

Sound & Science: Digital Histories

Archives NAG: Publicatie No. 26 van de Geluidstichting, de Boer, K. (1940). Stereofonische geluidswaergave, Delft: Geluidstichting, 1940

<https://acoustics.mpiwg-berlin.mpg.de/text/publicatie-no-26-van-de-geluidstichting>



Scan licensed under: [CC BY-SA 3.0 DE](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/) | Max Planck Institute for the History of Science

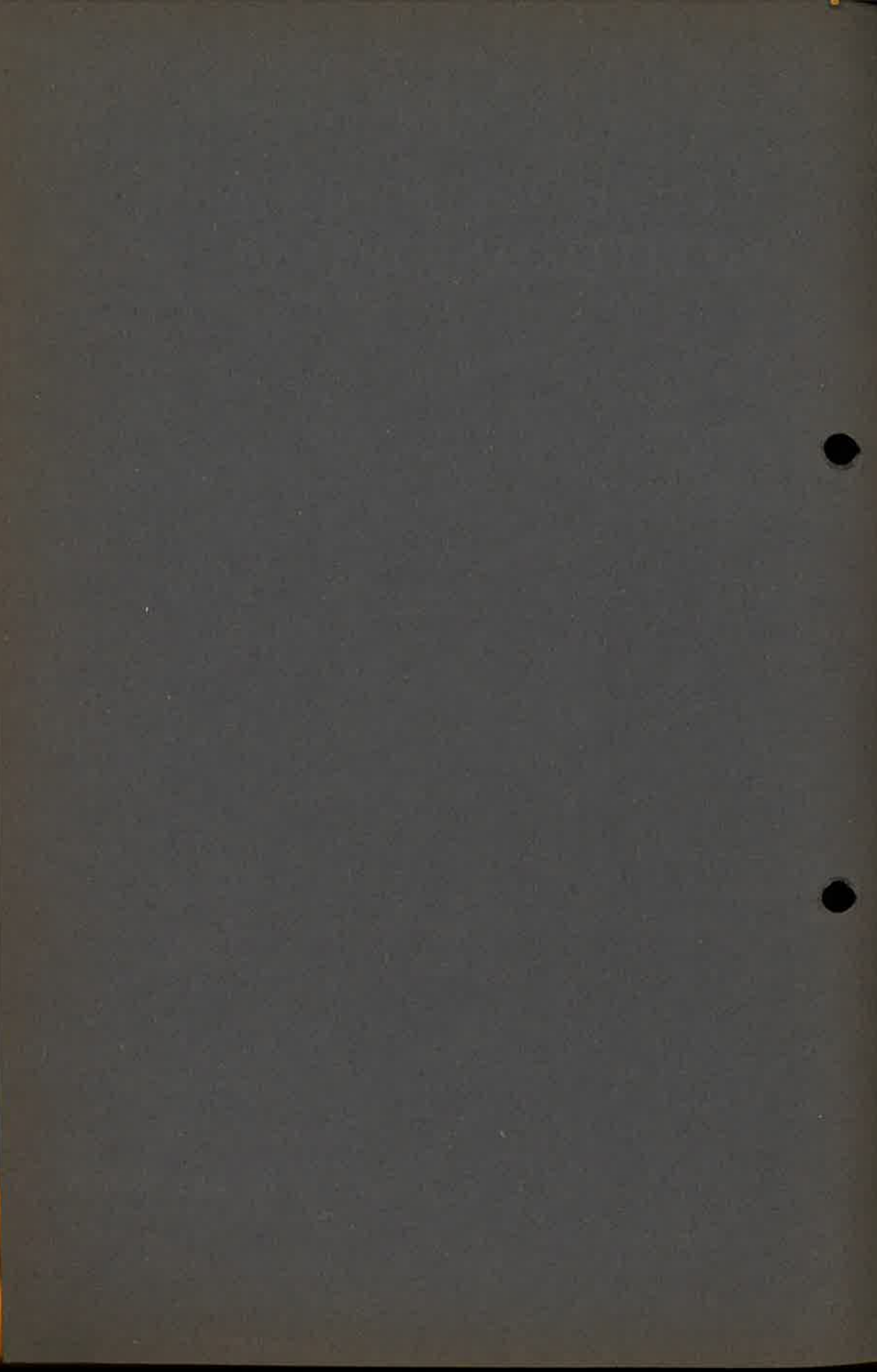


MAX PLANCK INSTITUTE
FOR THE HISTORY OF SCIENCE

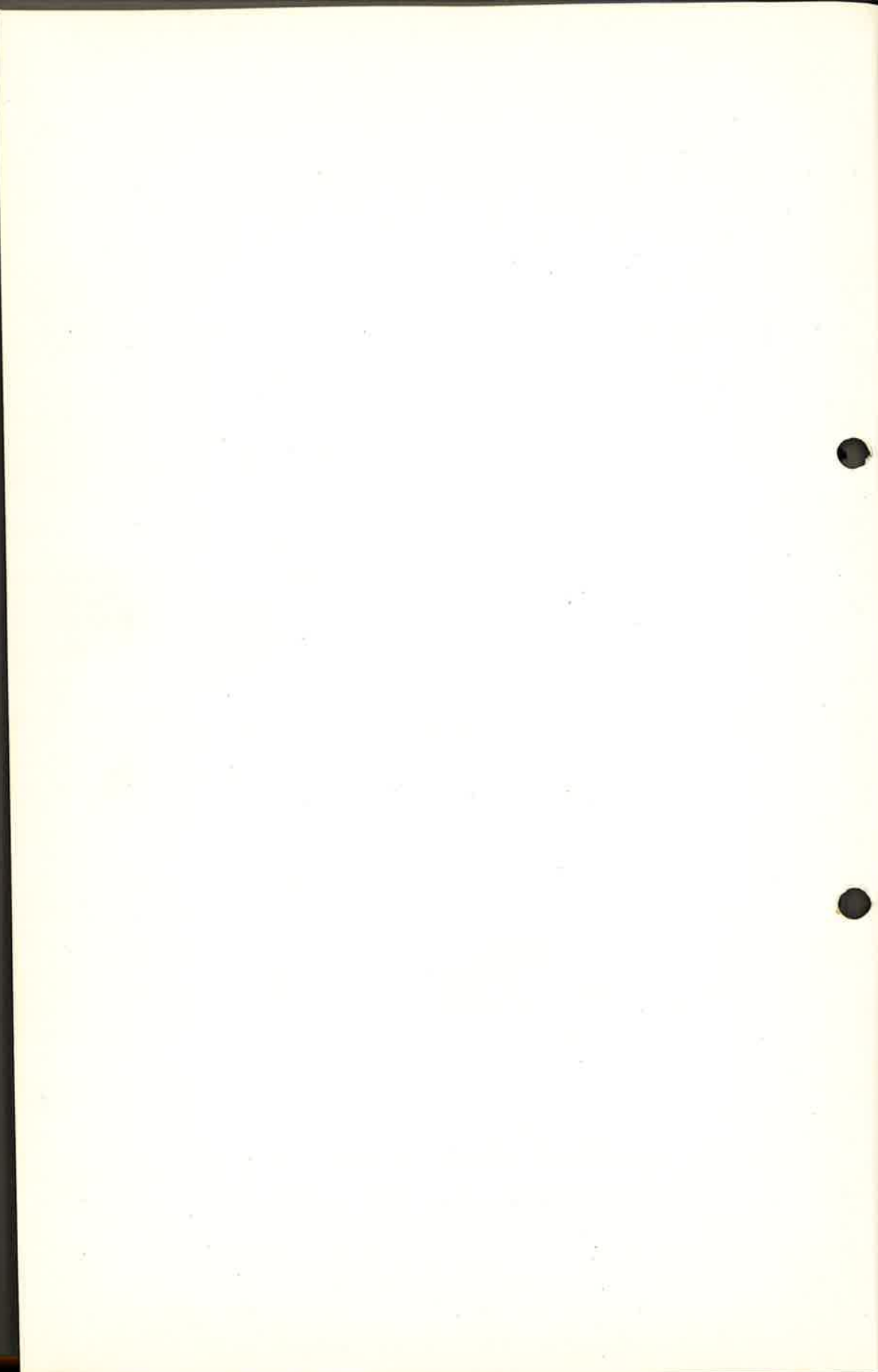
STEREOFONISCHE GELUIDSWEERGAVE

PUBLICATIE No. 26
VAN DE
GELUIDSTICHTING
DELFT - HOLLAND

K. DE BOER.



STEREOFONISCHE GELUIDSWEERGAVE.



