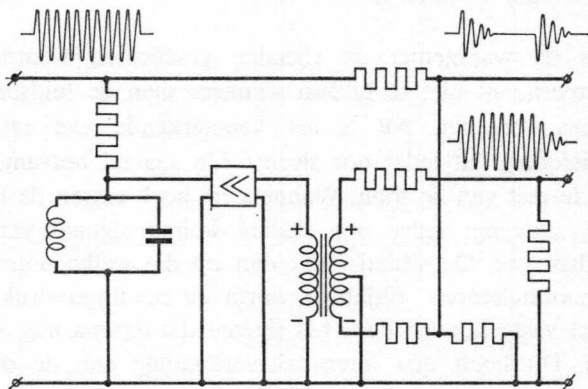


Fig. 14. Schakeling om een sinusvormige toon te verdelen in inzet en restant.

stemde kring wordt aangestoten door de toonpuls en slingert langzaam in. Het verschil tussen het signaal over deze kring en de oorspronkelijke toonpuls beschouwen wij nu als de inzet. (Uiteraard treedt er ook nog een signaal op bij het einde van de toonpuls, maar dit is voor deze beschouwingen niet belangrijk.) Wanneer men nu beide signalen over aparte luidsprekers weergeeft, blijkt men inderdaad de gehele toonpuls, die zonder bezwaar enkele seconden mag duren, te horen uit de richting waarvan de inzet vandaan komt. De inzet hoeft hiervoor niet langer dan 10 à 40 ms te duren (fig. 15). Nader onderzoek leert dat de signalen in het geheel niet sinusvormig hoeven te zijn om dit effect te laten optreden. Bij signalen met een complexe draaggolf is het resultaat volledig hetzelfde.

Het blijkt echter, dat de hier beschreven effecten aan enige beperkingen onderhevig zijn. De hoek waaronder de waarnemer de luidsprekers ziet moet de waarde van ongeveer 40° niet overschrijden,

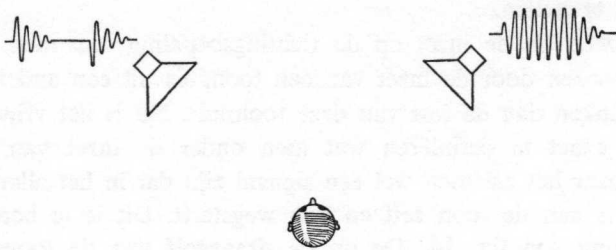


Fig. 15. Opstelling om de invloed van de inzet op de richtingsgewaarwording na te gaan.

daar anders de waarnemer de signalen gescheiden waarneemt. Ook blijkt het experiment niet te lukken wanneer men de luidsprekers door hoofdtelefoons vervangt. Nu is het kenmerkende van een weergave via hoofdtelefoons, dat ieder oor slechts één signaal ontvangt, hetzij de inzet hetzij de rest van de toon. Wanneer de hoek tussen de luidsprekers te groot is, ontvangt ieder oor slechts weinig signaal van de „verkeerde” luidspreker. De situatie lijkt dan op die welke optreedt bij gebruik van hoofdtelefoons. Blijkbaar wordt de richtingsindruk die bij de inzet ontstaat vastgehouden door het signaal dat daarna nog aan de oren aanwezig is. Dit hoeft qua intensiteitsverhouding aan de oren niet te corresponderen met de richting van de inzet, maar mag er toch ook weer niet al te ver van afwijken.

Tussen de inzet en de rest van de toon kan men bovendien nog een tijdsverschil aanbrengen (fig. 16). Bij een waarde van 40 à 60 ms neemt de toon nog steeds de richting aan van de inzet. Bij grotere waarden van dit tijdsverschil hoort de luisteraar beide signalen gescheiden. De oorspronkelijke richtingsdruk is verloren gegaan en zodoende kan een nieuwe richting gekozen worden.

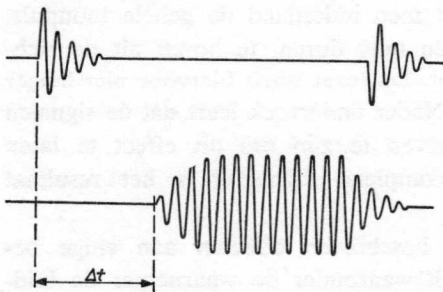


Fig. 16. Tijdsverschil tussen inzet en restant van een sinusvormige toon.

II-4 Het monaurale richtingshoren

In de voorafgaande paragrafen hebben wij gewezen op het belang van tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen voor de richtingsbepaling door het gehoor. De hierbij gegeven mededelingen worden echter schijnbaar volledig door het volgende experiment ontzenuwd, dat men zonder bijzondere meetapparatuur kan uitvoeren. Wanneer men naar een geluidsbron (bv. een radio) luistert, bepale men hiervan de richting. Daarna wordt een oor zo goed mogelijk afgesloten. Op grond van de theorie der intensiteitsverhoudingen zou men nu mogen verwachten, dat de geluidsbron plotseling verschuift naar de richting van het verlengde van de ooras en wel naar de zijde van het niet-afgesloten oor. Dit blijkt echter in het geheel niet het geval te zijn. De nu waargenomen richting is nog steeds de oorspronkelijke richting. Men zou hieruit dan ook op het eerste gezicht concluderen dat de theorie omtrent de invloed van intensiteitsverhoudingen op de richtingsbepaling onjuist is.

Bij dit experiment echter spelen verschillende factoren een belangrijke rol. Meestal betreft het hier immers geluiden die de waarnemer welbekend zijn; de invloed van de plaats van de geluidsbron ten opzichte van het open oor op het timbre zal dan uit ervaring ongeveer bekend zijn. Dit geeft al een mogelijkheid om de richting van de geluidsbron te schatten. Verder zullen hoofdbewegingen timbrevariaties ten gevolge hebben, welke met deze hoofdbewegingen volledig gesynchroniseerd zijn. Ook deze variaties zullen een richtingsbepaling vergemakkelijken. Bovendien is er nog het zeer belangrijke feit dat de luisteraar helemaal niet verwacht dat een radio plotseling van plaats gaat veranderen bij het afsluiten van een oor; hij zal dan ook betrekkelijk weinig geneigd zijn een dergelijke verandering waar te nemen.

Om het monaurale richtingshoren nader te onderzoeken hebben wij enkele experimenten gedaan met een waarnemer, bij wie kort daarvoor het rechteroor volledig was verwijderd. Deze persoon nam plaats in een reflectievrije ruimte; om hem heen waren 6 luidsprekers opgesteld (fig. 17). Telkenmale werd nu via één der luidsprekers een kortdurend geluid gegeven en aan de waarnemer gevraagd via welke luidspreker dit geschiedde. Om de invloed van een eventuele bekendheid met het timbre zoveel mogelijk uit te schakelen werd als signaal ruis gebruikt; bovendien werd telkenmale de luidheid gewijzigd om correlatie tussen richting en luidheid tegen te gaan. Bij deze experimenten bleek dat deze luisteraar systematisch rechts-voor als links-voor, rechts-achter als links-achter en rechts-midden als links-midden waarnam. Hij hoort dus alles

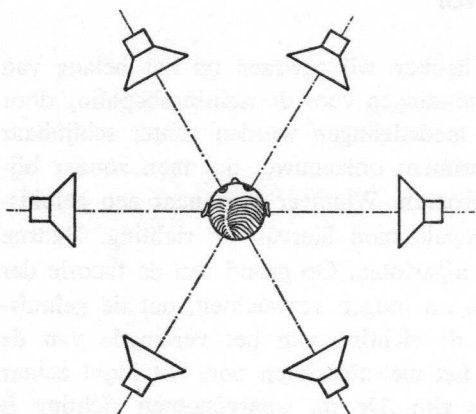


Fig. 17. Opstelling om de richtingsbepaling door een aan één oor dove waarnemer te meten.

aan de linkerzijde. In feit is zijn onderscheidingsvermogen beperkt tot voor-achter discriminatie. Het lijkt voor de hand liggend dat deze discriminatie gebaseerd is op hoofdbewegingen. Wanneer de waarnemer het hoofd beweegt zal dit weinig invloed hebben op het timbre van geluidsbronnen die in het verlengde van de ooras liggen. Uit de metingen van Sivian en White (fig. 1) kan men immers zien, dat de intensiteitsverhouding tussen hoge en lage tonen zich praktisch niet wijzigt wanneer een bron in het verlengde van de ooras gelegen, een weinig heen en weer beweegt. Het timbre verandert dan dus ook nauwelijks. De invloed van hoofdbewegingen op het timbre van een geluidsbron rechts-voor is veel groter en in dezelfde zin als voor een geluidsbron links-voor. Voor een geluidsbron rechts-achter treden bij hoofdbewegingen timbre-variatiën op die in dezelfde zin zijn als voor een geluidsbron links-achter.

Uit deze experimenten blijkt dat de intensiteitstheorie ook hier geldig is. De waarnemer hoort immers alles aan de zijde van het goede oor. Kennelijk met behulp van hoofdbewegingen slaagt hij erin de verkregen richtingsindruk nog enigermate te corrigeren. Het is echter te verwachten dat deze correctie beter wordt naarmate deze persoon meer ervaren wordt in het monauraal richtingshoren. Overigens blijkt uit dit experiment wel dat het monaurale richtingshoren weinig nauwkeurig is wanneer het de localisering van onbekende timbres betreft.

II-5 Het afstandshoren

Van een geluidsbron kan men niet slechts de richting bepalen; men kan ook min of meer de afstand ervan schatten. Uiteraard zal dan ook een of andere fysische grootte, die voor het gehoor waarneembaar is, van de afstand afhangen. Zo zal bijvoorbeeld de luidheid van een signaal verband kunnen houden met de afstand. Deze afhankelijkheid treedt echter alleen duidelijk op wanneer geluidsbron en waarnemer zich in een reflectievrije ruimte bevinden. In een kamer of een zaal zal weliswaar de directe bijdrage van de geluidsbron tot de intensiteit ter plaatse van de waarnemer afhankelijk zijn van de afstand, de nagalm echter zal ten naaste bij constant blijven; de totale intensiteit zal dan ook bij verandering van afstand nauwelijks variëren. Bovendien is de waargenomen luidheid natuurlijk ook nog afhankelijk van de hoeveelheid geluidsenergie die op dat ogenblik door de geluidsbron geproduceerd wordt. De mogelijkheid om op grond van luidheden afstanden te schatten lijkt dan ook vrij beperkt. Misschien speelt zij een rol bij het waarnemen van snelle afstandsvariatiës.

De afstand van een geluidsbron kan men min of meer schatten uit de verhouding tussen direct geluid en nagalm. Naarmate een geluidsbron dichterbij komt zal de intensiteit van het directe geluid toenemen en omgekeerd, terwijl het nagalmgeluid ten naaste bij constant blijft. Uiteraard is hierbij een essentiël punt, dat men de akoestische eigenschappen van de ruimte waarin zich de geluidsbron en de waarnemer bevinden, kent. Dit is overigens niet nodig wanneer het slechts het waarnemen van afstandsvariatiës betreft. Wanneer men geluid via een luidspreker weergeeft en hieraan — eventueel via een tweede luidspreker — hetzelfde geluid vertraagd en van galm voorzien nog aan toevoegt kan men door de intensiteitsverhoudingen tussen deze signalen te wijzigen zeer goed afstandsvariatiës suggereren.

Von Békésy heeft aangetoond dat er nog een andere wijze is om de afstand van bekende geluidsbronnen te bepalen. De geluidsdruk, veroorzaakt door een bolvormige geluidsbron, verandert omgekeerd evenredig met de afstand tot het middelpunt van de geluidsbron. Dit geldt voor alle frequenties. Met de snelheid van de luchtdeeltjes in een bolvormige golf is dit echter niet het geval. Men kan aantonen dat de snelheid van de luchtdeeltjes op verschillende afstanden van het centrum ook nog afhankelijk is van de frequentie, en wel zo dat met kleiner wordende afstand de snelheid bij lage frequenties meer toeneemt dan bij hoge frequenties. Deze frequentieafhankelijkheid van de snelheid van de lucht-

deeltjes als functie van de afstand geeft ons volgens von Békésy nu de mogelijkheid de afstand van een geluidsbron te schatten aan de hand van het waargenomen timbre. Hierbij is dan echter een noodzakelijke voorwaarde dat het oor ook een snelheidsontvangst toestaat. Uit impedantiemetingen aan het trommelvlies blijkt dit inderdaad het geval te zijn.

Uit berekeningen volgt dat de frequentieafhankelijkheid van de snelheid slechts voor kleine afstanden merkbaar is. Zodoende is het slechts mogelijk afstanden kleiner dan 150 cm nauwkeurig te bepalen en neemt de nauwkeurigheid van de afstandsbepalings met toenemende afstand sterk af.

Door bij geluidsreproductie de lage tonen extra te versterken kan men de illusie van nabijheid scheppen. Dit wordt wel toegepast bij de sprekende film. De stemmen van de filmspelers lijken dan dichterbij.

II-6 De projectie in de ruimte

Het gehoor neemt niet alleen de geluiden waar die geproduceerd worden in de ruimte om de luisteraar heen, maar ook het geluid dat binnen in de luisteraar ontstaat, bv. het kloppen van bloedvaten. Bovendien worden storingen in de oren of zenuwbanen waargenomen als suizen of fluiten van een oor. Van het gehoor wordt nu verlangd dat het in staat is de waargenomen geluidssensaties te verdelen over twee categoriën nl. die waarvan de oorzaak uitwendig van de waarnemer is gelegen, en die waarbij dit niet het geval is. Onder normale omstandigheden zijn er een aantal factoren die deze keuze vergemakkelijken: een luisteraar kan zich niet voorstellen dat een heel orkest in zijn hoofd plaatsgenomen heeft, een visueel contact is aanwezig zodat de waarnemer de geluidsbron ziet etc. Bij metingen echter, waarbij een luisteraar onnatuurlijke signalen via hoofdtelefoons aangeboden krijgt, komt het echter vrij vaak voor dat hij deze signalen in zijn hoofd localiseert. Dit wijst er op, dat in dit laatste geval kenmerken, typerend voor de ontvangst van signalen van buiten, ontbreken.

Wanneer een geluidsbron zich buiten het hoofd van een waarnemer bevindt, zal de plaats van deze geluidsbron niet beïnvloed worden door kleine onwillekeurige hoofdbewegingen van deze waarnemer. Bij het aanbieden van signalen via hoofdtelefoons zal de schijnbare plaats van de geluidsbron volledig gekoppeld zijn aan de stand van het hoofd. Ditzelfde is ook het geval wanneer deze geluidsbron zich binnen

het hoofd van de waarnemer zou bevinden. Het is voor een waarnemer, die via hoofdtelefoons geluid aangeboden krijgt, dan ook zeer voor de hand liggend de bron van dit geluid in zijn eigen hoofd te projecteren indien er geen aanwijzingen zijn, die hiertegen pleiten.

Blijkt de plaats van de geluidsbron onafhankelijk van de stand van het hoofd, dan bevindt de geluidsbron zich buiten het hoofd. Uit de tijds- en niveauverschillen kan de waarnemer nu de hoek bepalen die de richting van de geluidsbron met de ooras maakt. De richting zelf weet hij in eerste instantie nog niet. Beschouwt men in eerste benadering het hoofd als een bol, waarin diametraal de oren geplaatst zijn, dan is het duidelijk dat alle richtingen, die een bepaalde hoek met de ooras maken ten opzichte van beide oren gelijkwaardig zijn. Met andere woorden de toehoorder kan niet zonder meer onderscheiden of de geluidsbron zich boven of onder hem, voor of achter hem bevindt.

Hebben de hoofdbewegingen nu een relatieve beweging van de geluidsbron ten opzichte van de oren ten gevolge dan zullen tijd-, faze- en niveauverschillen op een of andere wijze synchroon met de hoofdbewegingen veranderen. Beweegt de waarnemer het hoofd om een verticale as dan zal de verandering van de richting van het geluid afhangen van de elevatie van de bron. Noemt men ψ de hoek die de richting van de geluidsbron met de ooras maakt en β de hoekverdraaiing van het hoofd om een verticale as, dan is de waarde van $d\psi/d\beta$ bepalend voor de hoek, die de richting van de geluidsbron met het horizontale vlak maakt. Voor een richting in het horizontale vlak is $|d\psi/d\beta| = 1$; voor de richting loodrecht daarop $d\psi/d\beta = 0$. Voor de twee gelijkwaardige richtingen in het horizontale vlak, respectievelijk naar voren en naar achter is $d\psi/d\beta$ gelijk in grootte maar tegengesteld van teken. Dit geldt ook voor andere waarden van de elevatie. Er blijft dan nog één dubbelzinnigheid over en wel of de geluidsbron boven of beneden het horizontale vlak door de ooras ligt. Om daarover te kunnen beslissen is nog een andere beweging van het hoofd nodig, namelijk die waarbij men de ooras uit de horizontale stand brengt. Deze beweging kan klein zijn, daar zij geen richtingsbepaling hoeft te geven, maar slechts een keuze uit twee mogelijkheden moet opleveren.

In principe maken hoofdbewegingen dus een eenduidige richtingsbepaling mogelijk. Om na te gaan of inderdaad op deze wijze de definitieve keuze gedaan wordt heeft De Boer indertijd het volgende experiment gedaan. De twee microfoons van een kunsthoofd (d.i. een massieve bol van ongeveer de afmetingen van het hoofd met aan weerszijden een microfoon) worden ieder met één schelp van een hoofdtelefoon verbou-

den, de linker microfoon met de linkerschelp en de rechter microfoon met de rechterschelp. Luistert nu een proefpersoon via deze hoofdtelefoons naar een geluidsbron die ergens in de ruimte om het kunsthoofd opgesteld staat, dan kan hij niet onderscheiden of de geluidsbron vóór of achter het kunsthoofd geplaatst is. Wordt nu het kunsthoofd heen en weer bewogen op de wijze van „neen knikken” en beweegt de proefpersoon zijn hoofd synchroon met de bewegingen van het kunsthoofd, dan kan hij terstond de geluidsbron localiseren. Hij kan nu voor — achter onderscheiden. Beweegt hij daarentegen het hoofd in tegenfase met het kunsthoofd dan zijn al zijn conclusies omtrent de voor — achter discriminatie onjuist.

De invloed van hoofdbewegingen voor de bepaling van de elevatie van een geluidsbron blijkt ook uit het volgende experiment. Wanneer men de verbindingslijn van een stereofonische luidspreker-opstelling nadert, verschuift het geluidsbeeld naar boven en wanneer men tussen de luidsprekers in staat, is het geluidsbeeld praktisch recht boven de waarnemer. In zijn verklaring van dit effect wijst de Boer erop dat het stereofonisch geluidsbeeld ontstaat door de sommatie van de intensiteiten van beide luidsprekers aan beide oren. Naarmate men de verbindingslijn van beide luidsprekers dichter nadert hebben hoofdbewegingen steeds minder invloed op de intensiteitsverhouding tussen beide oren, zoals de berekening van De Boer aantoont. De relatieve bewegingen van de fictieve geluidsbron ten opzichte van de oren van de waarnemer worden daardoor eveneens kleiner en dit wordt geïnterpreteerd als een toenemende elevatie van het geluidsbeeld.

Uit deze experimenten blijkt voldoende de belangrijkheid van de hoofdbewegingen voor het bepalen van de elevatie. Hiervoor hoeft men echter het hoofd niet opzettelijk heen en weer te bewegen. De onbewuste bewegingen van het hoofd beslaan ongeveer een hoek van 7° en dit is blijkbaar voldoende om het hier beschreven doel mogelijk te maken.

Behalve hoofdbewegingen heeft een luisteraar nog andere methoden om de elevatie van een geluidsbron te bepalen. Bij onze beschouwingen zijn wij er tot nu toe van uitgegaan dat het hoofd een bolvorm heeft en dat de oren hierin diametraal geplaatst zijn. Dit is in eerste benadering misschien wel juist, maar men kan zich zeer wel voorstellen dat de onsymmetrie van de vorm van het hoofd en vooral de aanwezigheid van de oorschelpen invloed hebben op de eigenschappen van de aan beide oren ontvangen signalen. Zonder twijfel zal het timbre van een geluid dat achter een waarnemer wordt geproduceerd anders zijn dan dat van

een geluid aan de voorzijde. Deze timbre-afhankelijkheid geeft dus ook een mogelijkheid om voor en achter van elkaar te onderscheiden. Bovendien is het niet uitgesloten dat bepaalde combinaties van tijdsverschillen en niveauperhoudingen met een geluid aan de voorzijde gecorreleerd worden, en bepaalde andere combinaties juist met geluid dat achter de luisteraar uitgestraald wordt.

In principe zijn er dus verscheidene mogelijkheden om de elevatie van een geluidsbron te bepalen en wel enerzijds methoden die op hoofdbewegingen berusten en anderzijds die welke de radiale onsymmetrie van het hoofd ten nutte maken. Experimenten tonen aan dat beide methoden gebruikt worden; voor lage tonen geschiedt de bepaling hoofdzakelijk met hoofdbewegingen, bij hoge tonen vooral volgens de andere methode. Het blijkt echter dat de individuele verschillen hierin tussen de proefpersonen erg groot zijn.

In zekere zin berusten de methoden om de elevatie van een geluid te bepalen en om geluiden naar buiten te projecteren op tweede-orde verschijnselen in de ontvangen geluidsgolven. Dit betekent dat het mechanisme dat deze projectie verwezenlijkt een zeer gevoelig apparaat moet zijn dat waarschijnlijk vrij spoedig overstuurd is. Luide signalen (bv. hamerslagen) kan men, vooral indien men vermoeid is, niet of nauwelijks meer naar buiten projecteren. Deze geluiden klinken dan ook vaak zo alsof ze in het hoofd zelf ontstaan zijn.

HOOFDSTUK III

STEREOFONIE

III-1 De stereofonische geluidswaergave

Ongetwijfeld zal het vermogen van de mens om richting te horen oorspronkelijk van zuiver teleologische betekenis geweest zijn. Voor de primitieve oermens was het gehoor een orgaan dat hem kon waarschuwen voor gevaar of hem behulpzaam kon zijn bij het verzamelen van voedsel. Uiteraard is zulk een waarschuwing of hulp waardevoller, wanneer hieraan ook een aanwijzing gekoppeld is uit welke richting dit gevaar komt of in welke richting dit voedsel te bemachtigen is. In onze moderne tijd blijft de waarschuwingfunctie van het richtingshoren nog altijd zeer belangrijk; men denke slechts aan het huidige verkeer waarbij in ruime mate gebruik gemaakt wordt van claxons en fietsbellen.

Hoewel de eerste stereofonische grammfoonplaten, welke op de markt verschenen nog sterk aan dit waarschuwingselement appeleerden — men denke slechts aan de voorliefde waarmee men treinen met luid geraas van links naar rechts en terug liet rijden — is het duidelijk dat de uiteindelijke betekenis van de stereofonische waergave in het artistieke vlak ligt. De mogelijkheid is geschapen om de instrumenten van een orkest niet slechts naar timbre en toonhoogte maar ook naar richting onderscheidbaar te maken.

Toch is dit idee beslist niet nieuw. De Nederlandse componist Adriaan Willaert stelde in 1550 te Venetië twee aparte koren aan weerskanten van de kerk op; barokorgels werden gebouwd in drie aparte secties die op verschillende plaatsen opgesteld waren en gedeeltelijk overeenkomstig hun plaatsing de namen kregen van hoofdwerk, borstwerk en rugwerk. Bij de eerste uitvoering van zijn requiem in de Dôme des Invalides plaatste Berlioz in de vier hoeken vier aparte orkesten en symboliseerde aldus de engelen die uit alle windstreken de doden ten oordeel oproepen.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat men reeds spoedig nadat men er in geslaagd was geluid op te nemen en op een andere plaats weer te geven, getracht heeft bij deze overdracht de ruimtelijke spreiding van geluid te bewaren. Daar onder normale omstandigheden de richting wordt bepaald uit de verschillen die tussen beide oren aanwezig zijn, ligt

het voor de hand dat men dergelijke verschillen bij de overdracht moet behouden. Men kan dit bereiken door voor de geluidsbronnen (bijv. een orkest) een kunsthoofd te plaatsen waarop ter plaatse van de oren twee microfoons zijn aangebracht en deze microfoons te verbinden met de twee schelpen van een stel hoofdtelefoons (fig. 18). Het blijkt op deze wijze mogelijk een goede richtingsindruk over te dragen. Aan deze

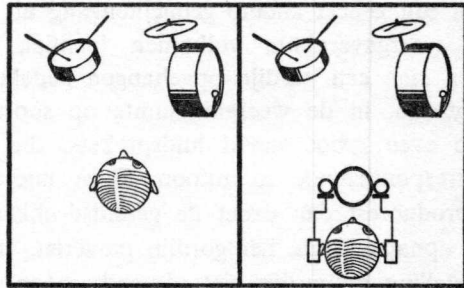


Fig. 18. Het bewaren van de richtingsindruk bij signaaloverdracht met behulp van een kunsthoofd en hoofdtelefoons.

weergavemethode zijn echter enige nadelen verbonden. Voor de projectie naar buiten zijn immers de relatieve hoofdbewegingen ten opzichte van de geluidsbronnen erg belangrijk. Bij een weergave via hoofdtelefoons echter zal het fictieve orkest alle hoofdbewegingen volgen; zodoende hoort men het orkest dan ook niet ver uitgespreid voor zich maar in of vlak boven zijn hoofd samengedrongen. Een verder nadeel is uiteraard ook het feit dat men bij aanwezigheid van veel luisteraars even zoveel hoofdtelefoons nodig heeft. Men zou vooral hierom de aparte hoofdtelefoons liever willen vervangen door twee gemeenschappelijke weergavers; op deze wijze komt men tot de opstelling van twee luidsprekers, een rechts voor en de ander links voor (fig. 19). Uiteraard zal dan elk oor van beide luidsprekers signaal ontvangen en op het eerste

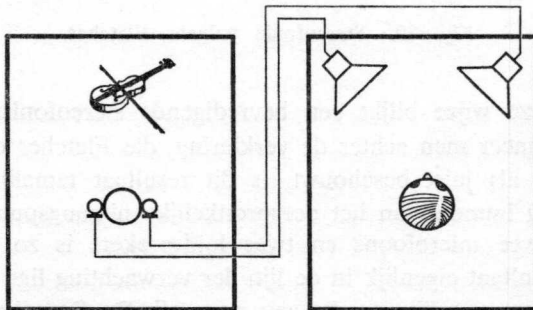


Fig. 19. Stereofonie met behulp van een kunsthoofd.

gezicht zou men mogen verwachten dat dit het stereofonisch effect kan verdoezelen. Dit blijkt echter geenszins het geval; de stereofonische geluidsoverdracht is volkomen bevredigend. Deze wijze van opname en weergave — indertijd door De Boer ingevoerd — is in de begintijd van de stereofonie erg populair geweest en heden — mogelijk een beetje ten onrechte — volkomen op de achtergrond geraakt.

Fletcher gaat bij de realisatie van de stereofonische geluidsoverdracht van een geheel andere gedachtengang uit. Hij veronderstelt de opname- en weergaveruimte volkomen identiek. In de opnameruimte denkt men zich een gordijn opgehangen bedekt met een oneindig aantal microfoons, in de weergaveruimte op soortgelijke wijze een gordijn met een even groot aantal luidsprekers, die ieder verbonden zijn met de corresponderende microfoon. Deze microfoons-luidsprekers combinatie reproduceert dan exact de geluidsdrukken van de geluidsgolven die in de opnameruimte het gordijn passeren. In de praktijk is een dergelijke opstelling natuurlijk niet uitvoerbaar en daarom door Fletcher vereenvoudigd tot een drietal microfoons en luidsprekers (fig. 20). Naderhand is dit zelfs teruggebracht tot twee microfoons en twee luidsprekers.

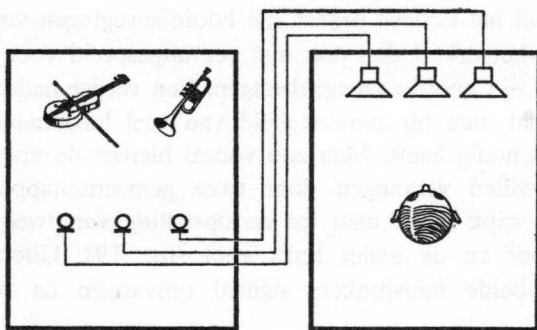


Fig. 20. Stereofonie volgens Fletcher.

Ook op deze wijze blijkt een bevredigende stereofonische weergave mogelijk. Wanneer men echter de verklaring, die Fletcher oorspronkelijk gegeven heeft als juist beschouwt, is dit resultaat tamelijk verrassend. De benadering immers van het oorspronkelijke uitgangspunt met behulp van slechts twee microfoons en twee luidsprekers is zo grof dat een zeer pover resultaat eigenlijk in de lijn der verwachting ligt. Het resultaat echter is volkomen gelijkwaardig aan dat welk De Boer bereikt, hoewel de opname-methodes in beide gevallen volkomen verschillend zijn. Beide

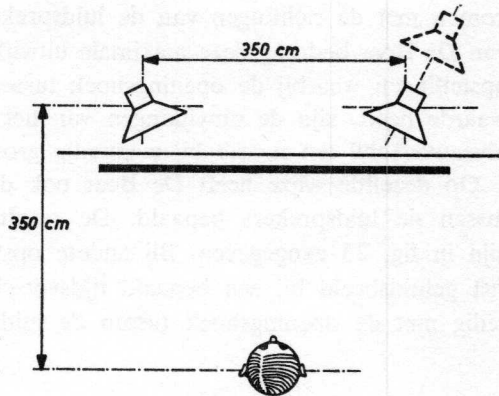


Fig. 21. Opstelling om de stereofonische waarneming te meten.

systemen hebben echter ook punten van overeenkomst. Door het aanbrengen van een kunsthoofd tussen de microfoons of door de microfoons op grote afstand van elkaar te plaatsen zullen tussen deze microfoons en zodoende ook tussen de luidsprekers niveau- en tijdsverschillen optreden. Bij het natuurlijke richtingshoren zijn de niveau- en tijdsverschillen tussen beide oren de richtingbepalende grootheden. Het blijkt nu dat bij de stereofonische geluidswaarneming de niveau- en tijdsverschillen tussen de luidsprekers de stereofonische indruk mogelijk maken.

De Boer heeft metingen verricht omtrent de invloed van niveau- en tijdsverschillen tussen twee luidsprekers op de schijnbare plaats van een fictieve bron. Hierbij maakte hij gebruik van de opstelling die in fig. 21 geschetst is. Door een niveauverschil aan te brengen tussen twee luidsprekers waaraan overigens hetzelfde signaal wordt toegevoerd, is de invloed van deze grootte op de richting waarin de luisteraar de geluidsbron meent te horen, te bepalen. De resultaten die De Boer gevonden heeft, zijn gegeven in fig. 22. Hierbij zij nog opgemerkt dat de maximale uitwijkingen van het geluidsbeeld uiteraard overeen-

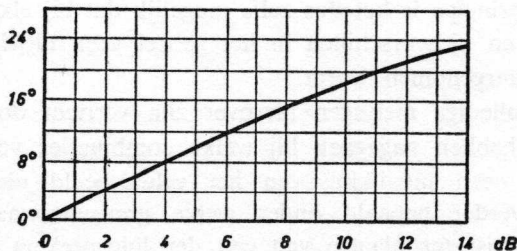


Fig. 22. Invloed van het niveauverschil op de stereofonische waarneming.

komen met de richtingen van de luidsprekers zelf. Bij de experimenten van De Boer bedroeg deze maximale uitwijking ongeveer 27° . Bij andere opstellingen waarbij de openingshoek tussen de luidsprekers een andere waarde heeft, zijn de uitwijkingen van het geluidsbeeld bij een bepaald niveauverschil ten naaste bij evenredig groter of kleiner.

Op dezelfde wijze heeft De Boer ook de invloed van tijdsverschillen tussen de luidsprekers bepaald. De resultaten van deze experimenten zijn in fig. 23 aangegeven. Bij andere opstellingen is de uitwijking van het geluidsbeeld bij een bepaald tijdsverschil ten naaste bij weer evenredig met de openingshoek tussen de luidsprekers.

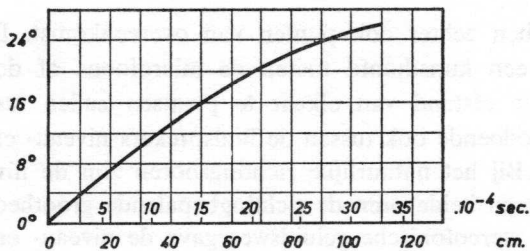


Fig. 23. Invloed van het tijdsverschil op de stereofonische waarneming.

Wanneer niveau- en tijdsverschillen tegelijkertijd en in dezelfde zin aanwezig zijn, blijkt de uitwijking van het waargenomen geluidsbeeld groter te zijn dan de uitwijking wanneer slechts een van deze grootheden aanwezig is. Er treedt dus een zekere additie op. Zijn de niveau- en tijdsverschillen echter in tegengestelde zin aangebracht dan is de uitwijking juist kleiner. De optelling van de uitwijkingen, veroorzaakt door het niveauverschil en het tijdsverschil vindt blijkbaar plaats met behoud van teken. In principe is het dus zelfs mogelijk dat bij elkaar tegenwerkende niveau- en tijdsverschillen in het geheel geen uitwijking van het geluidsbeeld waargenomen wordt.

De meest volledige metingen hierover zijn verricht door Meyer en Schodder. Zij hebben nagegaan bij welke combinaties van niveau- en tijdsverschillen geen uitwijking van het geluidsbeeld uit het midden optreedt, en verder bepaald onder welke grensvoorwaarden de geluidsbron nog juist ter plaatse van een der luidsprekers waargenomen wordt (fig. 24). De lijnen die het verband tussen niveau- en tijdsverschillen aangeven voor een bepaalde uitwijking van het geluidsbeeld lig-

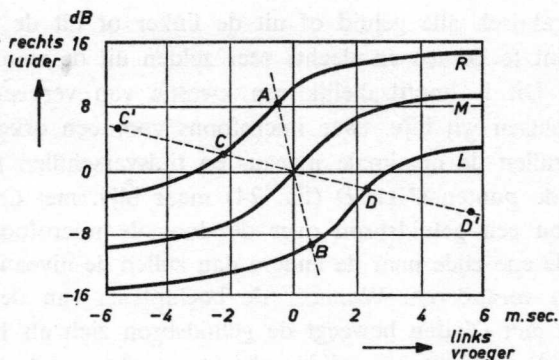


Fig. 24. Invloed van combinaties niveau- en tijdsverschil op de stereofonische waarneming.

gen ongeveer evenredig met de uitwijking tussen de curven *L* en *R* verdeeld.

Uit figuur 24 blijkt dat er talrijke mogelijkheden zijn om stereofonische opnamen te verkrijgen. Men hoeft slechts twee microfoons zo op te stellen dat voor de meest opzij gelegen geluidsbronnen de aan de microfoons optredende niveau- en tijdsverschillen juist op de lijnen *L* en *R* liggen. Men kan bijv. twee cardioiden nemen die vlak bij elkaar geplaatst zijn, maar onderling verschillend gericht staan (fig. 25). Er treden dan praktisch alleen niveauverschillen op. De lijn volgens welke de opname plaatsvindt ligt langs de verticale as van fig. 24. Gebruikt men een kunsthoofd dan zullen ook nog tijdsverschillen optreden, zodat de opname voorgesteld wordt door de lijn *A-B*. Plaatst men microfoons op grote afstand van elkaar en van de geluidsbronnen, dan treden hoofdzakelijk tijdsverschillen op. Deze opnamemethode kan men weergeven met de lijn *C-D*.

Een euvel welk men wel eens bij stereofonische geluidsreproductie aantreft is het zogenaamde „gat in het midden”. Men bedoelt hier-

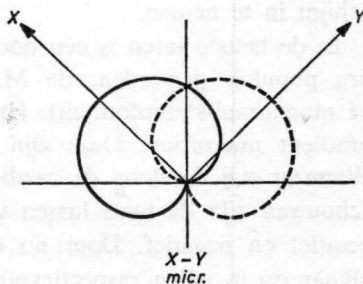


Fig. 25. Opstelling van twee cardioiden voor stereofonische opnamen.

mede dat praktisch alle geluid of uit de linker of uit de rechter luidspreker schijnt te komen en slechts zeer zelden uit de ruimte tussen de luidsprekers. Dit is hoofdzakelijk een kwestie van verkeerde opname-techniek. Plaatsen wij bijv. twee microfoons voor een orkest te ver uit elkaar dan zullen de maximale niveau- en tijdsverschillen niet overeenkomen met de punten *C* en *D* (fig. 24) maar bijv. met *C'* en *D'*. Beweegt zich nu een geluidsbron over de door de microfoons bestreken ruimte van de ene zijde naar de andere dan zullen de niveau- en tijdsverschillen gaan veranderen. Wanneer de beginplaats van de geluidsbron overeenkomt met *C'* dan beweegt de geluidsbron zich als het ware van *C'* naar *D'*. Aan de weergavezijde gebeurt er echter niets totdat de geluidsbron op de plaats overeenkomend met *C* is aangekomen. De geluidsbron wordt nog altijd in de rechterluidspreker waargenomen. Bij verdere beweging van de geluidsbron bereiken wij nu zeer snel het punt *D*, waarbij het geluid uit de linkerluidspreker schijnt te komen. Daarna verandert er in de weergave niets meer, hoewel aan de opnamezijde de geluidsbron zich als het ware nog van *D* tot *D'* verplaatst. Bijna steeds zal een geluidsbron dus gelocaliseerd worden in een der luidsprekers en slechts zelden in de ruimte hiertussen.

Het hoeft geen nader betoog dat men de niveau- en tijdsverschillen tussen de weergavekanalen ook kunstmatig kan aanbrengen. Dit gebeurt vaak bij opnamen van populaire muziek, waar men de diverse solisten ieder apart op één spoor van een veelsporige magnetische drager registreert en eerst naderhand bij de montage deze opname met bepaalde niveauverschillen op de twee sporen van de uiteindelijke drager registreert. Een soortgelijke werkmethode past men ook wel toe bij de opname van solistenconcerten. Het orkest wordt dan op normale wijze stereofonisch opgenomen. De solist (bijv. een violist) wordt apart opgenomen met een zeer dichtbij geplaatste microfoon. Het door deze microfoon afgegeven signaal wordt over de beide kanalen verdeeld op zodanige wijze dat bij de weergave de solist de door de producer gewenste plaats schijnt in te nemen.

In de laatste jaren is een door Lauridsen ingevoerde opname-methode erg populair geworden: de M.S. methode (afkorting van Mitten-Seite of monauraal-stereofonisch). Hierbij gebruikt men een cardioïde en een gradient microfoon. Deze zijn loodrecht op elkaar geplaatst (fig. 26). Wanneer wij de door de cardioïde afgegeven spanning als positief beschouwen zijn de twee lussen van de gradient microfoon respectievelijk positief en negatief. Door nu de spanningen van beide microfoons bij elkaar op te tellen respectievelijk van elkaar af te trekken kan men de

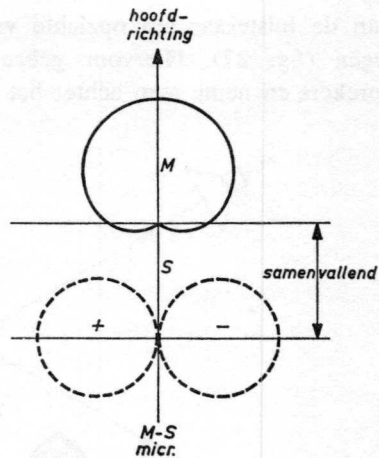


Fig. 26. Opstelling van een cardiode en een gradient-microfoon voor stereofonische opnamen.

instrumenten aan de linkerzijde respectievelijk aan de rechterzijde bevoordelen. Op deze wijze ontstaan twee geluidskanalen die afhankelijk van de richting der geluidsbronnen in niveau verschillen. Het M.S. systeem heeft een bijzondere eigenschap. Combineert men de afgegeven signalen niet, dan heeft men dus een signaal van een cardiode en een signaal van een gradient microfoon. Nadere beschouwing toont aan dat het eerste signaal te beschouwen is als de som van een fictief links en een fictief rechts kanaal en het andere signaal als het verschil. Op de voordelen hiervan zal in een volgende paragraaf nader ingegaan worden.

Zoals wij gezien hebben wordt de richtingsindruk bij een stereofonische geluidswaergave veroorzaakt door de niveau- en tijdsverschillen tussen de luidsprekers, of correcter gezegd door de tijds- en niveauverschillen die de toehoorder tussen de luidsprekers waarneemt. Willen deze laatste volkomen gelijk zijn aan die welke werkelijk tussen de luidsprekers aanwezig zijn, dan zal de toehoorder precies even ver van beide luidsprekers moeten plaats nemen, d.w.z. in het middelloodvlak van de denkbeeldige lijn die de luidsprekers verbindt. Wanneer er bijv. in een gezin diverse personen zijn die willen luisteren zouden deze allen achter elkaar moeten plaatsnemen, hetgeen voor een enkele keer misschien wel leuk is maar in het algemeen toch niet bevorderlijk voor de huiselijke gezelligheid. Gelukkig kan men het gebied waarin men een goede stereofonische waergave verkrijgt vergroten. Men kan namelijk de luidsprekers zo opstellen dat, wanneer men dicht bij de ene luidspreker komt deze luidspreker zwakker en de andere luidspreker luider klinkt. De extra niveau- en tijdsverschillen ontstaan door de asymmetrische plaats

van de luisteraar ten opzichte van de luidsprekers, werken elkaar dan tegen (fig. 27). Hiervoor gebruike men min of meer gerichte luidsprekers en neme men achter het snijpunt van de luidsprekerassen plaats.

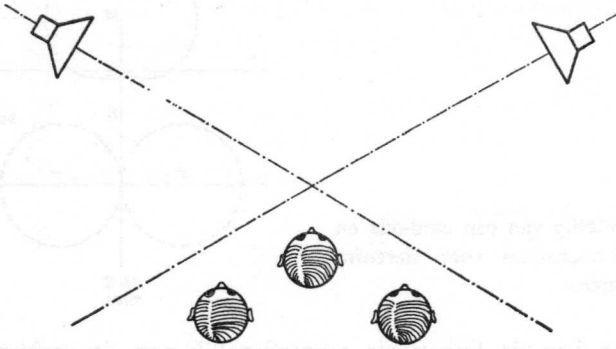


Fig. 27. Geschikte luidsprekeropstelling bij stereofonische weergave.

Bij de stereofonische geluidswaergave zal men soms opmerken dat de toehoorders het niet eens zijn over de vraag, of een bepaald muziekinstrument zich in het midden bevindt of iets links of rechts daarvan. Bij het natuurlijke richtingshoren merken wij deze onenigheid echter veel minder op. Nu zullen vaak — ook in niet-pathologische gevallen — beide oren van een waarnemer niet volkomen gelijk zijn. Bij het natuurlijke richtingshoren is zulk een waarnemer gewend om onbewust zijn richtingsindruk te corrigeren. Bovendien helpen hoofdbewegingen hem om de waargenomen positie op juistheid te toetsen. Het is nu zeer de vraag of deze onbewuste correctie bij stereofonische weergave nog mogelijk is. Ook al meent men slechts één bron te horen, men moet zich er toch steeds bewust van blijven dat dit een bron is, die de luisteraar zelf maakt uit de signalen van twee luidsprekers. De invloed van hoofdbewegingen op de waarneming van de schijnbare bron bij stereofonische weergave hoeft niet precies gelijk te zijn aan die van een werkelijk aanwezige bron daar ter plaatse. De bij ongelijke oren optredende onbewuste correctie lukt dan minder goed. Deze verklaring wordt ondersteund door het feit dat aan één oor dove personen vaak nog redelijk richting kunnen horen bij natuurlijk luisteren, maar dat zij bij stereofonische geluidswaergave absoluut geen richtingsensatie ondervinden.

Tot nu toe hebben wij de nadruk gelegd op de richtingswaarneming bij stereofonische geluidswaergave. Dit is echter niet het enige winstpunt en misschien zelfs niet het belangrijkste bij stereofonie. Het is immers

betrekkelijk oninteressant te horen dat de violen links en de trompetten rechts in een orkest geplaatst zijn. Het is veel belangrijker dat men ze gescheiden kan horen en zodoende een grotere transparantie in het totale geluidsbeeld verkrijgt. Het beste Hi-Fi apparaat met één luidspreker kan immers geen betere weergave bereiken dan die welke men ondervindt, wanneer men in de deur van een concertzaal een gat zaagt ter grootte van een luidspreker en daarachter gaat luisteren. Dank zij de stereofonische weergave zijn wij in staat dit ene gat te vergroten tot een groot raam en de daardoor verkregen totaalindruk is veel belangrijker dan de waarneming dat violen links en trompetten rechts zitten.

III-2 De stereofonische geluidsoverdracht

Tot nu toe hebben wij ons bij de behandeling van het onderwerp stereofonie uitsluitend beziggehouden met de opname en weergave. Hoewel men inderdaad bij demonstraties wel eens een echte life-uitvoering geeft, waarbij de microfoons via enkele versterkers direct met de luidsprekers verbonden zijn, zal bij de normale toepassing van stereofonie meestal een ingewikkelder verbindingsschakel tussen opname en weergave gebruikt worden. De systemen die voor deze overdracht in aanmerking komen zijn dezelfde die men bij éénkanaals weergave gebruikt: te weten A.M. en F.M. radio-overdracht, de magnetische drager en de grammofoonplaat. Dit feit nu veroorzaakt een complicatie bij het technisch verwezenlijken van stereofonische overdrachtsystemen. Het is namelijk een redelijke eis dat registratie en overdracht compatibel zijn, dat wil zeggen dat men stereofonische opnamen ook via éénkanaalsapparatuur kan weergeven, zij het dan uiteraard niet stereofonisch en omgekeerd éénkanaals opnamen via een stereofonische installatie.

Nu geeft deze laatste eis geen moeilijkheden. Men gebruikt immers voor een éénkanaals weergave inplaats van één nu twee versterkers en twee luidsprekers en in het algemeen is dit qua weergavekwaliteit een verbetering.

Geheel anders ligt de zaak in het eerste geval. Bij een stereofonische opname wordt uiteraard gestreefd naar een zo volledig mogelijke uitbuiting van het stereofonische effect in al zijn facetten, en het is niet zonder meer vaststaand dat bij een realisatie hiervan de éénkanaals kwaliteit van zo'n opname ook maximaal is. Bij een normale stereofonische opname zullen in het linker en rechter kanaal meestal grote schommelingen in niveau optreden. Op niveauverschillen tussen de kanalen

berust immers de richtingsindruk. Luistert men nu slechts één kanaal af dan zullen de nu schijnbaar ongemotiveerde niveauvariaties de kwaliteit ernstig afbreuk doen.

Gelukkig blijkt echter dat men een zeer redelijk éénkanaals signaal kan verkrijgen door het linker en rechtersignaal bij elkaar te voegen. Het heeft dus zin de registratie en/of overdracht van een stereofonisch signaal zo te laten plaatsvinden, dat bij gebruik van een normaal éénkanaals apparaat automatisch dit somsignaal ($L+R$) weergegeven wordt. De richtingsinformatie wordt dan verwerkt in een bij éénkanaalsweergave niet waarneembaar verschilsignaal ($L-R$). In het vorige hoofdstuk hebben wij gewezen op de opnamemethode waarbij men een cardioïde en een gradient microfoon gebruikt. Het voordeel van deze methode is dat men automatisch een som- en verschilsignaal ter beschikking heeft.

a) Registratie op een magnetische drager

Bij de professionele registratie van geluid op een magnetische drager wordt een band over de gehele breedte gemagnetiseerd. Bij de normale handelsapparaten schrijft men het signaal slechts over iets minder dan de halve breedte en keert men, wanneer het einde van de band bereikt is de band om, om vervolgens de andere helft van de band te beschrijven. De op deze wijze ontstane geluidsporen zijn dan door een neutrale niet-beschreven zone gescheiden. Bij de registratie van stereofonische signalen gebruikt men deze twee sporen nu gelijktijdig. De opname- en weergavekoppen zijn dubbelsporig uitgevoerd. Op het ene spoor wordt nu het linker- en op het andere spoor het rechtersignaal geschreven. Deze opnames zijn dan ook weinig geschikt voor weergave via een éénkanaals apparaat.

Om het bezwaar te ondervangen dat bij stereofonische opnames de speelduur van de band gehalveerd wordt, daar beide sporen gelijktijdig gebruikt worden, tracht men over te gaan op lagere bandsnelheden en smallere sporen. Om het inleggen van de band te vergemakkelijken en de band zo stofvrij mogelijk te houden brengt men deze bij voorkeur in een cassette aan. Uiteraard is zulk een bandcassette het meest geschikt voor opnames van grote werken. Voor populaire tophits is de cassette minder geslaagd daar deze voor een speelduur van ongeveer vier minuten relatief duur wordt.

b) Registratie op grammofoonplaten

De stereofonische registratie op grammofoonplaten vindt momenteel

uitsluitend plaats door beide signalen in één groef onder te brengen. Dit is mogelijk wanneer de groefwanden die verondersteld worden loodrecht op elkaar te staan, twee orthogonale bewegingen kunnen uitvoeren in het vlak loodrecht op de groefrichting. Hier komen twee stellen bewegingsrichtingen voor in aanmerking. Bij het eerste type zijn de bewegingen respectievelijk loodrecht op en evenwijdig aan het plaatoppervlak (zg. 0-90 systeem); bij het andere systeem maken beide bewegingen een hoek van 45° met het oppervlak van de plaat (zg. 45-45 systeem). Volgens beide systemen kan men nu het linker en rechter signaal schrijven: bijv. het linker signaal loodrecht op het plaatoppervlak en het rechter evenwijdig hieraan; dan zal het echter moeilijk zijn beide signalen met gelijke kwaliteit te registreren aangezien de registratiemethodes voor de twee signalen niet dezelfde zijn. Wat dit betreft zijn de mogelijkheden van het 45-45 systeem veel gunstiger. Dan is de registratiemethode voor linker- en rechtersignaal in principe dezelfde (fig. 28).

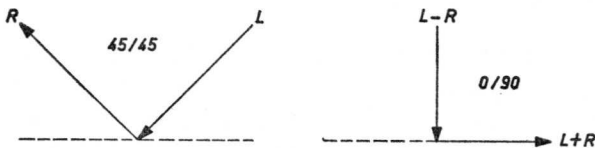


Fig. 28. Registratiemethode voor stereofonie op grammofoonplaten.

De bewegingen die in fig. 28 gegeven zijn kan men beiden ontbinden in een verticale en een horizontale component. De som van de verticale componenten geeft dan een signaal evenredig met het verschil van linker en rechter kanaal ($L-R$), de som van de horizontale componenten een signaal evenredig met de som hiervan ($L+R$). Zoals reeds vermeld is, is deze som een zeer aanvaardbaar compatibel signaal voor enkelkanaals weergave. Bij een gewone éénkanaals grammofoonplaat is het signaal horizontaal geschreven en de groeftaster is dan ook voor bewegingen in het horizontale vlak gevoelig. Dit betekent dat men bij afspelen van een stereofonische grammofoonplaat met behulp van een éénkanaals platen-speler een weergave verkrijgt van de som van het linker en rechter signaal. De stereofonische grammofoonplaat voldoet dus aan de eis van compatibiliteit.

c) Radio overdracht via F.M.-zenders

Ook hier zal men aan de eis van compatibiliteit willen voldoen. Dit betekent dat de som der signalen ($L+R$) op de draaggolf gemoduleerd

moet worden op dezelfde wijze waarop men ook bij éénkanaals overdracht te werk gaat.

Daarentegen mag het verschil der signalen ($L-R$) niet in de éénkanaalsontvanger gediscrimineerd en via de luidspreker weergegeven worden. Men brengt dit signaal daarom bij voorkeur aan op een hulpdraaggolf, die in amplitude of frequentie door dit verschilsignaal gemoduleerd wordt. Zonder de speciale uitrusting aan het F.M. toestel, waardoor dit verschilsignaal gedetecteerd wordt, blijft dit signaal onhoorbaar.

In principe is het mogelijk bij niet-stereofonische uitzendingen het hulpkanaal te gebruiken voor de uitzending van een tweede programma; dit in tegenstelling met de stereofonische grammfoonplaat, waarbij de overspraak tussen de groefwanden te groot is voor de registratie van een dubbel programma.

d) Radio overdracht via A.M.-zenders

De eerste stereofonische uitzendingen hebben plaats gevonden via normale middengolfstations. Voor ieder van de beide over te dragen geluidskanalen werd een aparte zender gebruikt; met twee normaal in de handel verkrijgbare radio-apparaten konden deze uitzendingen beluisterd worden. Voor regelmatige toepassing is deze methode echter niet geschikt. Het is niet verantwoord in het toch al overbezette middengolfgebied voortdurend twee zenders te reserveren voor stereofonische overdracht. Bovendien is dit overdrachtssysteem niet compatibel, aangezien men met één toestel slechts het linker- of het rechtersignaal ontvangen kan.

Op grond van de beperkte plaatsruimte in het middengolfgebied is het wenselijk, dat de bij stereofonische overdracht te gebruiken bandbreedte niet groter is dan die welke voor éénkanaals weergave beschikbaar is. Dit is te bereiken door enkelzijbandmodulatie toe te passen, waarbij de ene zijband met het linker- en de andere zijband met het rechtersignaal gemoduleerd wordt. Analyse toont aan, dat dan de draaggolf in amplitude gemoduleerd wordt met de som en in frequentie met het verschil van beide signalen. Een normale A-M ontvanger, die alleen de amplitudemodulatie detecteert geeft alleen het somsignaal weer; de overdrachtsmethode is dus compatibel.

In het algemeen echter lijkt een stereofonische geluidsoverdracht via middengolfzenders weinig aantrekkelijk, gezien de onkosten hiervan en de betrekkelijk slechte weergavekwaliteit van amplitudemodulatie. Het is veel meer voor de hand liggend de gelden die eventueel voor

stereofonische geluidsoverdracht beschikbaar zijn, te besteden aan een stereofonie-systeem via F.M. zenders.

c) Informatiebeperking bij stereofonie overdracht

Daar men bij stereofonische geluidsoverdracht twee signalen moet overbrengen, heeft men een tweemaal zo grote informatieruimte nodig als bij een normale éénkanaalsoverdracht. Bij toepassing van een magnetische drager of van een grammofoonplaat verkrijgt men deze ruimte door twee geluidssporen te gebruiken; bij de overdracht via radiozenders beslaat het signaal een tweemaal zo grote bandbreedte als strikt genomen nodig is bij éénkanaals ontvangst. Dit betekent dat wij in feite voor de overdracht van de richtingsinformatie evenveel ruimte of bandbreedte gebruiken als voor de overdracht van het signaal zelf. Het is dan ook niet verwonderlijk dat men tracht de bandbreedte, nodig voor de overdracht van de richtingsinformatie, te beperken.

Wanneer het weer te geven signaal slechts van één geluidsbron (bv. een viool, een zanger) afkomstig is, zou men er mee kunnen volstaan dit signaal over te dragen en hieraan nog een regelsignaal toe te voegen dat de intensiteitsverhouding van de luidsprekers regelt overeenkomstig de gewenste richting. Voor de overdracht van dit regelsignaal is slechts een zeer smalle frequentieband nodig. Het regelsignaal kan men uit de intensiteitsverhouding van het oorspronkelijke links- en rechtssignaal afleiden. In principe kan men op deze wijze slechts één bron een bepaalde richting geven, daar men het weer te geven signaal aan de ontvangstzijde niet in delen splitsen kan en deze delen op verschillende wijze regelen. Om aan dit bezwaar tegemoet te komen kan men het stuursignaal afleiden uit de intensiteitsverhoudingen van de inzetten die in het signaal voorkomen. De richtingsindruk wordt immers bij de inzet verkregen en het is dus voldoende om alleen de richtingen van de inzetten te coderen. Daar de inzetten slechts kort duren kan men veel vlugger achter elkaar nieuwe richtingen aangeven, zodat de toehoorder de indruk krijgt geluid uit onderling verschillende richtingen tegelijkertijd waar te nemen. Uiteraard zal dan de intensiteit van elke luidspreker zeer veel en snel variëren; daardoor is het geluid van een luidspreker apart ongenietbaar. Dit betekent dat men bij te dicht naderen van een luidspreker niet alleen de richtingsindruk verliest, maar bovendien een zeer vervormd, bijna hikkend geluid waarneemt. Een ander nadeel is bovendien het feit dat de ontvanger door de aanwezigheid van modulators wezenlijk gecompliceerder wordt.

Wil men de ontvanger onveranderd laten en toch de maximale amplitudes en de bandbreedte van het stereofonisch signaal beperken, dan komen alleen die methodes in aanmerking, waarbij uitsluitend tijdens de opname, registratie of uitzending de signalen bewerkt worden. Uiteraard betreft het ook dan alleen de richtingsinformatie, m.a.w. het surplus dat nodig is om de richtingsindruk over te dragen. Bij de F.M. overdracht brengt men dit surplus — het $L-R$ kanaal — over via een hulpdraaggolf, bij de grammofoonplaat wordt het geregistreerd als verticale verplaatsing van de groef. In verband met vervormingen, technologische moeilijkheden, overspraak e.d. zal men nu dit $L-R$ signaal zo klein mogelijk willen houden.

Nu zullen in een $L-R$ kanaal vaak geen zeer lage frequenties meer aanwezig zijn. Voor lage frequenties is de richtwerking van de microfoons meestal niet erg groot; bovendien zal ten gevolge van de grote golflengte ook het faseverschil tussen beide microfoons gering zijn. Nadat het linker- en rechterkanaal van elkaar afgetrokken zijn, zullen uit dit verschilsignaal dan ook de zeer lage frequenties verdwenen zijn. Vaak echter zal men meer beperking van het $L-R$ signaal verlangen en zal men dus trachten dit signaal nog verder te besnoeien. Wil men zulks doen dan zal men eenzelfde bewerking moeten toepassen op het $L+R$ signaal, daar men naderhand na combinatie van het $L+R$ kanaal met het $L-R$ signaal weer twee stereofonische signalen wil verkrijgen. Door deze bewerkingen vermindert echter de weergavekwaliteit. Om dit tegen te gaan kan men nog een vertraagd signaal aan het $L+R$ kanaal toevoegen eventueel zelfs in tegengestelde zin bewerkt. Dit vertraagde signaal beïnvloedt wegens het grote tijdsverschil de richtingswerking niet; het kan echter wel de klankbalans herstellen.

Bij een beperking van de frequentie-band in het ($L-R$) kanaal gebruikt men een schakeling als gegeven in fig. 29. Gunstige waarden voor de tijdsvertraging liggen tussen 10 en 30 m sec in. In tabel 1 is de

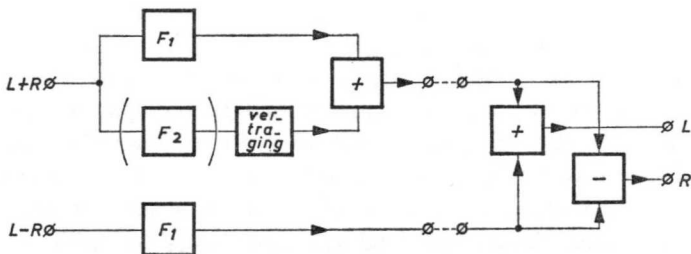


Fig. 29. Bandbreedte beperking bij stereofonieoverdracht.

TABEL I

Invloed van bandbreedtebeperking op de stereofonische waarneming.

Stereofonie	Aantal fouten in % bij normale luisteraars	Aantal fouten in % bij geroutineerde luisteraars
Tot 4 kHz	38	19
Tot 2 kHz	40	11
Vanaf 1 kHz	51	36
Vanaf 2 kHz	47	17

invloed van bandbreedte — beperking op richtingswaardering gegeven. De beperking werd verkregen met behulp van enkelvoudige $R-C$ netwerken en wel tweemaal uitgevoerd als laagdoorlatend filter met als kantelpunt respectievelijk 4 kHz en 2 kHz en tweemaal als hoogdoorlatend filter met als kantelpunt respectievelijk 1 kHz en 2 kHz. De procenten geven aan hoe vaak de luisteraars deze in bandbreedte beperkte stereofonie verwisselden met echte stereofonie die als vergelijkingsobject gegeven werd. Er zij nog op gewezen dat een waarde van 50% betekent dat de luisteraars geen verschil kunnen waarnemen.

Uit deze uitkomsten blijkt wel dat men op het ogenblik nu de doorsnee-luisteraar niet geoefend is in het waarnemen van stereofonie, de bandbreedte van het $L-R$ kanaal aanzienlijk beperken kan. Op lange termijn gezien echter, zal de normale luisteraar meer kunde krijgen en op grond daarvan is het juist alleen met de getallen uit de tweede kolom — die van de geroutineerde luisteraars — rekening te houden. Dan komt voor bandbreedtebeperking alleen de methode in aanmerking, waarbij vanaf 1 kHz stereofonie gegeven wordt. De $L-R$ component bevat dan geen lage frequenties meer, waardoor tevens een aanzienlijke amplitudevermindering bereikt wordt.

Een amplitudeverkleining kan men natuurlijk ook verkrijgen door het stereofonisch signaal zonder meer te verzwakken. Wanneer men echter toch de normale luidheid zonder extra versterking wil verkrijgen, kan men aan het $L+R$ kanaal een vertraagd signaal met normale luidheid toevoegen. Dit vertraagde signaal heeft geen of nauwelijks invloed op de richtingsgewaarwording. Een beperking van de amplitude heeft echter alleen zin wanneer de amplitude groot is. Kleine amplitudes wil men

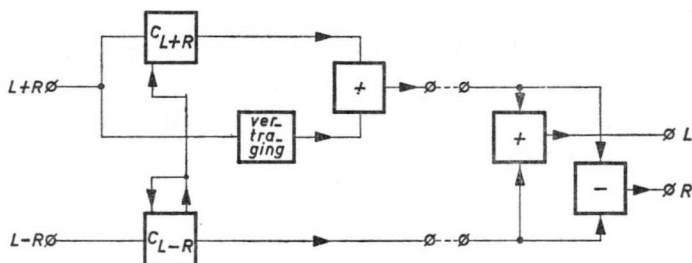


Fig. 30. Dynamiekbeperving bij stereofonieoverdracht.

bij voorkeur in verband met de achtergrondruis niet verzwakken. Het heeft daarom zin deze verzwakking via een compressor te laten plaatsvinden (fig. 30). Om het stereofonisch geluidsbeeld niet te vertekenen, moet de versterking in het $L+R$ kanaal gelijk blijven aan die in het $L-R$ kanaal. In beide kanalen moeten dus compressoren, op onderling gelijke wijze geregeld, aangebracht worden. Daar het juist gaat om de amplitudebeperving in het $L-R$ kanaal, wordt van de uitgangsspanning van de compressor in dat kanaal, de spanning afgeleid die beide compressoren gelijk en gelijktijdig regelt. Het is vrijwel onmogelijk om over deze compressie algemeen geldende regels te geven, daar de juiste keuze van inregeltijd, uitregeltijd en mate van compressie te zeer bepaald worden door de aard van de weer te geven muziek.

Bij alle methoden van informatie-beperving bij stereofonieoverdracht zal iets van de richtingswerking verloren gaan. Hoewel dit procentueel slechts weinig hoeft te zijn zal bij een herhaalde beperking uiteindelijk van de richtingsindruk niets meer overblijven. Hierin ligt het gevaar van kleine informatiebepervingen. Wanneer men tot een nog net toelaatbare beperking zou overgaan bij de produktie van grammofoonplaten en evenzo bij de ontwerp van groeftasters, op soortgelijke wijze in een F.M. zender, in de F.M. ontvanger en de eindversterker, zou bij een grammofoonplatenconcert via de radio de richtingswerking uiteindelijk volkomen verloren gegaan zijn. Daarom is het veiliger alleen daar de richtingsinformatie te beperken, waar dit technisch niet te vermijden is en ook dan nog slechts in die mate als absoluut noodzakelijk.

HOOFDSTUK IV

ZAALAKOESTIEK

IV-1 Reflecties

Tot nu toe hebben wij bij onze beschouwingen over geluid en geluidswaarneming praktisch steeds stilzwijgend aangenomen dat geluid zich vanaf de bron ongestoord kan verspreiden. Vaak echter zullen geluidsbron en toehoorder zich binnen een besloten ruimte — een huiskamer, een concertzaal — bevinden. Door de begrenzende wanden wordt dan de ongestoorde uitbreiding van de geluidsgolven verhinderd. De energie die in de geluidsgolven voorhanden is, wordt aan de wanden gedeeltelijk teruggekaatst. Een luisteraar — in dezelfde ruimte als de geluidsbron aanwezig — zal dan ook niet slechts geluid waarnemen dat direct van de bron afkomstig is maar ook geluid dat eerst een- of meermalen aan de wanden gereflecteerd is.

Het gereflecteerde geluid legt een langere weg af dan het directe geluid alvorens de waarnemer te bereiken en komt daar dan ook later aan. Op het eerste gezicht zou men mogen verwachten dat bijv. de spraakverstaanbaarheid door de aanwezigheid van reflecties verminderd wordt. Gelukkig blijkt dit echter slechts onder bepaalde omstandigheden waar te zijn: meestal wordt de verstaanbaarheid door het optreden van reflecties juist verbeterd. Dit is te danken aan de eigenschappen van het gehoor en van de spraak.

Tengevolge van de absorptie van geluidsenergie tijdens het reflecteren zal bij herhaald reflecteren de intensiteit van opeenvolgende reflecties gemiddeld afnemen; van de andere kant echter zal het aantal reflecties per tijdseenheid bij het voortschrijden van de tijd juist toenemen, ten gevolge van het veel-dimensionaal zijn van de ruimte, waarin zich het geluidsgedrag afspeelt. Beschouwingen over en analyse van de invloed van reflecties op de geluidswaarneming worden door dit gecompliceerde gedrag aanzienlijk bemoeilijkt. Het heeft daarom zin eerst na te gaan welke invloed het optreden van een enkele reflectie op de geluidsoverdracht heeft.

Een reflectie wordt gekarakteriseerd door richting, niveau en tijdsverschil ten opzichte van het directe geluid. Haas, een Duitse onderzoeker, toonde aan dat de invloed van een reflectie op de geluidsoverdracht

weinig afhankelijk is van de richting van deze reflectie. Bij zijn metingen bleek verder dat reflecties die binnen 30 ms. na het aankomen van het directe geluid de waarnemer bereiken, bijdragen tot de luidheid van het waargenomen signaal en wel volgens energieadditie. Dit verschijnsel heeft in de literatuur de naam Haas-effect gekregen. De reflecties zelf worden niet bewust waargenomen. Bij tijdsverschillen boven 30 à 50 ms ontstaat een duidelijk waarneembare echo. De waarde van dit tijdsverschil hangt af van de relatieve intensiteit van de reflectie en van de individuele gesteldheid van de waarnemer.

Aangezien de door Haas verrichte experimenten toch nog te weinig kwantitatieve gegevens hadden opgeleverd, werden zijn metingen door Meyer en Schodder herhaald en uitgebreid. Hierbij werden twee luidsprekers in een stereofonische opstelling gebruikt. Tussen de signalen die aan de luidsprekers werden toegevoerd werden tijds- en niveauverschillen aangebracht en aan de toehoorders werd een oordeel gevraagd over de geluidskwaliteit en de waargenomen effecten. Voor kleine waarden van het tijdsverschil vindt men stereofonische effecten en de resultaten hierbij zijn dan ook vergelijkbaar met de gegevens van fig. 23. Bij grote tijdsverschillen treden heel andere effecten op. In fig. 31 is een algemeen overzicht van deze metingen gegeven; voor bepaalde combinaties van tijds- en niveauverschillen — in fig. 31 de curve aangegeven met *M* — hoort de luisteraar het geluid in het midden tussen beide luidsprekers of beide luidsprekers even luid. Wanneer het niveauverschil een bepaalde van het tijdsverschil afhankelijke waarde overschrijdt — in de figuur

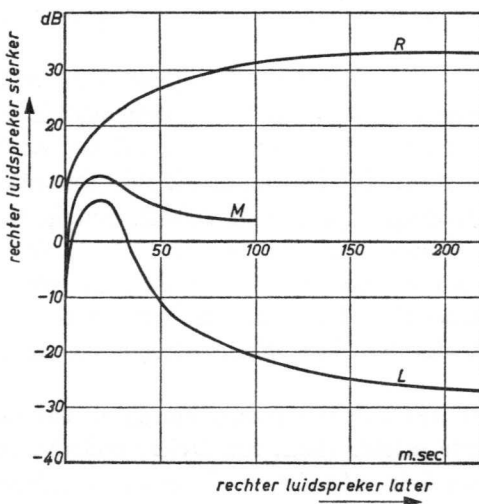


Fig. 31.

Verband tussen niveau- en tijdsverschillen wanneer slechts de linker (*L*) of de rechter (*R*) luidspreker gehoord wordt of beide luidsprekers even luid (*M*) waargenomen worden.

zijn deze waarden aangegeven met de lijnen *L* en *R* — hoort de luisteraar daarentegen slechts één luidspreker. Het blijkt zelfs, dat bij een tijdsverschil van ongeveer 10 ms het niveau van het vertraagde geluid ongeveer 5 dB hoger mag zijn zonder dat dit vertraagde geluid bewust wordt waargenomen.

Bij grote tijdsverschillen kan een storende echo optreden. Deze storende invloed kan men verminderen door tussen het directe geluid en de echo nog een tweede reflectie in te schuiven. Blijkbaar wordt de hoorbaarheid van de echo nu bepaald door de tijds- en niveauverschillen ten opzichte van de voorafgaande reflectie.

In een zaal zullen een zeer groot aantal reflecties optreden. Ieder voor zich zullen deze reflecties meestal een dergelijk niveauverschil ten opzichte van het directe geluid hebben, dat ze in het geheel niet bewust waargenomen worden. Gezamenlijk echter leveren ze het grootste gedeelte van de geluidsenergie die een luisteraar waarneemt. Voor deze luisteraar lijkt het echter alsof al deze energie rechtstreeks van de bron afkomstig is. Dit effect kan men beschrijven met de zogenaamde wet van het eerste golffront: het eerst-aankomende geluid bepaalt de richting waaruit de luisteraar alle geluid meent te horen komen.

IV-2 Nagalm en nagalmtijd

Het is algemeen bekend, dat de waardering van een luisteraar bij aanbieding van auditief waarneembare signalen zeer sterk afhangt van de eigenschappen van de zaal waarin dit geluid wordt geproduceerd en waargenomen. Muziek klinkt in de ene zaal rijker dan in de andere, spraak is daarentegen in deze laatste meestal beter verstaanbaar.

Dit verschil in gedrag tussen de ene zaal en de andere hangt zeer sterk af van de mate waarin en de wijze waarop reflecties optreden. In het algemeen echter is het aantal reflecties in een zaal erg groot. Figuur 32 toont een reflectiepatroon opgenomen in de Royal Festival Hall te Londen. Nu is het praktisch onmogelijk een dergelijk patroon te correleren met de subjectieve waardering over een zaal. Talrijke patronen blijken overeen te komen met een redelijke zaalakoestiek; men kan dus niet een specifiek patroon aanwijzen dat inherent is aan een optimale akoestiek. Men zal zich daarom moeten beperken tot statistische methoden en nagaan of statistisch te beschrijven eigenschappen van een zaal gecorreleerd zijn met een of andere subjectieve waardering.

Gelukkig treden in een zaal zoveel reflecties op dat er — afgezien

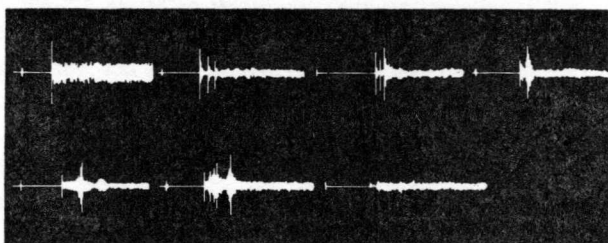


Fig. 32. Voorbeelden van reflecties in zalen.

van eventueel sterke discrete echo's, die gemakkelijk te localiseren zijn — een statistisch te definiëren toestand optreedt. Bij elke reflectie zal een gedeelte van het geluid gereflecteerd worden maar ook een gedeelte geabsorbeerd; na verloop van tijd zal dan ook praktisch alle geluid dat door een geluidsbron uitgestraald is, geabsorbeerd zijn. Schakelt men dus een geluidsbron uit, dan zal eerst na enige tijd, afhankelijk van de mate van absorptie bij de reflecties, de geluidsdruk tot een niet meer waarneembare waarde gedaald zijn. Men noemt nu de gezamenlijke reflecties de nagalm en definieert een nagalmtijd als die tijdsduur, waarbinnen de geluidsintensiteit in een ruimte na afschakelen van de bron verminderd is tot het miljoenste deel van de oorspronkelijke waarde.

De nagalmtijd hangt af van de absorberende eigenschappen van de wanden en van het volume van de zaal. In eerste benadering wordt de nagalmtijd T gegeven door

$$T = 0,16 V/A \quad (4)$$

Hierin is V het volume van de zaal in kubieke meters en A het aantal vierkante meters open raam dat qua absorptie overeenkomt met het werkelijk aanwezige dempingsmateriaal. A noemt men ook wel eens de absorptie in Sabines. Deze grootheid is genoemd naar Sabine die als eerste metingen omtrent nagalm en nagalmtijd gedaan heeft. In vele zalen zullen de toehoorders het belangrijkste absorptiemateriaal vormen. Men kan dan ook voor zalen met niet al te korte nagalmtijd de nagalmtijd berekenen uit het aantal kubieke meters lucht dat in de zaal per zitplaats beschikbaar is.

Het blijkt nu dat de nagalmtijd van een zaal gecorreleerd is met de subjectieve waardering over zo'n zaal. Zo zal een zaal die voor gesproken woord als goed beoordeeld wordt, meestal een nagalmtijd hebben

tussen 1 en 1.5 s. Voor symfonische muziek verlangt men een zaal met een nagalmtijd tussen 1.8 en 2.5 s, terwijl kerkmuziek aangepast is aan ruimten met galmtijden boven de 3 s.

IV-3 Aanvullende criteria ter beoordeling van de zaalkwaliteit

Hoewel de nagalmtijd een zeer belangrijk criterium is bij het ontwerpen en beoordelen van zalen, blijkt dit criterium alleen niet voldoende te zijn om een ruimte akoestisch volkomen te karakteriseren. Een badkamer en een kerkruijnte kunnen onderling gelijke nagalmtijd hebben: desondanks is de akoestische indruk die men van beide ruimten krijgt volkomen verschillend. Men heeft dan ook gezocht naar nog andere grootheden welke van belang zijn voor de karakterisering van ruimten. Bij voorkeur zou men dan grootheden willen hebben die in getalwaarde uit te drukken zijn en bovendien voor berekening vooraf toegankelijk.

De akoestische verbinding tussen een geluidsbron en een luisteraar of microfoon in een zaal kan men beschouwen als een vierpool, waaraan aan de ingang de geluidsbron is aangesloten. Aan de uitgang van deze vierpool zal dan een signaal aanwezig zijn, overeenkomende met het geluidssignaal ter plaatse van de afluisterinrichting. In deze vierpool wordt het akoestisch signaal op zeer gecompliceerde wijze bewerkt. Deze bewerking kan men op een aantal wijzen omschrijven. Men kan de frequentiekaracteristiek van de vierpool meten. Men gaat dan uit van golftheoretische beschouwingen. Het is daarentegen ook mogelijk de aankomsttijd, de richting en het niveau van de reflecties te bestuderen; men blijft dan binnen het raam van de geometrische akoestiek.

Welke methode men ook kiest, er zal blijken dat de eigenschappen van de geluidsoverdracht welke bij die methode belicht worden, op het eerste gezicht zeer sterk afhangen van de plaats van de geluidsbron en de plaats van de waarnemer. De subjectieve waardering over de akoestiek van een bepaalde zaal hangt echter veel minder sterk van de plaats van bron en waarnemer af. Het heeft daarom zin om uit de gemeten eigenschappen grootheden af te leiden, die niet variëren wanneer er veranderingen plaats vinden die subjectief ook niet ondervonden worden.

a) De eigenschappen van de frequentiekaracteristiek

De Amerikanen Bolt en Roop hebben hun aandacht gewijd aan de frequentiekaracteristiek van de overdracht van bron tot waarnemer. Een dergelijke frequentiekaracteristiek is meestal zeer ingewikkeld (fig. 33).

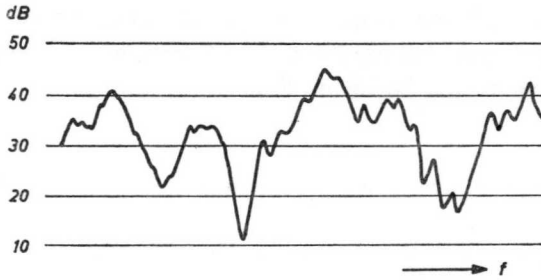


Fig. 33. Gedeelte van een frequentiearakteristiek van een zaal.

De eigenschappen van deze frequentiearakteristiek kan men nu definiëren met een grootheid F_ν — de frequency-irregularity — en wel

$$F_\nu = \frac{\sum (P_{\max} - P_{\min})}{\Delta f} \quad (5)$$

Deze grootheid is dus gelijk aan de som van de maxima minus de som van de minima in een bepaald frequentie-interval, gedeeld door de breedte van dit interval. F_ν kan dus nog afhankelijk van de frequentie zijn. Furrer, een Zwitsers akoesticus, leidde hieruit een grootheid D_ν af welke hij de diffusiteit noemt en die gedefinieerd wordt door

$$D_\nu = F_\nu / N \quad (6)$$

d.w.z. de waarde van F_ν , gedeeld door het aantal pieken dat in het beschouwde interval van de frequentiearakteristiek aanwezig is.

Bij de keuze van grootheden als F_ν en D_ν gaat men er van uit dat de grillige frequentiearakteristiek die men wil beschrijven, ontstaan is door de resonanties welke in de zaal aanwezig zijn. Daar de pieken in de frequentiearakteristiek mogelijkerwijze overeenkomen met zulke resonanties geven de waarden van F_ν en D_ν informatie over de scherpte en het aantal van zulke resonanties. Men kan echter aantonen dat dit slechts waar is beneden een bepaalde grensfrequentie die bepaald wordt door de grootte van de zaal. Boven deze waarde zijn er zoveel eigenresonanties en liggen deze zo dicht bij elkaar dat zij niet meer onderscheidbaar zijn. De pieken en de frequentiearakteristiek ontstaan dan slechts door de statistische fluctuatie bij de sommatie van willekeurig verdeelde resonanties. Men kan nu afleiden dat in dit geval geldt:

$$F_\nu = 1,4 T \text{ dB-s}, \quad (7)$$

waarin T de nagalmtijd is.

F_v geeft dus alleen informatie over de nagalmtijd.

Eerst beneden de genoemde grenswaarde zal de waarde van F_v hiervan afwijken en overgaan in de waarde die Bolt en Roop berekend hebben.

b) Richtingsdiffusiteit en duidelijkheid

Zoals reeds vermeld is, kan men bij het onderzoeken van de akoestische eigenschappen van een ruimte ook uitgaan van begrippen uit de geometrische akoestiek. Bij zulke beschouwingen zal men vooral de richting, het niveau en de aankomsttijd van de diverse reflecties bestuderen. Hierbij treedt echter weer de moeilijkheid op, waarop wij telkens stuiten bij onderzoekingen omtrent de akoestiek van ruimten. Het aantal te beschouwen verschijnselen (hier de reflecties) is zo groot dat men deze niet afzonderlijk kan bestuderen maar dat men zijn toevlucht moet nemen tot statistische analyses.

Door Thiele zijn hiervoor nu de begrippen richtingsdiffusiteit en duidelijkheid ingevoerd. Onder richtingsdiffusiteit verstaat men dan een getal, dat aangeeft hoe gelijkmatig de energietoevoer in een bepaald punt over de ruimte verdeeld is. De richtingsdiffusiteit in een volledig diffuus geluidsveld (bijv. in een nagalmkelder) bedraagt dan 100 %; in een reflectievrije ruimte daarentegen vinden we voor de richtingsdiffusiteit de waarde nul. De richtingsdiffusiteit op een bepaalde plaats in de zaal kan men meten, door op het podium een geluidsbron op te stellen die een continue wobbeltoneel uitzendt en dan met een richtingsgevoelige microfoon de bijdragen uit de diverse richtingen tot de geluidsdruk in dit punt te meten. Voor een op deze wijze gedefinieerde en gemeten richtingsdiffusiteit vindt men in zalen waarden variërend tussen 10 en 50 %. Een bijkomstig voordeel overigens van de keuze van deze grootte is, dat men aan de hand van optische metingen aan modellen een zeer redelijke indruk krijgt van de te verwachten richtingsdiffusiteit bij het ontwerpen van zalen.

De tweede door Thiele ingevoerde grootte, de duidelijkheid, wordt gemeten met korte geluidsimpulsen. Men kan dan gemakkelijk nagaan, hoeveel procent van de totaal waargenomen geluidsenergie binnen 50 ms. na het eerst aankomende geluid bij de waarnemer arriveert. Dit getal noemt men nu de duidelijkheid. De waarde van 50 ms is natuurlijk altijd min of meer arbitrair; zij is gekozen op grond van de waarneming van Haas, dat reflecties binnen dit tijdsbestek meestal nauwelijks de richtingsindruk beïnvloeden en schijnbaar alleen de luidheid van het directe geluid verhogen. In zalen vindt men voor de duidelijkheid waarden

tussen 50 en 90 %. Hoge waarden van de duidelijkheid in een zaal doen meestal een goede spraakverstaanbaarheid verwachten.

Bij het ontwerpen van zalen kan men de nagalmtijd vrij nauwkeurig vooraf berekenen. De diffusiteit en de duidelijkheid kan men min of meer bepalen aan de hand van modelproeven. Het is echter moeilijk getallen te geven voor de optimale waarden van nagalm, diffusiteit en duidelijkheid. Men heeft wel eens voorgesteld, zalen zo te proportiioneren dat het produkt van duidelijkheid en diffusiteit maximaal is. De keuze van de waarde van de diffusiteit en duidelijkheid hangt evenals de waarde van de nagalmtijd af van het doel van de te bouwen ruimte; bovendien speelt de individuele smaak van de ontwerper en de dan geldende mode uiteraard ook een niet te verwaarlozen rol.

IV-4 Kunstmatige nagalm en ambiofonie

In de voorafgaande paragrafen hebben wij de grootheden nagegaan die de aard van de akoestiek van een bepaalde ruimte bestemmen. Het is in principe dan ook mogelijk bij het ontwerpen van een zaal een bepaalde akoestiek mee te ontwerpen. Ook kan men nagaan welke veranderingen in de akoestische eigenschappen van een ruimte te verwachten zijn bij verbouwen of moderniseren. Zoals wij gezien hebben kan men van optimale akoestische eigenschappen in het algemeen niet spreken. Het gebruiksdoel van de ruimte bepaalt immers in hoogste aanleg dit optimum. Zo zal men bij spraak in het algemeen een vrij korte, voor muziek een vrij lange nagalmtijd prefereren. In principe kan men dan ook een zaal niet op bevredigende wijze voor beide doeleinden gebruiken. Nu zal het echter vooral in kleinere plaatsen economisch niet verantwoord zijn twee zalen te bouwen en zal men zich dus met één zaal moeten behelpen. Uiteraard rijst dan de vraag, op welke wijze deze zaal akoestisch verzorgd moet worden: als theater of als concertzaal of als iets wat voor beide doeleinden niet al te slecht maar ook niet al te best is.

Een zaal met lange nagalmtijd onderscheidt zich van een overigens overeenkomstige met korte nagalmtijd hierdoor, dat de reflecties in veel mindere mate geabsorbeerd worden en dat er zodoende gedurende veel langere tijd reflecties optreden voordat het geluid beneden de waarnemingsdrempel is gedaald. In principe zou men dan ook de nagalmtijd van een gedempte zaal kunnen vergroten door op een of andere wijze kunstmatig extra reflecties toe te voegen aan het totaal geluid. Dit nu blijkt elektro-akoestisch zeer goed mogelijk.

Men kan het geluid bijv. van een orkest met microfoons opnemen en op een magnetische drager registreren en dit geregistreerde geluid een korte tijd later in de zaal weergeven. Op deze wijze kan men kunstmatige reflecties vormen. Men kan dit systeem nu uitbreiden tot een groot aantal vertragingen en een groot aantal luidsprekers. De op deze wijze verkregen kunstmatige reflecties worden bijna willekeurig over de zaal verdeeld. De beperking ligt hierin dat men er uiteraard voor moet zorgen dat nergens in de zaal een kunstmatige reflectie de toehoorders eerder bereikt dan het directe geluid van het podium. Een andere voorwaarde is nog dat de eerst-aankomende reflectie de toehoorder binnen 50 ms na aankomst van het directe geluid moet bereiken daar anders de kans op een echo te groot wordt.

Uiteraard zal men trachten het aantal weergeefkoppen zo beperkt mogelijk te houden; anderzijds wil men de mogelijkheid hebben om een zeer lange nagalmtijd te verwezenlijken. Aan beide voorwaarden kan nu voldaan worden door slechts een beperkt aantal koppen te nemen en de laatste hiervan weer terug te koppelen naar de opnamekop. Door de grootte van de terugkoppeling te regelen kan men dan de nagalmtijd naar verkiezing instellen.

Behalve deze terugkoppeling is er nog een tweede, niet gewenste terugkoppelweg aanwezig. Luidsprekers en microfoons bevinden zich namelijk in dezelfde ruimte. Door gebruik te maken van gerichte microfoons en een verstandige opstelling te kiezen kan men deze terugkoppeling onder controle houden.

Deze wijze van nagalmdistributie welke in verschillende zalen wordt toegepast, is ook te gebruiken bij weergave van geregistreerde muziek. Uiteraard laat men dan de microfoon vervallen en sluit de weergever (magnetofon, platenspeler) ineens aan op de ingang van het nagalmaparaat. Met de terugkoppeling kan men de nagalmtijd regelen en met de opstelling van de luidsprekers de diffusiteit. Nagalmtijd en diffusiteit zijn dan onafhankelijk instelbaar wat bij natuurlijke galm niet mogelijk is.

Deze wijze van weergave, ambiofonie genaamd, blijkt bijzonder bevredigend te zijn. Voor huiskamergebruik zal men uiteraard de inrichting vereenvoudigen tot bijv. 1 of 2 vertragingsskanalen, maar ook dan blijkt de winst in weergavekwaliteit aanzienlijk. Dit is niet zo verwonderlijk. De beste Hi-Fi weergave kan niet beter zijn dan de reproductie door een gat in de muur van een concertzaal ter grootte van een luidsprekerconus. Eerst door de toevoeging van een grote hoeveelheid indirect geluid van alle richtingen kan men de luisteraar de illusie geven werkelijk bij de uitvoering aanwezig te zijn.

APPENDIX I

Over het mechanisme voor richtingshoren

In de voorafgaande hoofdstukken hebben wij ons hoofdzakelijk bezig gehouden met de fenomenologie van het richtingshoren, de stereofonische waarneming en het ondervinden van de akoestiek van omsloten ruimten. In zekere zin echter is een dergelijke behandeling van deze onderwerpen min of meer onbevredigend, daar zij zich beperkt tot de verschijnselen als zodanig en slechts nauwelijks antwoord kan geven op de vraag hoe deze verschijnselen met elkaar verband houden. Wil men deze vraag op bevredigende wijze beantwoord zien, dan is het noodzakelijk zich te verdiepen in de werkingswijze van het gehoor en de samenwerking tussen beide oren. Nu is echter de kennis hieromtrent zeer onvolledig; dit betekent dan ook dat een verklaring van het richtingshoren voorlopig alleen op basis van hypothesen mogelijk is en zodoende zeer speculatief.

In fig. 8 hebben wij een mogelijke opbouw van het richtingsgehoor geschetst. In het hierna volgende zal dit model nader uitgewerkt worden en getoetst aan de fenomenologie van het richtingshoren.

a) Beschrijving van een richtingszoeker

Bij het ontwerpen van een model zal men trachten het gedrag hiervan zo goed mogelijk te laten overeenkomen met het gedrag van het na te bootsen object. Een model van het richtingsgehoor zal dan ook gevoelig moeten zijn voor tijds- en niveauverschillen tussen de beide ingangen en in staat zijn deze verschillen in een richtingsindruk te vertalen. Andere voorwaarden worden gegeven door de eis, dat dit model het geluid van een aantal met elkaar gecorreleerde bronnen moet kunnen combineren tot één richtingsindruk zoals bij stereofonie plaatsvindt, of tot een ruimtelijke indruk zoals bij nagalm. Verder mag men verlangen dat het gedrag van het model beantwoordt aan de onderzoeken die in II-2 en II-3 beschreven zijn d.w.z. het model moet gebruik maken van piekwaarden bij de bepaling van de intensiteit, en de inzet van een toon moet grote invloed hebben op de richtingsgewaarwording voor de hele toon. Ook kan men als eis stellen dat de essentiële elementen van dit model niet in strijd zijn met erkende fysiologische gegevens van het

gehoor. Tenslotte lijkt het voor de hand liggend te verlangen, dat men aan alle hierboven omschreven eisen kan voldoen zonder in talrijke ingewikkelde constructies te vervallen.

Bij het schema in fig. 8 en 9 gegeven, hebben wij aangenomen, dat in beide oren het aangeboden signaal in een aantal frequentiebanden gesplitst wordt en dat voor elke frequentieband een richtingszoeker aanwezig is. Bij het natuurlijke richtingshooren zullen de aan de twee oren aanwezige signalen meestal in het zelfde frequentiegebied liggen. Het tijdsverschil tussen beide oren kan dan hoogstens 0,7 ms bedragen en het door de geluidsbron uitgestraalde geluid zal binnen dit tijdsbestek waarschijnlijk niet volledig van samenstelling veranderen. In eerste benadering zou men dan ook de frequentieanalyse die plaatsvindt, kunnen verwaarlozen en zich beperken tot een richtingsgehoor dat slechts uit een richtingszoeker bestaat die direct met de ingangen verbonden is.

In ons model bevat zo'n richtingszoeker twee vertraginglijnen met een vertragingstijd van 2τ s; de ene is verbonden met het linkeroor en de andere met het rechter. Beide lijnen zijn onderling verbonden door een groot aantal kiezers (fig. 34). Deze kiezers hebben de eigenschap dat

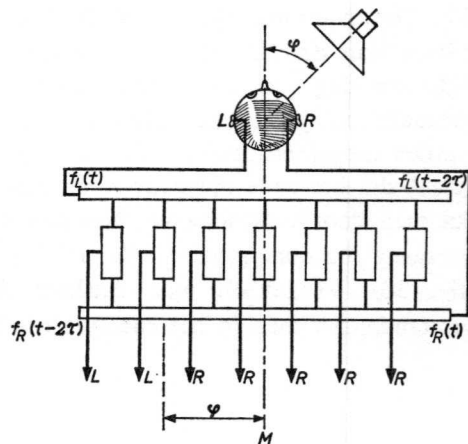


Fig. 34. Symmetrisch model voor richtingshooren.

zij, hoewel linker en rechter signaal ontvangend, slechts één van hen verder leiden. In het algemeen zal het eerstaankomende signaal verder geleid worden, tenzij het niveau van het andere een van het tijdsverschil afhankelijk bedrag hoger is dan het niveau van het eerste. De plaats waar de overgang plaatsvindt tussen linker signaal doorlaten en rechter signaal doorlaten geeft een aanduiding van de richting.

Men kan zich echter voorstellen dat het moeilijk is deze overgang

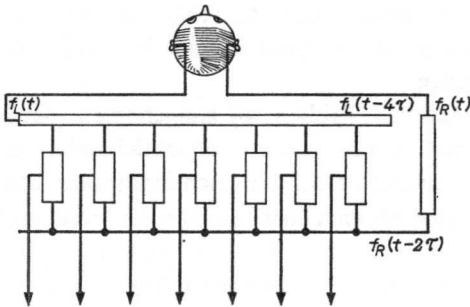


Fig. 35. Onsymmetrisch model voor richtingshoren.

te constateren, indien toevallig linker- en rechtersignaal gelijk zijn. Het heeft daarom zin de kiezers onsymmetrisch te maken, in die zin dat ze wel beide signalen ontvangen maar alleen het rechtersignaal kunnen verder leiden of helemaal niets. De aanwijzing van de richting wordt dan gegeven door de overgang tussen rechter signaal doorlaten en niets doorlaten. Verder is het model nog te vereenvoudigen door één der vertragslijnen met verdeelde vertraging te vervangen door één, waarbij een vertraging van 2τ plaatsvindt voor de aansluiting aan de kiezers, en de vertragingstijd van de andere lijn te verdubbelen (fig. 35). De onderlinge tijdsverschillen tussen beide signalen aan een kiezer blijven dan dezelfde als in het oorspronkelijke model. Daar echter de tijdsvertraging voor het signaal van het rechteroor in een unit is ondergebracht en plaatsvindt alvorens de rechtersignalen aan de kiezers worden toegevoerd, zullen alle rechtersignalen die door de kiezers verder geleid zijn hetzelfde tijdspatroon en dezelfde vorm bezitten. Dit betekent, dat men door verschilmeting bereiken kan dat alleen het signaal bij de overgang die oorspronkelijk de richting markeerde, waargenomen wordt (fig. 36). Verdubbelt men tenslotte dit systeem (fig. 37) met dien verstande, dat men in het ene systeem het rechter signaal laat uittreden

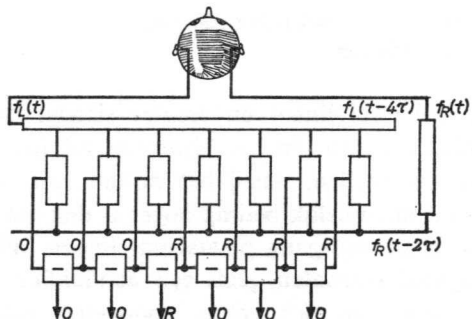


Fig. 36. Onsymmetrisch model voor richtingshoren.

en in het andere het linker, dan is het geheel weer symmetrisch. Beide systemen zullen dezelfde aanwijzing geven; de richting is gedefinieerd. Men heeft echter een linker- en een rechtersignaal overgehouden die nog steeds dezelfde onderlinge tijds- en niveauverschillen bezitten als de oorspronkelijke door het oor ontvangen signalen. Deze signalen kunnen dan ook alsnog gebruikt worden voor een richtingsbepaling of -controle door middel van hoofdbewegingen etc.

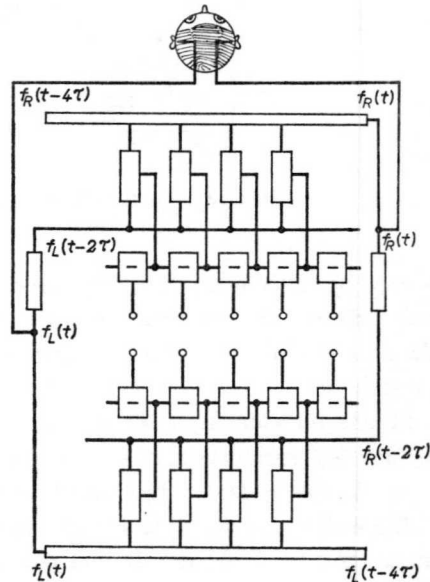


Fig. 37. Uitgebreid symmetrisch model voor richtingshoren.

Voor een beter begrip omtrent de werking van het hier gegeven model heeft het zin een elektrisch vervangingschema te ontwerpen. Een schema van een kiezer is getoond in fig. 38. Laten wij aannemen dat het rechter signaal het eerst de kiezer bereikt. Dit signaal wordt gelijkgericht door de diode D_{R1} en vervolgens versterkt door de gelijkspanningsverschilversterker A_R . De uitgangsspanning van deze versterker wordt wederom gelijkgericht en omgezet in een gelijkspanning over de condensator C_{R1} . Deze gelijkspanning wordt via het integrerend netwerk $R_{R2}-C_{R2}$ en de diodes D_{R3} en D'_{R3} naar de weerstanden R_{L1} en R'_{L1} gevoerd. Daardoor zal de diode D_{L1} geblokkeerd worden en wanneer nu het linkersignaal aankomt zal het deze diode niet kunnen passeren. Daardoor kan dit signaal de diode D_{L2} niet bereiken en zal de diode D_{R1} open blijven. Het gelijkgerichte rechtersignaal blijft

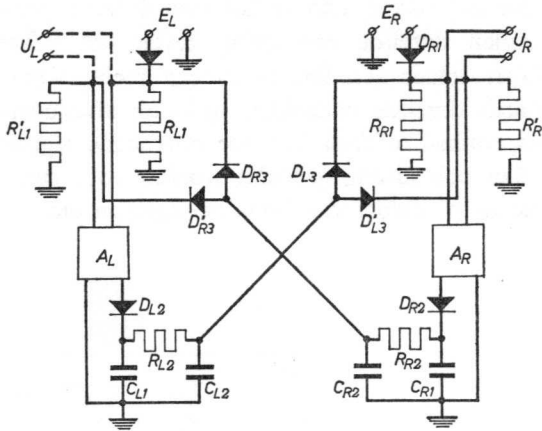


Fig. 38. Elektrisch analogon van een kiezer.

aanwezig op de uitgang U_R . Wanneer het linker signaal als eerste arriveert gebeurt iets soortgelijks, met dien verstande uiteraard dat de diode D_{R1} geblokkeerd wordt en er dus geen signaal aan de ingang U_R verschijnt.

Laat ons nu aannemen dat het linker signaal wel het eerst aankomt maar dat het rechtersignaal een grotere amplitude bezit. Uiteraard zal ook nu de diode D_{R1} geblokkeerd worden maar dit vergt een zekere tijd afhankelijk van de tijdconstante van het netwerk $R_{L2}-C_{L2}$. Er zijn nu drie situaties denkbaar: In het eerste geval zal de gelijkspanning op R_{R1} groter zijn dan de topwaarde van het rechtersignaal aan de ingang. Dan blijft de diode D_{R1} gesloten en wij hebben een situatie vergelijkbaar met het vorige voorbeeld. In het tweede geval zal de topwaarde wel groter zijn en zodoende de diode D_{R1} passeren. Dit leidt dan uiteindelijk tot een gelijkspanning op R_{L1} en R'_{L1} , blokkering van de diode D_{L1} en het omklappen van de balans ten voordele van het rechter signaal. In de derde situatie zal de topwaarde van het rechter signaal wel voldoende groot zijn om de diode D_{R1} te passeren, maar niet voldoende om de balans te doen omklappen. Er stelt zich een evenwichtstoestand in — uiteraard labiel — waarbij zowel aan U_L als U_R signaal verschijnt. In feite zal deze situatie niet blijvend optreden vanwege het labiele karakter, maar zij geeft een handige mathematische definitie voor de plaats, waar de overgang die de richting aanwijst, zal optreden.

Een richtingszoeker nu bestaat uit een groot aantal van deze kiezers. Daar de werking van de kiezers op effecten berust, die een gevolg zijn

van piek- of topdetectie zal het gehele model dus principieel op de piekwaarden van de aangeboden signalen reageren. Wanneer het aan te bieden signaal het eerst aan het rechteroor aankomt, zullen een groot aantal kiezers het rechtersignaal uitkiezen en naarmate het tijdsverschil groter wordt zal ook dit aantal stijgen. Eenzelfde effect treedt op, wanneer de signalen aan beide oren gelijktijdig arriveren maar het niveau aan het rechteroor hoger is. Men kan gemakkelijk inzien dat niveau- en tijdsverschillen bij gelijktijdig optreden zullen samenwerken, wanneer zij in gelijke zin optreden en elkaar tegenwerken wanneer zij in tegengestelde zin optreden.

Wanneer het model een signaal aangeboden krijgt zal het de richting hiervan bepalen aan de hand van de optredende niveau- en tijdsverschillen. Hiervoor is een zekere tijd nodig, die bepaald wordt door de tijdsconstanten van het model. Daarna echter is de richting min of meer definitief vastgelegd; een verplaatsing van de geluidsbron heeft dan nog maar weinig invloed op de eenmaal gekozen richting, vooropgesteld dat deze verplaatsing niet al te groot is. Dit betekent dat het model in feite de richting kiest tijdens en direct na de inzet; de richting van de inzet van een toon heeft dus grote invloed op de richtingsgewaarwording van de totale toon.

In het algemeen zal het hier beschreven model niet kunnen onderscheiden of het aangeboden signaal van één bron afkomstig is of dat meer geluidsbronnen verantwoordelijk zijn voor de geluidsdruk aan de beide oren. Dit betekent dat dit model in principe een stereofonische aanbieding kan vertalen in een éénduidige richtingsindruk.

Ook kan men de invloed van nagalm nagaan. Wanneer een reflectie verwerkt moet worden door een model dat nog bezet is met het directe geluid zal het van deze reflectie niet de richting kunnen vaststellen. Het lijkt echter wel mogelijk, dat onder invloed van deze reflectie de oorspronkelijke richtingsindruk over een paar graden in de richting van deze reflectie opschuift. Bij een groot aantal reflecties mag men dan verwachten, dat de richtingsindruk voortdurend een beetje heen en weer beweegt. Dit zou kunnen overeenkomen met de waarneming, dat een geluidsbron in een galmende ruimte groter lijkt te zijn dan zijn werkelijke afmetingen. Ook mag men verwachten, dat er bij zo'n heen en weer bewegen van de richtingsindruk meer zenuwbanen gebruikt worden voor het overbrengen van de informatie van het gehoormechanisme naar de hersenen; dit zou dan weleens de reden kunnen zijn waarom men in het algemeen een zekere nagalm wel prettig vindt.

b) Enige berekeningen aan de kiezers

Men kan het gedrag van het elektrisch vervangingsschema van een kiezer mathematisch nagaan. Het schema van een kiezer is te vereenvoudigen tot figuur 39. Laten wij aannemen dat de omhullende van de signalen aan de linker- en rechteringang van deze kiezer stapfuncties zijn (fig. 40). De piekwaarden van de aangeboden signalen stellen

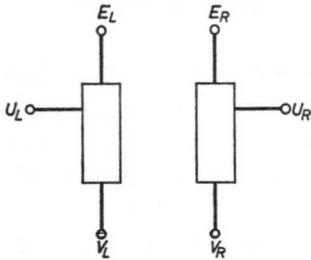


Fig. 39. Vereenvoudigd schema van het elektrisch analogon van een kiezer.

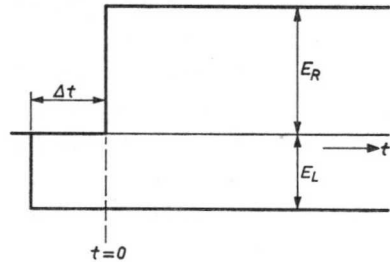


Fig. 40. Omhullenden van het rechter (E_R) en het linker (E_L) signaal aan de ingangen van een kiezer.

wij voor door respectievelijk E_L en E_R ; V_L en V_R stellen de spanningen voor over de condensators C_{L2} en C_{R2} . De piekwaarden aan de uitgangen U_L en U_R stellen wij eveneens voor door U_L en U_R . Het blokkeren van de diodes D_{R1} en D_{L1} door respectievelijk V_L en V_R is dan te omschrijven met

$$E_L > V_R \quad U_L = E_L - V_R \quad (8a)$$

$$E_L < V_R \quad U_L = 0 \quad (8b)$$

en

$$E_R > V_L \quad U_R = E_R - V_L \quad (9a)$$

$$E_R < V_L \quad U_R = 0. \quad (9b)$$

Laat γ de versterking door de versterkers A_L en A_R zijn. De tijdsafhankelijkheid van de spanningen V_L en V_R is tamelijk gecompliceerd door de aanwezigheid van de diodes D_{L2} en D_{R2} en de capaciteiten C_{L1} en C_{R1} . Wij vereenvoudigen de berekening door de spanningen over C_{L1} en C_{R1} te beschouwen als de omhullenden van U_L en U_R , vermenigvuldigd met de versterkingsfactor γ . Verwaarloost men nu nog de invloed van de weerstanden R_{R1} , R'_{R1} , R_{L1} en R'_{L1} dan zijn V_L en V_R enkel nog afhankelijk van de grootte van resp. U_L en U_R en de tijd-

constante van de integrerende netwerken $R_{L^2}-C_{L^2}$ en $R_{R^2}-C_{R^2}$. V_L en V_R zijn dan te beschrijven door

$$\gamma U_L = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dV_L}{dt} + V_L \quad (10a)$$

en

$$\gamma U_R = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dV_R}{dt} + V_R \quad (10b)$$

waarbij

$$\alpha = \frac{1}{R_{L^2} \cdot C_{L^2}} = \frac{1}{R_{R^2} \cdot C_{R^2}}. \quad (11)$$

Wanneer men de voorwaarden 8b en 9b verwaarloost kan het gegeven probleem gemakkelijk opgelost worden. Wanneer echter de kiezer het linkersignaal zal gaan uitkiezen dan zal deze berekening niet geldig zijn aangezien dan V_L wel groter is dan E_R . In het andere geval als het rechttersignaal uitgekozen wordt zal V_R groter zijn dan E_L en de berekening dus eveneens ongeldig. Alleen in het geval dat de kiezer geen keus kan maken, zal de situatie gegeven door 8b en 9b niet optreden en mogen wij de voorgestelde procedure volgen. Gelukkig is dit nu juist de kiezer die ons interesseert daar zijn plaats aan de vertragslijn overeenkomt met de waargenomen richting. De berekening kan nu teruggebracht worden tot het probleem, onder welke voorwaarden voor E_L en E_R nu juist dit labiel evenwicht, dus een positieve waarde van U_L en U_R optreedt.

Voor dit geval kan men de differentiaalvergelijking opstellen; combinatie van 8a met 10b levert op

$$\gamma E_L - \gamma V_R = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dV_L}{dt} + V_L. \quad (12a)$$

Op soortgelijke wijze is te vinden

$$\gamma E_R - \gamma V_L = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dV_R}{dt} + V_R. \quad (12b)$$

Dit kan herleid worden tot de differentiaalvergelijkingen

$$\frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{d^2 V_L}{dt^2} + \frac{2}{\alpha} \cdot \frac{dV_L}{dt} + V_L(1 - \gamma^2) = -\gamma^2 E_R + \gamma E_L \quad (13a)$$

en

$$\frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{d^2 V_R}{dt^2} + \frac{2}{\alpha} \cdot \frac{dV_R}{dt} + V_R(1 - \gamma^2) = -\gamma^2 E_L + \gamma E_R \quad (13b)$$

De algemene oplossingen zijn

$$V_L = K_1 \exp(p_1 t) + K_2 \exp(p_2 t). \quad (14a)$$

en

$$V_R = K_3 \exp(p_1 t) + K_4 \exp(p_2 t), \quad (14b)$$

Hierin is

$$p_1 = \alpha(-1 + \gamma) \quad (15a)$$

en

$$p_2 = \alpha(-1 - \gamma). \quad (15b)$$

Laten wij nu aannemen dat

$$E_R = K \cdot E_L \quad (16)$$

Wanneer E_R en E_L constant blijven worden V_R en V_L ook constant en bereiken na oneindig lange tijd de waarden

$$V_L = \gamma U_L \quad (17a)$$

en

$$V_R = \gamma U_R \quad (17b)$$

De bijzondere oplossing wordt dan beschreven door

$$V_L = A \cdot E_L \quad (18a)$$

en

$$V_R = B \cdot E_L \quad (18b)$$

Hierin zijn

$$A = \frac{\gamma - \gamma^2 K}{1 - \gamma^2} \quad (19a)$$

en

$$B = \frac{\gamma K - \gamma^2}{1 - \gamma^2}. \quad (19b)$$

Wanneer wij dit combineren met 14a en 14b vinden wij na enige herleiding

$$V_L = K_1 \exp(p_1 t) + K_2 \exp(p_2 t) + A E_L \quad (20a)$$

$$V_R = K_3 \exp(p_1 t) + K_4 \exp(p_2 t) + B E_L \quad (20b)$$

$$U_L = K_1 \exp(p_1 t) - K_2 \exp(p_2 t) + \frac{A}{\gamma} E_L \quad (20c)$$

$$U_R = K_3 \exp(p_1 t) - K_4 \exp(p_2 t) + \frac{B}{\gamma} E_L \quad (20d)$$

De constanten worden bepaald uit de randvoorwaarden. Wij nemen aan, dat het rechtersignaal bij $t=0$ begint en het linkersignaal een tijd Δt eerder. Gedurende het tijdsbestek $(-\Delta t) < t < 0$ zal de waarde van U_L constant zijn en gelijk aan E_L . V_L kan gedurende die tijd beschreven worden door

$$V_L = \gamma E_L [1 - \exp\{-\alpha(t + \Delta t)\}]. \quad (21)$$

Voor $t = 0$ vinden wij dan als randvoorwaarden

$$V_R = 0 \quad (22a)$$

$$V_L = \gamma \delta E_L, \quad (22b)$$

$$U_L = E_L \quad (22c)$$

$$U_R = E_R - V_L = (K - \gamma \delta) E_L. \quad (22d)$$

Hierin is

$$\delta = 1 - \exp(-\alpha \Delta t), \quad (23)$$

Voor de constanten vinden we nu

$$K_1 = -K_3 = \frac{E_L \gamma}{2(\gamma - 1)} (1 - K + \gamma \delta - \delta) \quad (24a)$$

en

$$K_2 = K_4 = \frac{E_L \gamma}{\gamma + 1} (-K - 1 + \gamma \delta + \delta). \quad (24b)$$

Voor V_L , V_R , U_L en U_R (20a, b, c, d) geeft dit

$$V_L = K_1 \exp(p_1 t) + K_2 \exp(p_2 t) + A E_L \quad (25a)$$

$$V_R = -K_1 \exp(p_1 t) + K_2 \exp(p_2 t) + B E_L \quad (25b)$$

$$U_L = K_1 \exp(p_1 t) - K_2 \exp(p_2 t) + \frac{A}{\gamma} E_L \quad (25c)$$

$$U_R = -K_1 \exp(p_1 t) - K_2 \exp(p_2 t) + \frac{B}{\gamma} E_L. \quad (25d)$$

Hierin zijn

$$p_1 = \alpha(-1 + \gamma) \quad (15a)$$

en

$$p_2 = \alpha(-1 - \gamma), \quad (15b)$$

γ is de versterking door de versterkers A_L en A_R ; γ is groter dan 1. Dit betekent dat p_1 positief is en p_2 negatief. Nu hebben wij alleen belangstelling voor de kiezer waarbij een evenwicht optreedt, aangezien door die kiezer de richting aangewezen wordt. De evenwichtstoestand wordt bepaald door de voorwaarde dat V_L , V_R , U_L en U_R positief zijn en blijven. Daar p_1 positief is wordt $\exp(p_1 t)$ oneindig bij oneindig lange tijd. Noodzakelijk is derhalve de voorwaarde dat $K_1 = 0$ om een evenwichtstoestand te bereiken.

$$K_1 = 0 \quad (26a)$$

ofwel

$$1 - K + \gamma\delta - \delta = 0 \quad (26b)$$

Na enige herleiding vinden we tenslotte

$$a\Delta t = \ln \frac{\gamma - 1}{\gamma - K} \quad (27)$$

Deze vergelijking geeft het verband tussen Δt en K d.w.z. het verband tussen het tijdsverschil en de intensiteitsverhouding aan de kiezer waar evenwicht optreedt. Met formule 27 hebben wij dan ook de kiezer gedefinieerd die de richting aanwijst.

c) De richtingsbepaling

Bij het ontwerp van een model voor richtingsshoren zijn wij uitgegaan van verdragingslijnen die onderling met kiezers verbonden waren. Daarna hebben wij dit model gewijzigd, maar dit heeft de aan de kiezers optredende tijds- en niveauverschillen niet veranderd. Terugkeer tot het schema van fig. 34 vereenvoudigt nu verdere berekening. Deze figuur is te schematiseren tot fig. 41. Laat ons nu aannemen dat een geluid van de rechterzijde komt. Uiteraard bereikt dit geluid dan het linkeroor later dan het rechteroor. Stel dat dit tijdsverschil de waarde δt heeft. Aan de kiezer, waar het evenwicht optreedt zal echter het linkersignaal het eerst aankomen en het rechtersignaal een tijd Δt later. Stellen wij nu verder, dat het evenwicht optreedt aan een kiezer die aangesloten is op het punt X van de verdragingslijnen en dat dit punt X overeenkomt

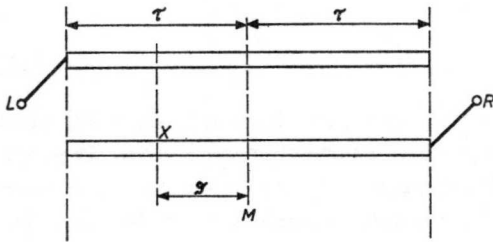


Fig. 41. Berekening van het tijdsverschil tussen de signalen van de kiezer, waar de richting gecodeerd wordt.

net een vertragingstijd ϑ vanuit het midden naar links gerekend. Het punt X komt overeen met de waargenomen richting. Het rechtersignaal heeft een zekere tijd nodig om vanaf het rechteroor het punt X te bereiken. Uit fig. 41 blijkt dat deze tijd gelijk is aan $\tau + \vartheta$. Ook het linkersignaal heeft een zekere tijd nodig om X te bereiken. Deze tijd bedraagt echter slechts $\tau - \vartheta$. Het tijdsverschil ter plaatse X tussen linker en rechter signaal komt dan overeen met

$$\Delta t = t_R - t_L = -\delta t + \tau + \vartheta - \tau + \vartheta = 2\vartheta - \delta t. \quad (28)$$

Wanneer het geluid van de rechterzijde komt zal aan het rechteroor de grootste geluidsdruk heersen, bijv.

$$E_R = K \cdot E_L \quad (16)$$

Combineren wij nu formule 28 met 27 dan levert dit op

$$\alpha(2\vartheta - \delta t) = \ln \frac{\gamma - 1}{\gamma - K}, \quad (29)$$

en na enige herleiding

$$\vartheta = \frac{\delta t}{2} + \frac{1}{2\alpha} \ln \frac{\gamma - 1}{\gamma - K}. \quad (30)$$

Deze formule geeft een verband tussen het tijdsverschil Δt aan de oren, de intensiteitsverhouding K tussen beide oren en de richtingsaanwijzing door het model. Wanneer de geluidsbron zich slechts weinig uit het midden bevindt, zal δt klein zijn en K bijna gelijk aan 1. Dan is formule 30 te vereenvoudigen tot

$$\vartheta = \frac{\delta t}{2} + \frac{N \ln 10}{40\alpha(\gamma - 1)}, \quad (31)$$

waarin N het niveauverschil in dB tussen de signalen aan beide oren is,

gedefinieerd door

$$20^{10} \log K = N \text{ dB} . \quad (32)$$

Het praktische nut van 30 en 31 is echter discutabel daar wij noch het verband tussen ϑ en de subjectieve waarnemingshoek noch de grootte van α en γ kennen. Laten wij aannemen dat voor kleine hoeken ϑ evenredig met de waarnemingshoek is. Formule 31 geeft dan aan dat voor kleine hoeken de hoekuitwijkingen veroorzaakt door het tijdsverschil en door het niveauverschil bij elkaar geteld moeten worden om de totale uitwijking te vinden. Verder kan men uit formule 31 zien dat tijdsverschillen door intensiteitsverschillen in tegengestelde zin gecompenseerd kunnen worden. In de literatuur vindt men opgaven over het aantal dB's die nodig zijn om een zeker tijdsverschil te compenseren. Deze waarden variëren tussen 5 en 16 dB/ms afhankelijk van de aard van het geluid en de luidheid. Vult men deze waarden in formule 31 in dan vindt men dat α ($\gamma-1$) tussen 0,5 en 2 ligt wanneer δt in ms gemeten wordt. Verdere berekeningen over richtingswaarneming zijn zeer speculatief. Het enige wat men kan doen is enige eenvoudige veronderstellingen maken en op bevredigende resultaten hopen.

In fig. 6 zijn de waarden van het tijdsverschil tussen beide oren gegeven als functie van de hoek waaronder het geluid de luisteraar bereikt. Deze waarden komen overeen met δt uit formule 30 en 31. In fig. 3 zijn waarden gegeven voor het niveauverschil. Erg nauwkeurig zullen deze echter niet zijn. Ze zijn berekend door fig. 1 en 2 met elkaar te combineren. Nu hebben wij voor het verkrijgen van formule 30 en 31 ons gebaseerd op het geluidspatroon dat in fig. 40 gegeven is, een geluid dus dat volkomen constant is en dat onmiddellijk na aankomst aan de oren zijn maximale intensiteit bereikt. Men kan dan ook de vraag stellen of dit wel voldoende overeenstemt met het gedrag van spraak om de gegevens uit fig. 3 in formule 30 en 31 in te vullen. Men kan echter aantonen dat voor kleine invalshoeken van het geluid, de vorm van de omhullende van het geluid niet veel invloed heeft op de richtingswaarneming. Het lijkt dan ook wel gerechtvaardigd de waarden van de niveauverschillen uit fig. 3 bij kleine hoeken in formule 30 en 31 toe te passen.

Voor het berekenen van het verband tussen ϑ en subjectieve waarnemingshoek zullen wij ons nu verder beperken tot formule 30. Daartoe moeten aan α en γ specifieke waarden worden toegekend. Deze zijn bepaald op de manier van „trial en error” om naderhand een goede overeenstemming te krijgen met metingen van Haas, Meyer en Schodder.

Op deze wijze vindt men voor $\alpha = 0,45 \text{ ms}^{-1}$ en $\gamma = 2,4$. Gebruikt men deze waarden in formule 30 en vult men dan de waarden voor het tijdsverschil en het niveauverschil uit resp. fig. 6 en 3 voor de waarde van 10 graden in deze formule in dan vindt men het verband tussen ϑ en waarnemingshoek voor deze waarde. Neemt men dan nog tenslotte een evenredigheid aan tussen ϑ en de subjectieve waarnemingshoek dan kunnen uit formule 30 de andere waarden van K berekend worden. Deze zijn gegeven in tabel 2.

ψ	ϑ	δt	K	K
graden	m.sec.	m.sec.	lineair	dB
0	0.00	0.00	1.00	0.00
10	0.21	0.10	1.19	1.50
20	0.42	0.18	1.36	2.67
30	0.63	0.26	1.51	3.58
40	0.84	0.34	1.63	4.24
50	1.05	0.40	1.74	4.81
60	1.26	0.46	1.84	5.30
70	1.47	0.52	1.92	5.67
80	1.68	0.58	1.99	5.98
90	1.89	0.62	2.06	6.28

TABEL 2

Berekende waarden van de intentiteitsverhouding K tussen beide oren als functie van de subjectieve waarnemingshoek.

We zullen nu nog eens nader ingaan op de keuze van α en γ . Daartoe zijn de metingen gebruikt van Haas, Meyer en Schodder die in fig. 31 in grafiekvorm gegeven zijn. Bij deze metingen waren twee luidsprekers stereofonisch opgesteld fig. 42. Aan de luidsprekers werden signalen met een tijdsverschil toegevoerd. Men bepaalde dan het benodigde ni-

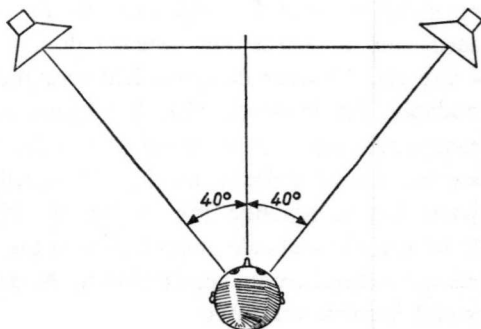


Fig. 42. Opstelling van de luidsprekers bij de metingen van Haas, Meyer en Schodder.

veauverschil om bij een gegeven tijdsverschil de schijnbare geluidsbron midden tussen beide luidsprekers te horen. Het is duidelijk dat ieder oor twee signalen ontvangt, één van de linker en één van de rechter luidspreker. De intensiteit van het geluid aan één oor is dan gelijk aan de som van de intensiteiten die door iedere luidspreker apart aan dat oor worden veroorzaakt. De totale amplitude is dan gelijk aan de vierkantswortel uit de som der kwadraten van de afzonderlijke amplitudes. Dit laatste zal dan ook wel gelden voor de omhullende.

Men kan nu trachten het proces dat zich bij het luisteren naar deze proef afspeelt, in het mathematisch model te imiteren. Wij beperken ons hierbij weer tot stapfuncties voor de omhullenden. Wanneer de luidsprekers onder een hoek van 40 graden zijn geplaatst zal volgens

tabel 2 $\delta t = 0,34$ ms en $K = 1,63$ of $\frac{1}{K} = 0,61$ zijn. De omhullenden

van de signalen aan beide oren zijn dan te berekenen (fig. 43). Hier-

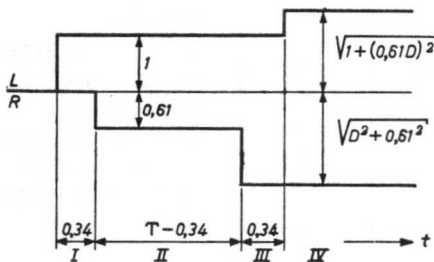


Fig. 43. Omhullende van het linker (L) en rechter (R) signaal aan de ingangen van de kiezer, waar middenindruk aangewezen wordt. T is het tijdsverschil tussen de signalen van beide luidsprekers en D de intensiteitsverhouding hiervan voor een luidsprekeropstelling als in fig. 42.

in is T het tijdsverschil en D de intensiteitsverhouding tussen beide luidsprekers, bij elkaar passend om het geluid in het midden te horen. ϑ komt in fig. 43 niet voor daar ϑ onder die voorwaarde (geluid in het midden) nul is. Men kan dan D bepalen als functie van T . Daartoe moeten de differentiaalvergelijkingen 9a en 9b opnieuw opgelost worden maar nu met de gegevens uit fig. 43 als randvoorwaarden. De waarde van D wordt dan gegeven door de voorwaarde dat dan in deel IV van fig. 43 weer de evenwichtstoestand optreedt. Men kiest nu α en γ zodanig, dat de op de wijze berekende waarden zo goed mogelijk overeenstemmen met de metingen (fig. 44). Hierbij blijkt dat men alleen voor het linker gedeelte uit fig. 31 redelijke overeenstemming kan bereiken. De neergaande tak in fig. 31 blijkt niet te realiseren in het tot nu toe ontwikkelde model. Voorlopig zullen wij dit verschil tussen meting en berekening verwaarlozen. Naderhand zal blijken hoe wij dit verschil kunnen verklaren.

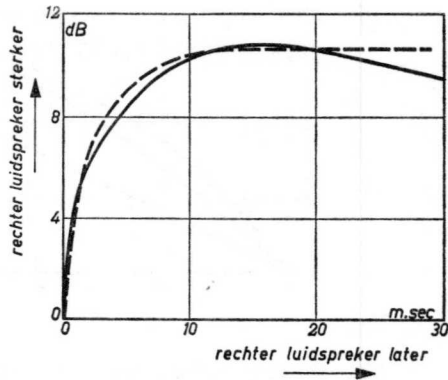


Fig. 44. Berekende (— — —) en gemeten (—) waarden van niveau- en tijdsverschillen bij middenindruk.

Met de nu gevonden waarden voor α , γ en K kan men de richtingswaarneming berekenen bij aanbieding van stereofonische signalen en de uitkomsten vergelijken met de resultaten van metingen hieromtrent. Men moet zich hierbij wel realiseren dat experimenten omtrent richtingswaarneming op twee wijzen uitgevoerd kunnen worden. De waarnemer kan recht vooruit blijven kijken en b.v. met zijn arm de richting aanwijzen fig. 45; hij kan echter ook zijn hoofd in de richting draaien vanwaar hij het geluid meent te horen komen (fig. 46). Het resultaat behoeft in beide gevallen niet hetzelfde te zijn. Wij hebben nu de richtingswaarneming berekend bij een opstelling van luidsprekers gelijk aan die welke bij de metingen uit fig. 22 en 23 gebruikt was. Fig. 47 en 48

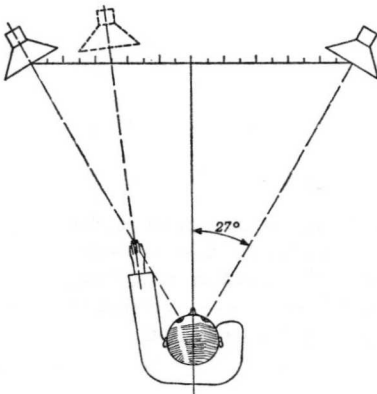


Fig. 45. Richtingsaanwijzing wanneer het hoofd recht vooruit gehouden wordt.

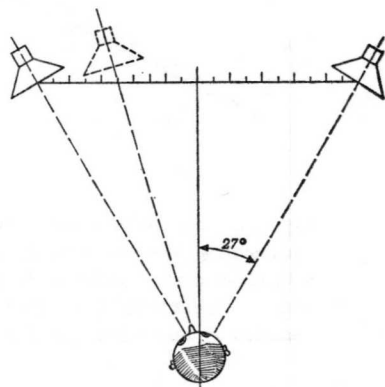


Fig. 46. Richtingsaanwijzing wanneer het hoofd in de richting van de schijnbare geluidsbron gedraaid wordt.

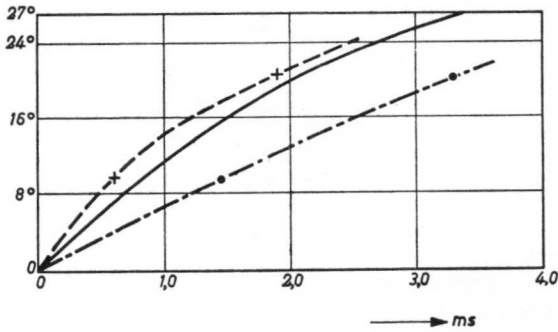


Fig. 47. De invloed van tijdsverschillen op de stereofonische waarneming. — gemeten waarden door De Boer; — — — berekende waarden wanneer de waarnemer zijn hoofd in de richting van de schijnbare bron gedraaid heeft; — · — · — berekende waarden wanneer het hoofd recht vooruit gehouden wordt.

tonen aan dat er redelijke overeenstemming is. Wel blijkt dat de invloed van al dan niet het hoofd bewegen van grote invloed is op de richtingswaarneming bij stereofonie die alleen op tijdsverschillen gebaseerd is.

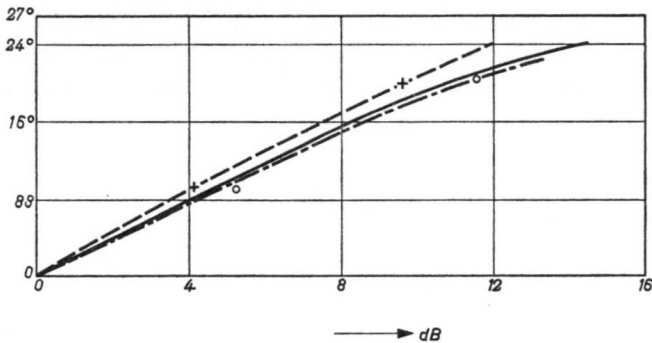


Fig. 48. De invloed van niveaverschillen op de stereofonische waarneming. — gemeten waarden door De Boer; — — — berekende waarden wanneer de waarnemer zijn hoofd in de richting van de schijnbare bron gedraaid heeft; — · — · — berekende waarden wanneer het hoofd recht vooruit gehouden wordt.

d) Selectiviteitsvergroting

In deel II-I-f hebben wij een hypothese opgesteld op welke wijze het gehoor de richting van een aantal geluidsbronnen gelijktijdig zou kunnen vaststellen. Deze hypothese werd geïllustreerd door fig. 8 en 9. Bij deze hypothese wordt aangenomen dat het gehoor de aangeboden signalen in frequentiebanden splitst en dat in elk frequentiegebied de richting bepaald wordt. Het ligt voor de hand om aan te nemen, dat de richtingszoekers uit fig. 8 en 9 overeenkomen met de in de hiervoor-gaande paragraaf beschreven richtingszoekers. De in II-1-f beschreven experimenten tonen aan dat er inderdaad een frequentie-analyse optreedt in het gehoor en het heeft dan ook zin na te gaan waar en hoe deze analyse plaatsvindt.

Von Helmholtz, een fysicus en fysioloog, veronderstelde dat men het basilair membraan in het slakkenhuis mocht beschouwen als een klein harpje met snaren die op bepaalde frequenties afgestemd waren. Het gedrag van een dergelijk apparaat komt min of meer overeen met een multipel filter (fig. 49). Wil men echter op deze wijze alle gehoor-

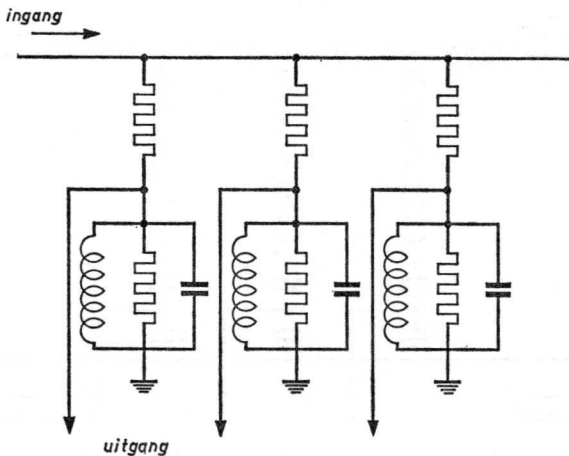


Fig. 49. Multipel filter als analysator.

fenomenen verklaren dan komt men reeds spoedig tot tegenstrijdigheden. In 1943 heeft von Békésy de uitwijkingen van het basilair membraan, gemeten als functie van de frequentie van de aangeboden signalen. Hij kon aantonen dat deze uitwijkingen inderdaad frequentieafhankelijk waren, maar dat er geen scherpe analyse ten gevolge van mechani-

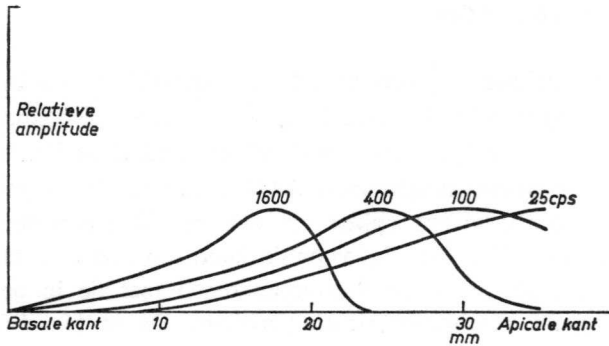


Fig. 50. Relatieve amplitudes van de trilling van het basilair membraan.

sche trillingen optrad. De amplitudeverdeling van de trilling langs het basilair membraan blijkt slechts betrekkelijk weinig af te hangen van plaats op het membraan en frequentie (fig. 50). Het gedrag van het basilair membraan blijkt overeen te komen met een elektrisch filter als in fig. 51.

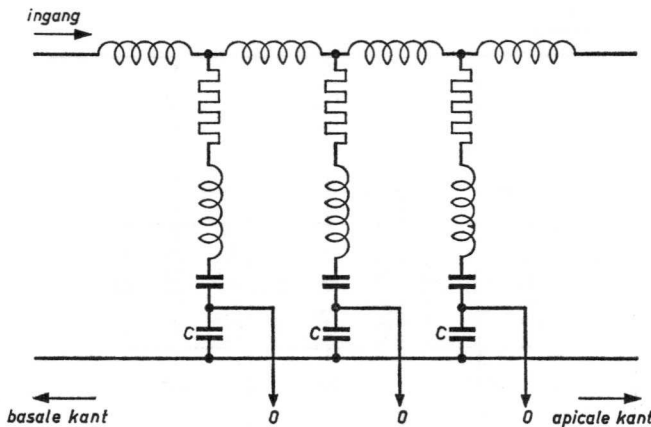


Fig. 51. Elektrisch vervangingschema van het basilair membraan.

Von Békésy heeft echter verondersteld dat de lage selectiviteit van het basilair membraan vergroot wordt door processen die zich in de zenuwen afspelen. De Japanner Tasaki toonde aan dat dit inderdaad gebeurt; de selectiviteit neemt toe gedurende het transport van de signalen vanaf het basilair membraan naar de hogere delen van het gehoor. In fig. 52 is dit gedrag schematisch uitgebeeld; alleen de top van de amplitude-

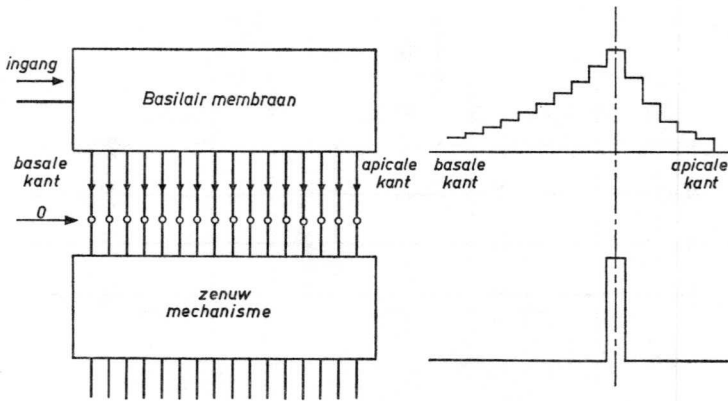


Fig. 52. Schematische voorstelling van de analyse door het basilaire membraan en de selectiviteitsvergroting door de zenuwen.

verdeling over het basilaire membraan wordt gedetecteerd. Uiteraard kan dit alleen plaatsvinden wanneer de amplitudes van de diverse plaatsen van het basilaire membraan met elkaar vergeleken worden. Mol, een Nederlands onderzoeker, heeft gewezen op het belang van de tussen de zenuwen aanwezige doorverbindingen, die een dergelijk gedrag zouden kunnen bewerkstelligen.

Men kan nu trachten niet alleen de mechanische eigenschappen van het basilaire membraan maar ook deze selectiviteitsvergroting door de zenuwen te imiteren door elektrische circuits. Daar ook hier de werking moet berusten op wederzijdse tegenwerking zal zo'n circuit een vrij grote gelijkenis vertonen met het vervangingsschema voor de kiezers bij het richtingshoren. In fig. 53 is een vervangingsschema gegeven voor een selectiviteitsvergroter, waarvan de werking op de doorverbindingen berust. Laten wij aannemen dat de ingang N van het circuit verbonden is met de plaats N van het basilaire membraan. Nu nemen we verder aan dat juist op deze plaats het basilaire membraan zijn grootste uitwijking heeft; voor het vervangingsschema betekent dit dat aan de ingang N de hoogste spanning zal optreden. Deze wisselspanning veroorzaakt een gelijkspanning over de condensator C_N . Deze gelijkspanning is gelijk aan de topwaarde van het wisselspanningssignaal aan de ingang N . Via de diodes D_{+N} , D'_{+N} , D_{-N} en D'_{-N} wordt deze gelijkspanning naar de weerstanden van de naburige systemen R_{N+1} , R'_{N+1} , R_{N-1} en R'_{N-1} gevoerd. Daar nu deze gelijkspanning hoger is dan de topwaarden van de wisselspanningen aan ingangen $N+1$ en $N-1$ (de grootste wisselspanning trad immers aan ingang N op), zijn

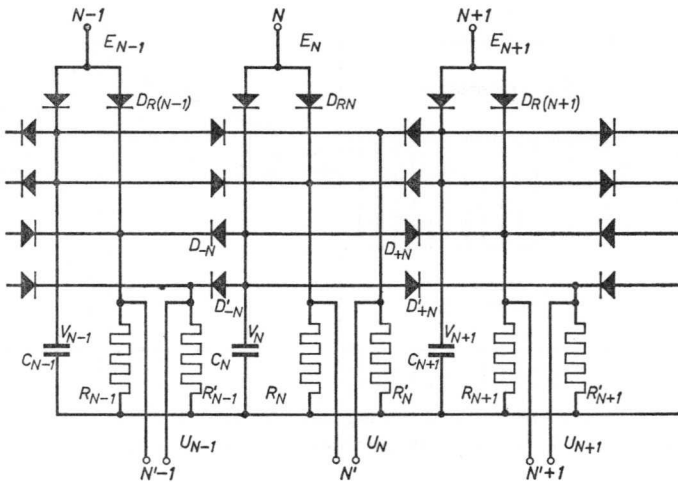


Fig. 53. Elektrisch analoog voor de werking van de selectiviteitsvergroting door de zenuwen.

de diodes $D_{R(N+1)}$ en $D_{R(N-1)}$ volledig geblokkeerd. Zodoende kan er geen signaal naar de uitgangen $N'+1$ en $N'-1$ geleid worden. De gelijkspanningen over de condensators C_{N+1} en C_{N-1} daarentegen zijn lager dan de topwaarde van het wisselspanningssignaal aan de ingang N ; de diode D_{RN} is dan ook niet volledig geblokkeerd. Als gevolg hiervan verschijnt er aan de uitgang N' wel een signaal. Dit signaal komt wat betreft periodiciteit, intensiteit en aankomsttijd overeen met het ingangssignaal aan de ingang N . De naburige uitgangen dragen geen signaal. De selectiviteit lijkt dus toegenomen. In fig. 54 wordt dit nog eens geïllustreerd. E_{N-1} , E_N en E_{N+1} zijn de spanningen aan de ingangen $N-1$, N en $N+1$; V_{N-1} , V_N en V_{N+1} de blokkeringspanningen over de condensatoren C_{N-1} , C_N en C_{N+1} en U_{N-1} , U_N en U_{N+1} de aan de uitgangen $N'-1$, N' en $N'+1$ verschijnende signalen.

e) De Haas - Meyer - Schodder-krommen

In paragraaf c van deze Appendix hebben wij de constanten bepaald die kenmerkend waren voor het gedrag van het daar beschreven model voor richtingshoren. Hierbij werd een gedeelte van de metingen van Haas, Meyer en Schodder gebruikt. De volledige metingen zijn gegeven in fig. 31. De lijn L geeft daar de grenswaarden voor de tijds- en niveauverschillen waarbij alleen de linker luidspreker waargenomen wordt de kromme R de overeenkomstige getallen voor de rechter luidspreker.

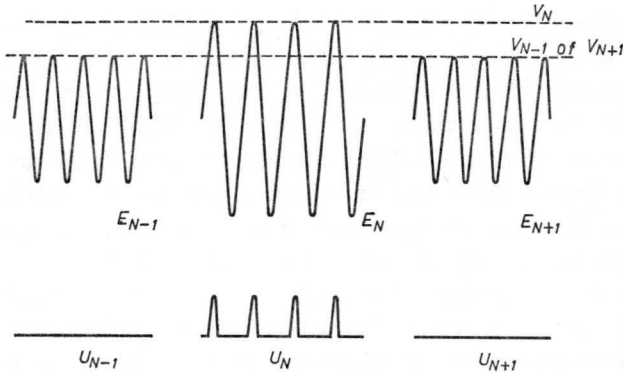


Fig. 54. De invloed van de selectiviteitsvergroting op de overdracht van signalen.

De lijn M geeft de voorwaarden aan, waaronder het geluid midden tussen de luidsprekers gehoord wordt of waaronder beide luidsprekers even luid lijken. De asymptotische waarden voor de niveaoverschillen bij zeer grote tijdsverschillen bedragen ongeveer 32 dB voor de krommen L en R en vanzelfsprekend 0 dB voor de lijn M .

Berekent men echter het verband tussen niveau- en tijdsverschillen voor middenindruk aan de hand van het model dan blijkt de curve M geheel anders te verlopen (fig. 55). De voorwaarden, waaronder alleen de linker of de rechter luidspreker waargenomen wordt kan men nauwelijks berekenen; het is namelijk praktisch onmogelijk aan te geven

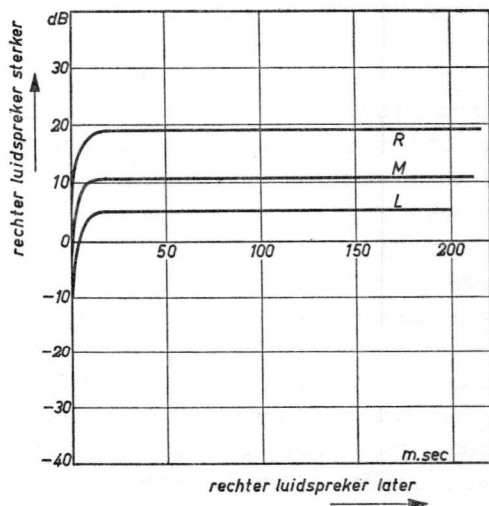


Fig. 55. Het verband tussen niveau- en tijdsverschillen waarbij het model uit paragraaf C de schijnbare bron links, in het midden of rechts waarneemt.

welke plaats van de schijnbare bron door een luisteraar reeds beschouwd wordt als samenvallend met de linker en rechter luidspreker. Het lijkt echter waarschijnlijk dat een dergelijke berekening een resultaat oplevert waarvan de vorm overeenkomt met die welke in fig. 55 door de lijnen L en R aangegeven wordt. Alleen de grootten van de niveauverschillen waarbij de lijnen L en R horizontaal lopen zijn dan nog onbekend.

De vraag ligt voor de hand hoe men nu het verschil tussen de gemeten krommen uit fig. 31 en de berekenden uit fig. 55 zou kunnen verklaren. Daartoe zullen wij de invloed van de frequentieanalyse door het basilair membraan en de daarachter volgende selectiviteitsvergroting in rekening brengen. De selectiviteitsvergroting denken wij ons veroorzaakt door de onderlinge tussenverbindingen en de invloed van ieder deel op zijn naburen. Daardoor zal de selectiviteitsvergroter het signaal verder leiden op die plaatsen waar de uitwijkingen van het basilair membraan een maximum vertonen. Wanneer de uitwijking van het basilair membraan verscheidene pieken vertoont kan in principe de selectiviteitsvergroter ook deze verscheidene pieken tegelijkertijd verder leiden. Dit betekent dat wanneer voor elk frequentiegebied een aparte richtingszoeker verondersteld wordt (fig. 8 en 9) verscheidene richtingszoekers tegelijkertijd werkzaam kunnen zijn en een richtingsaanwijzing geven overeenkomstig de niveau- en tijdsverschillen tussen beide oren binnen dit frequentiegebied.

Laat ons nu eens aannemen dat een luidspreker spraak of muziek weergeeft. Daar het basilair membraan slechts in beperkte mate analyseert, zullen de door het basilair membraan afgegeven signalen voortdurend veranderen. Het spectrum varieert voortdurend als het ware. Door de invloed van de selectiviteitsvergroting zullen op een zeker ogenblik slechts een paar richtingszoekers in werking zijn; daar echter de signaalinhoud voortdurend wisselt zullen de maximale uitwijkingen van het basilair membraan telkens op andere plaatsen optreden. Daardoor houdt de activiteit van een richtingszoeker op een gegeven ogenblik op en wordt deze overgenomen door andere richtingszoekers. Een bepaalde richtingszoeker is slechts zolang in werking zolang er op de overeenkomstige plaatsen van de basilaire membranen een maximum optreedt. Men kan zich voorstellen dat deze tijdsduur klein is bij ploffende medeklinkers en lang bij klinkers en dat de relatieve verdeling van deze tijdsduur bij spraak bijv. gegeven wordt door een curve als in fig. 56.

Wat gebeurt er nu wanneer twee luidsprekers hetzelfde signaal weergeven, maar een luidspreker vertraagd is? Bij kleine onderlinge tijdsverschillen zullen de signalen van beide luidsprekers op elk wille-

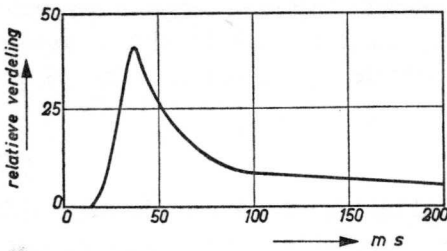


Fig. 56. Voorbeeld van de relatieve dichtheid van voorkomen van tijdsintervallen gedurende welke het spectrum nagenoeg constant blijft.

keurig ogenblik praktisch gelijk zijn: dit wil zeggen dat beide signalen het basilaire membraan op dezelfde plaatsen maximaal prikkelen en dat beide signalen dus ook aan dezelfde richtingszoekers worden overgedragen. Dan is er een situatie aanwezig welke overeenkomt met de situatie waarvoor de berekeningen uit paragraaf *c* over richtingshoren geldig zijn. Wanneer echter de tijdsverschillen zeer groot zijn, zullen de signalen van beide luidsprekers onderling volkomen verschillend zijn; beide signalen prikkelen het basilaire membraan niet meer op dezelfde plaats maximaal; dienovereenkomstig worden beide signalen niet meer door dezelfde richtingszoekers gedetecteerd. Daar er geen enkele voorkeur meer is voor een der beide luidsprekers hoort men bij gelijke luidheid van beide luidsprekers deze inderdaad beiden even luid: slechts één luidspreker wordt waargenomen indien diens luidheid voldoende groot is om het geluid van de ander te maskeren.

Voor een gemiddelde waarde van het tijdsverschil bv. 30 ms kunnen twee situaties optreden. Gedurende bepaalde tijdsintervallen geven beide luidsprekers hetzelfde spectrum weer. Hun signalen worden aan dezelfde richtingszoekers toegevoerd. In dit geval zijn de krommen uit fig. 55 geldig. Gedurende de resterende tijdsintervallen zijn de signalen van beide luidsprekers onderling verschillend en dienovereenkomstig worden de signalen aan verschillende richtingszoekers toegevoerd. Om dan schijnbare gelijke luidheid te verkrijgen moeten beide signalen inderdaad gelijk zijn. Om slechts één luidspreker te horen moet het niveauverschil zo groot zijn dat de ander gemaskeerd wordt. De waarde van dit niveauverschil komt overeen met de asymptotische waarden uit fig. 31. Deze blijken ongeveer 32 dB te bedragen. Wij zouden ons nu kunnen voorstellen dat de krommen uit fig. 31 beschouwd moeten worden als ontstaan uit een gewogen gemiddelde van deze twee situaties.

Omgekeerd geeft een vergelijking van de lijn *L* uit fig. 55 met de lijn *L* uit fig. 31 ons enig idee hoe dit gemiddelde van het tijdsverschil afhangt. Laat ons aannemen dat wanneer slechts één stelsel richtings-

zoekers gebruikt wordt het niveauverschil L' dB moet bedragen om slechts één luidspreker te horen en 32 dB wanneer 2 stelsels gebruikt worden. De meest eenvoudige verklaring voor de waarde van L in fig. 31 zou dan gegeven worden door

$$L = \alpha L' - \beta \cdot 32, \quad (33)$$

waarin α het percentage is behorend bij het gebruik van één stelsel richtingszoekers en β het percentage behorend bij het gebruik van twee aparte stelsels. Uiteraard zal $\alpha + \beta = 1$ zijn. Wanneer L' nu bekend is kan men α en β berekenen in afhankelijkheid van het tijdsverschil tussen de luidsprekers. Nu hebben wij er reeds op gewezen dat lijnen L en R uit fig. 55 nauwelijks te berekenen zijn. Men kan echter de waarde van de horizontale gedeelten van L en R schatten door vergelijken met curve M . De kromme M bereikt bij ongeveer 15 ms zijn maximale waarde. Bij kleinere tijdsverschillen is de berekende waarde van M praktisch gelijk aan de gemetene en blijft dan verder constant. De veronderstelling ligt nu voor de hand dat eerst voorbij deze 15 ms de factor β een rol begint te spelen. Maar dan zal ook de curve L uit fig. 55 tot ongeveer deze 15 ms de waarde van de gemeten L uit fig. 31 blijven volgen en daarna constant blijven. Op deze wijze vindt men voor L' de waarde 5 dB en op overeenkomstige wijze een waarde van 20 dB voor het horizontale gedeelte van R in fig. 55.

De waarde van L in fig. 31 wordt dan gegeven door

$$L = 5\alpha - 32\beta. \quad (34)$$

Voor R vindt men

$$R = 20\alpha + 32\beta. \quad (35)$$

en voor M

$$M = 10,4 \alpha, \quad (36)$$

Verder is gegeven $\alpha + \beta = 1$

$$(37)$$

Elimineert men nu α en β uit deze vier vergelijkingen, dan zijn M en R uit te drukken in L . Na enige herleiding wordt dan gevonden

$$M = 0,28 L + 9 \quad (38)$$

en

$$R = 21,6 - 0,32 L \quad (39)$$

In fig. 57 zijn deze berekende waarden van M en R vergeleken met de metingen. De overeenkomst blijkt zeer redelijk te zijn. Hoewel onze

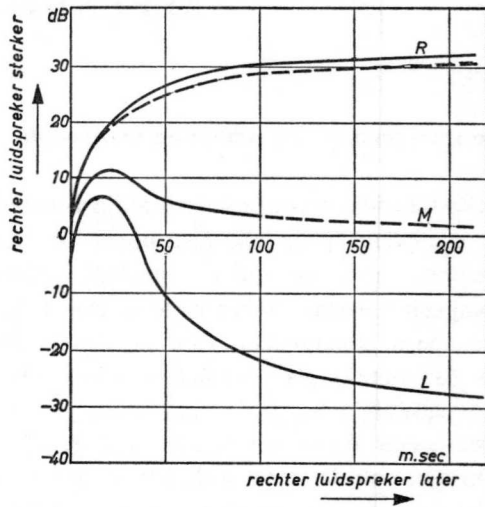


Fig. 57. Gemeten (—) en berekende (---) waarden van de niveau- en tijdsverschillen bij de metingen van Haas, Meyer en Schodder.

verklaring omtrent het ontstaan van de krommen uit fig. 31 zonder twiifel te eenvoudig van opzet is — men denke slechts aan de keus van het gewogen gemiddelde — blijkt deze vereenvoudiging toch slechts weinig invloed te hebben op het onderlinge verband tussen deze krommen.

APPENDIX II

De waarneming van timbre en toonhoogte

Orkestmuziek wordt praktisch altijd genoteerd door noten op notenbalken te schrijven. Voor elk instrument of groep van gelijksoortige instrumenten wordt een aparte notenbalk gebruikt. De ruwe vorm van zo'n compositie wordt als het ware in een diagram genoteerd waarbij timbres (de aparte notenbalken voor de diverse instrumenten) en de toonhoogtes (de noten) als parameters gebruikt worden. In het algemeen lijkt het nauwelijks mogelijk timbre en toonhoogte te verwisselen en beide grootheden lijken subjectief goed gedefinieerd. Des te merkwaardiger lijkt dan ook dat men in de literatuur van deze en de voorafgaande eeuw juist over de waarneming van deze grootheden zulke heftige discussies vindt.

Voor een groot gedeelte is deze onenigheid veroorzaakt door de toepassing van de Fourier analyse op geluid. Ohm — welbekend om zijn beroemde weerstandswet — veronderstelde dat het oor een Fourieranalyse uitvoerde en verdedigde deze opvatting tegenover Seebeck die de algemene geldigheid van dit postulaat betwijfelde. Het prestige van Von Helmholtz die de opvatting van Ohm ondersteunde, beïnvloedde uiteindelijk op een bijna beslissende wijze de akoestische wetenschap van de vorige eeuw met als resultaat dat deze tweede wet van Ohm praktisch algemeen aanvaard werd.

Een Fourier analyse levert ons de begrippen „grondtoon” en „boventonen” op en daar de toonhoogte van een toon onder normale omstandigheden overeenkomt met de frequentie van de grondtoon en het timbre afhangt van de golfvorm, die door de onderlinge verhoudingen van grond- en boventonen bepaald wordt, leek het voor de hand liggend toonhoogte en timbre dienovereenkomstig te definiëren. De vraag hoe een toonhoogte onveranderd kon blijven wanneer de grondtoon uit een bepaald klankfenomeen verwijderd werd, werd beantwoord door aan te nemen dat het oor door niet-lineaire effecten een verschiltoon creëerde die in frequentie overeenkwam met de in de aanbieding niet aanwezige grondtoon.

In de eerste decennia van de huidige eeuw echter ontstonden bedenkingen tegen Ohm's theorie. Lachmund onderzocht de waarneming van sinusvormige signalen en ontdekte hierbij dat een sinusvormig signaal

zowel een klankkleur of klinker karakter als ook een toonhoogte karakter bezat. Onder normale omstandigheden — zo drukte hij zijn bevindingen uit — nam men het toonhoogte karakter waar; wanneer deze toonhoogte waarneming verstoord werd door onregelmatigheden, kwam het timbre karakter te voorschijn. Een lage toon gaf de indruk van de klinker „u”; een hoge frequentie de indruk van de klinker „i”.

De ontwikkeling van radiobuizen en luidsprekers leidde al spoedig tot de constructie van elektronische muziekinstrumenten, waarin timbres en toonhoogten elektrisch opgewekt of gevormd werden. De meeste ontwerpers verkregen de timbres door sinustonen te vervormen. Trautwein echter baseerde zich op Hermann's theorieën. Deze had namelijk verondersteld dat een klank karakter veroorzaakt werd door bepaalde vaste frequentiebanden, formanten genaamd. Volgens Trautwein was de uitdrukking „klankkleur” in plaats van timbre bijzonder gelukkig gekozen daar — als bij de visuele waarneming — vaste frequentiebanden verantwoordelijk waren voor bepaald subjectieve indrukken. In zijn instrument Trautonium genaamd gebruikt Trautwein dan ook een zaagtand generator als signaalbron en filtert hieruit bepaalde frequentiebanden. De toonhoogte van het aldus verkregen geluid komt dan overeen met de periodiciteit van de zaagtand; het timbre wordt bepaald door de resonantiefrequentie van de filters. Dit is beslist in tegenspraak met de akoestische wet van Ohm.



Fig. 58. Periodieke pulsrij.

De Nederlander Schouten greep bij zijn onderzoekingen terug op de experimenten van Seebeck en bestudeerde de toonhoogte-gewaarwording bij aanbieding van een serie pulsen (fig. 58). De herhalingsfrequentie van deze pulsen bedroeg ongeveer 200 Hz. De toonhoogte kwam overeen met de grondtoon van het signaal. Wanneer men echter de grondtoon compenseerde (fig. 59) werd deze toonhoogte-gewaarwor-

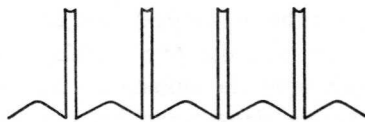


Fig. 59. Periodieke pulsrij zonder grondtoon.

ding niet beïnvloed. Verder constateerde Schouten dat men na enige oefening in staat was twee aparte tonen in het oorspronkelijke signaal te horen, nl. de grondtoon en een andere toon met dezelfde toonhoogte maar een heel ander timbre. Schouten noemde deze tweede toon het residue. Hij beperkte Ohm's akoestische wet in zoverre dat het oor weliswaar een Fourier analyse toepast maar dat hogere boventonen als één geheel moeten opgevat worden ten gevolge van het beperkt oplossend vermogen van het gehoor.

De Amerikaanse fysioloog Licklider toonde eveneens aan dat de toonhoogtewaarneming bij residue tonen niet berust op niet-lineaire effecten in het oor waardoor de grondtoon automatisch toegevoegd wordt. Hij liet waarnemers beurtelings naar sinusvormige tonen en residue tonen van gelijke toonhoogte luisteren; bovendien voerde hij een laagfrequente ruisband toe. De sinusvormige toon werd hierdoor volkomen gemaskeerd; de residue toon daarentegen niet: deze bleef duidelijk hoorbaar zonder enige verandering van toonhoogte. Wanneer de toonhoogte gewaarwording van een residue toon veroorzaakt wordt door een verschiltoon, dan zou deze op gelijke wijze als bij een sinusvormige toon door de ruis gemaskeerd moeten worden.

In de laatste jaren is de belangstelling voor het residue als klankfenomeen zeer toegenomen. Deze belangstelling is niet alleen op zuiver wetenschappelijke gronden gebaseerd. De ontwikkeling van vocoders voor spraakbandcompressie en van elektronische muziekinstrumenten maken een beter begrijpen van toonhoogte- en timbregewaarwording bijzonder wenselijk.

a) Het gedrag van een model voor de waarneming van toonhoogte en timbre

In de eerste Appendix hebben wij de mogelijkheden nagegaan van een model voor richtingshoren. Om een voldoende overeenstemming te krijgen tussen het gedrag van zulk model en de fenomenologie van het menselijk richtingshoren bleek het invoeren van een selectiviteitsvergroting noodzakelijk. Uiteraard zal deze selectiviteitsvergroting ook invloed hebben op verschijnselen die niet speciaal betrekking hebben op het richtingshoren. In het hiernavolgende zullen wij nu nagaan welke consequenties een mechanisme, dat qua werking equivalent is aan het model van fig. 53, heeft voor de monaurale waarneming.

Wanneer een sinusvormig signaal aan het oor wordt toegevoerd, zal dit eerst grof geanalyseerd worden door het basilair membraan. Het re-

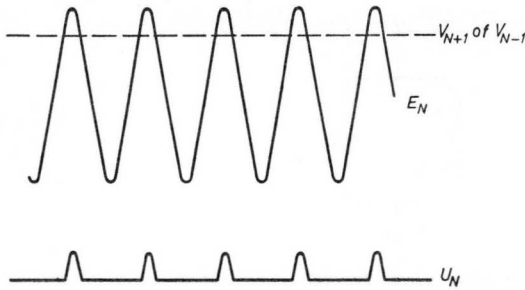


Fig. 60. Invloed van de selectiviteitsvergroting op de overdracht van sinusvormige signalen.

sultaat van deze analyse wordt daarna aan de selectiviteitsvergroter toegevoerd (fig. 54). Het gevolg hiervan is dat uitsluitend de uitgang N' signaal draagt. Dit signaal is ontstaan door gelijkrichting van hetingangssignaal met behulp van een diode die gedeeltelijk door de spanning V_{N-1} of V_{N+1} geblokkeerd wordt (fig. 60). Het uitgangssignaal U_N bestaat dan uit een aantal smalle pieken waarvan de periodiciteit overeenkomt met de periodiciteit van het oorspronkelijk sinusvormige signaal.

Er zijn nu twee bronnen van informatie aanwezig: enerzijds geeft het nummer van het filter dat met de ingang N van de selectiviteitsvergroter is verbonden, aan in welk frequentiegebied het aangeboden signaal gelegen is, anderzijds geeft de periodiciteit van de pulsrij eveneens aan welke frequentie het aangeboden sinusvormige signaal heeft. Dit komt dus zeer de waarneming van Lachmund nabij dat een sinusvormig signaal twee karakters nl. toonhoogte en timbre bezit. Men zou zich nu kunnen voorstellen dat de periodiciteit met het toonhoogte karakter overeenstemt en het nummer van het filter met het klankkleur karakter.

Deze veronderstelling lijkt bevestigd te worden door het gedrag van dit model ten opzichte van residue tonen. Een residue toon is te realiseren door een periodieke pulsrij toe te voeren aan een gedempt filter dat afgestemd is op een frequentie, veel hoger dan de periodiciteit van genoemde pulsrij (fig. 61). Laat ons nu aannemen dat de frequentie waarop dit filter is afgestemd overeenkomt met de resonantiefrequentie van het filter verbonden met de ingang N . De signalen optredende aan de ingangen $N-1$, N en $N+1$ en de uitgangen $N'-1$, N' en $N'+1$ hebben dan een golfvorm als in fig. 62. De spanningen (fig. 53) V_N en V_{N-1} of V_{N+1} teruggevoerd naar de diodes $D_{R(N-1)}$ en $D_{R(N+1)}$, respectievelijk D_{RN} zijn voorgesteld door de gestippelde lijnen. De diodes $D_{R(N-1)}$ en $D_{R(N+1)}$ worden nu volledig geblokkeerd door de spanning V_N ; de diode D_{RN} daarentegen slechts gedeeltelijk. Zodoende kan de diode D_{RN} nog

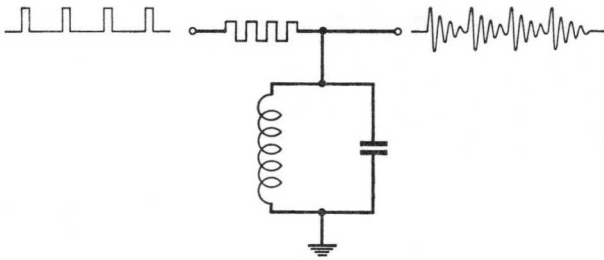


Fig. 61. Opwekken van een residue toon.

juist de hoogste pieken doorlaten. De periodiciteit van deze pieken komt nu juist overeen met de periodiciteit van het oorspronkelijke signaal en deze komt weer overeen met de subjectief waargenomen toonhoogte. De formantfrequentie (de resonantiefrequentie van het filter waarmee de residue toon gevormd is) wordt aangegeven door het rangnummer van het filter dat met ingang N verbonden is. Deze formantfrequentie verandert niet wanneer men de periodiciteit verandert. Nu is het bekend dat het timbre van een residue toon nauwelijks verandert wanneer enkel de periodiciteit gewijzigd wordt, maar sterk verandert bij variatie van de formant. Correleert men nu de begrippen klankkleur en formant met het nummer van het uitgekozen filter dan blijkt het gedrag van dit model een zeer behoorlijke overeenstemming te tonen met de subjectieve waarneming. De formantfrequentie wordt gecodeerd als nummer van een filter: dit komt overeen met „gecodeerd door een zekere plaats op het basilair membraan”; de toonhoogte wordt gecodeerd als periodiciteit van een pulsrij: deze periodiciteit is dan equivalent aan de periodiciteit van de zenuwpulsen.

Residue tonen als fenomeen zijn eerst betrekkelijk laat in de literatuur verschenen en daardoor is mogelijkwijze de indruk gewekt dat zij betrekkelijk weinig voorkomen. Zoals bekend verondersteld mag wor-

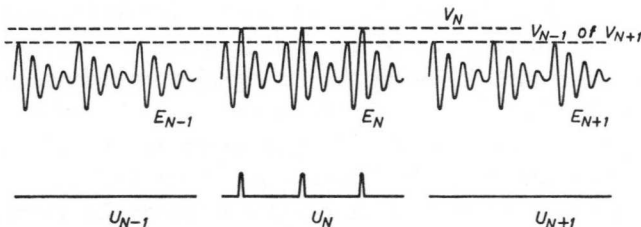


Fig. 62. Invloed van de selectiviteitsvergroting op de overdracht van residue tonen.

den bestaat spraak uit klinkers en medeklinkers. In eerste benadering mogen klinkers en een groot gedeelte der medeklinkers beschouwd worden als residue tonen met twee of meer formantfrequenties en de resterende niet stemhebbende medeklinkers als gefilterde ruis. In principe zou het beschreven model dan ook spraak moeten analyseren. Wij hebben dit voor een experimenteel model onderzocht; hierbij bleek dat dit model zowel over de toonhoogte als over de ligging der formanten uitsluitel gaf. Met behulp van deze gegevens kon dan ook de aangeboden klinker weer synthetisch opgebouwd worden.

b) Het periodiciteits-formant diagram

De combinatie opeenvolgende filters — selectiviteitsvergroter rubriceert ontvangen signalen met behulp van twee componenten: de periodiciteit van een pulsrij en de rangnummers van de uiteindelijk effectieve filters. Zoals bekend houdt dit rangnummer verband met de resonantiefrequentie. Wanneer een klinker aan het model wordt toegevoerd worden zijn formanten aangegeven door de rangnummers van deze filters. Het lijkt dan ook gerechtvaardigd om formanten op zulke wijze te definiëren: als het rangnummer d.w.z. als de resonantiefrequenties van die filters waarvan het signaal door de selectiviteitsvergroter verder geleid wordt. Deze definitie breidt het begrip formant uit. Een sinusvormig signaal heeft dan ook een formant; deze is dan gelijk aan zijn frequentie. Een complex geluid heeft een aantal formanten, één overeenkomend met zijn grondtoon, enkele overeenkomend met de lagere boventonen, die nog door de selectiviteitsvergroter als gescheiden maxima worden waargenomen en tenslotte een of meer voor combinaties van hogere boventonen die niet meer gescheiden waargenomen worden. Een dergelijke definitie van formant past goed bij de akoestische wet van Ohm in de interpretatie door Schouten.

Op het eerste gezicht lijkt het een vrij willekeurige greep formanten te definiëren op basis van een model. De gewoonlijk gebruikte definitie van formant is echter evenzeer willekeurig. Potter en Steinberg definiëren een formant als „een groep harmonischen die een gebied van energieconcentratie vormen in het spectrum van het waargenomen geluid”. Hoewel iedereen begrijpt wat hiermee bedoeld wordt, moeten wij ons bewust zijn van het feit dat op basis van alleen deze definitie elke boventoon uit een formantgebied apart als formant beschouwd kan worden, daar iedere boventoon op zich zelf ook weer een gebied van energieconcentratie in het spectrum is. De gegeven definitie van formant is

triviaal totdat een subjectieve interpretatie beslist heeft of een bepaalde groep boventonen beschouwd moet worden als één formant of als een hele groep formanten. Blijkbaar speelt een of ander oplossend vermogen bij deze beslissing een rol. Wanneer men dit nu voor ogen houdt lijkt een definitie van formant op basis van een hoormodel volkomen gerechtvaardigd daar dit model automatisch beslist of een aantal harmonischen beschouwd moeten worden als één groep of als aparte individuen.

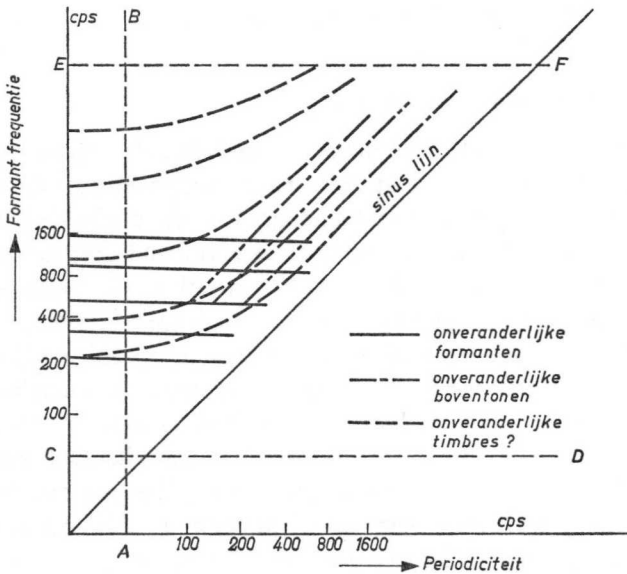


Fig. 63. Diagram waarin stationaire klanken gekarakteriseerd worden door formant en periodiciteit.

Het ligt voor de hand formant frequentie en periodiciteit te gebruiken als coördinaten van een diagram, waarin men stationaire klanken kan karakteriseren (fig. 63). De periodiciteit is langs de abscis uitgezet, de formantfrequentie langs de ordinaat. De lijn *A—B* stelt de grenswaarde voor ratelen voor. Lagere periodiciteiten worden niet meer als toonhoogte waargenomen maar als een opeenvolging van aparte pulsen. De lijnen *C—D* en *E—F* geven de grenswaarden voor frequentie waarneming aan, de onder- en bovengrens van het audiogram. Op een lijn onder 45° liggen de klanken waarvan de periodiciteit gelijk is aan de formantfrequentie. Sinusvormige signalen worden dus blijkbaar weergegeven door punten op deze lijn. Daar de periodiciteit niet hoger kan zijn dan de frequentie bepaalt deze lijn eveneens een grenswaarde.

Men kan nu dit diagram vergelijken met de subjectieve waarneming van klanken. De waargenomen toonhoogte van een of andere stationaire klank komt ten naaste bij overeen met de periodiciteit. Het zou prettig zijn als een dergelijke eenvoudige relatie ook het timbre aan dit diagram zou koppelen. Bij oppervlakkige beschouwing lijkt dit inderdaad het geval te zijn. Bepaalde formantgebieden, zoals bijv. bij klinkers optredend, zijn sterk gecorreleerd aan een bepaalde klankindruk. Hiervan uitgaande zou men dus concluderen dat het timbre als grootheid langs de verticale as van het diagram geplaatst kan worden.

Aan de andere kant echter beschouwd van Helmholtz de timbres als bepaald door vaste combinaties van bepaalde boventonen. En ook dit blijkt overeen te komen met onze subjectieve waarneming. Enerzijds — in de formantentheorie — komen constante timbres dus overeen met horizontale lijnen in het diagram van fig. 63, anderzijds — in de boventonen theorie — met lijnen onder 45° .

Men kan zich nu afvragen of hier werkelijk een tegenspraak aanwezig is. Zou men immers aannemen dat timbres constant blijven bij de voorwaarde die in fig. 63 door de vette streepijnen zijn aangegeven (met andere woorden op de aangegeven wijze met de toonhoogte meeschuivende formanten), dan zal bij grote verhouding tussen formantfrequentie

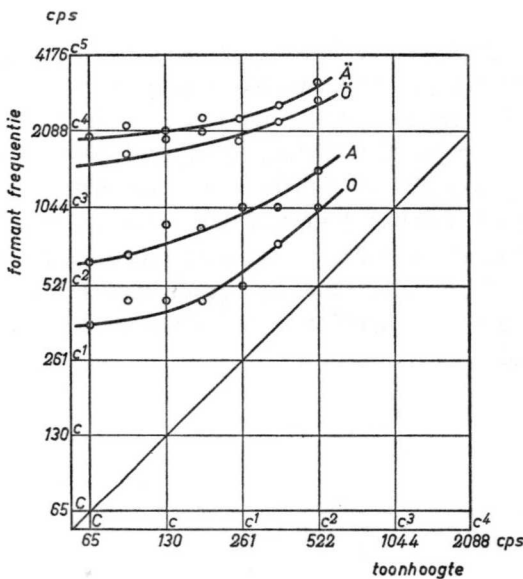


Fig. 64. Invloed van de toon-hoogte op de frequentie van de hoofdfornant van klinkers.

en toonhoogte de formantfrequentie nagenoeg onafhankelijk van de toonhoogte zijn (formantentheorie), bij kleine verhouding daarentegen de formant evenredig met de toonhoogte meeschuiven (boventonen-theorie). Er is echter geen recente literatuur aanwezig waaraan men deze beweringen kan toetsen. Stumpf heeft in de twintiger jaren de hoofdformanten van klinkers gemeten als functie van de toonhoogte. De resultaten van deze metingen zijn in fig. 64 in grafiekvorm weergegeven; zij blijken in goede overeenstemming met de hier ontwikkelde hypothese. Ook het mensuurverloop van orgelpijpen en de samenstelling van mixturen bij orgels blijken kwalitatief overeen te stemmen met deze theorie.

Tot nu toe hebben wij ons beperkt tot de combinatie van één toonhoogte en één formant. Gewoonlijk bezit een klinker of een toon verscheidene formanten; desondanks neemt men zo'n klank toch slechts als één geheel waar. Hoe deze versmelting optreedt is volkomen onbekend; men kan echter opmerken dat de visuele waarneming soortgelijke eigenschappen vertoont: wij onderscheiden spectrale kleuren bestaande uit slechts één frequentieband (de kleuren van de regenboog) en mengkleuren (bruin, wit etc.) Op soortgelijke wijze zou men nu kunnen spreken over spectrale timbres (een sinusvormige signaal, een residue toon met slechts één formant) en mengtimbres (klinkers, gelijkgerichte sinus etc.).

Hoewel een diagram als in fig. 63 gegeven ongetwijfeld bijdraagt tot een beter begrip van de menselijke waarneming moet men haar betekenis toch ook weer niet al te hoog aanslaan. In het algemeen wordt immers de waarneming niet uitsluitend bepaald door de fysische eigenschappen van de aangeboden signalen maar ook door de vraag waarheen op dat ogenblik de belangstelling van de waarnemer gericht is. Dit betekent dat elk diagram of model zowel voor binauraal als monauraal horen slechts een flauwe afbeelding kan geven van de waarneming, welke bereikt wordt door de combinatie van de menselijke zintuigen en de menselijke geest.

LITERATUUR

- K. DE BOER, *Stereofonische geluidswaergave*, dissertatie, Delft 1940.
- R. A. VAN DER VEER, *Enige onderzoekingen over het richtingshoren*, dissertatie, Amsterdam 1957.
- G. A. SEDEE, *Over stereoakoësie*, dissertatie, Utrecht 1957.
- N. V. FRANSSEN, *Some considerations on the mechanism of directional hearing*, dissertatie, Delft 1960.
- C. WANSDRONK, *On the mechanism of hearing*, dissertatie, Leiden 1961.
- A. WILSKA, *Untersuchungen über das Richtungshören*, Akademische Abhandlung, Helsinki 1938.
- Artikelen over zaalakoëstiek en subjectieve akoëstiek*, Acustica en Akustische Beihefte.
- G. A. BRIGGS, *Stereo Handbook*, Wharfedale Wireless Works Limited.
- G. SLOT, *Van microfoon tot oor*, Philips techn. bibliotheek.

MEMORANDUM

TO : THE PRESIDENT

FROM : THE SECRETARY OF DEFENSE

SUBJECT: [Illegible]

[Illegible text]

[Illegible text]