STEREOFONISCHE GELUIDSWEERGAVE

PROEFSCHRIFT TER VERKRIJGING
VAN DEN GRAAD VAN DOCTOR IN
DE TECHNISCHE WETENSCHAP AAN
DE TECHNISCHE HOOGESCHOOL TE
DELFT OP GEZAG VAN DEN RECTOR
MAGNIFICUS, DR. IR. C. J. VAN
NIEUWENBURG, HOOGLEERAAR IN
DE AFDEELING DER SCHEIKUNDIGE
TECHNOLOGIE, VOOR EEN COM-
MISSIE UIT DEN SENAAAT TE VER-
DEDIGEN ~~OP VRIJDAG 6 DECEMBER~~
~~1940, DES NAMIDDAGS TE 3 UUR, DOOR~~

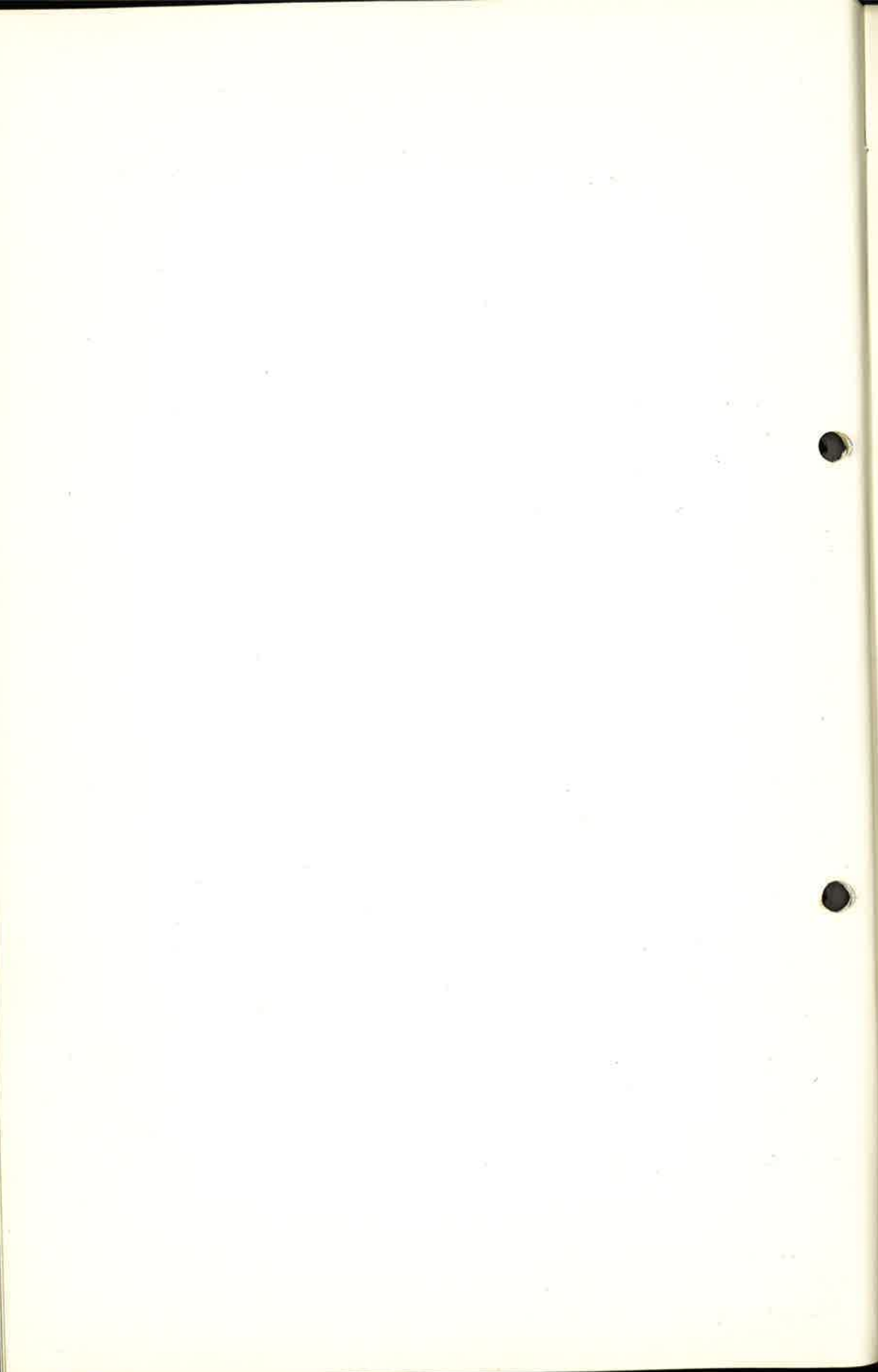
KORNELIS DE BOER

GEBOREN TE STEENWIJK

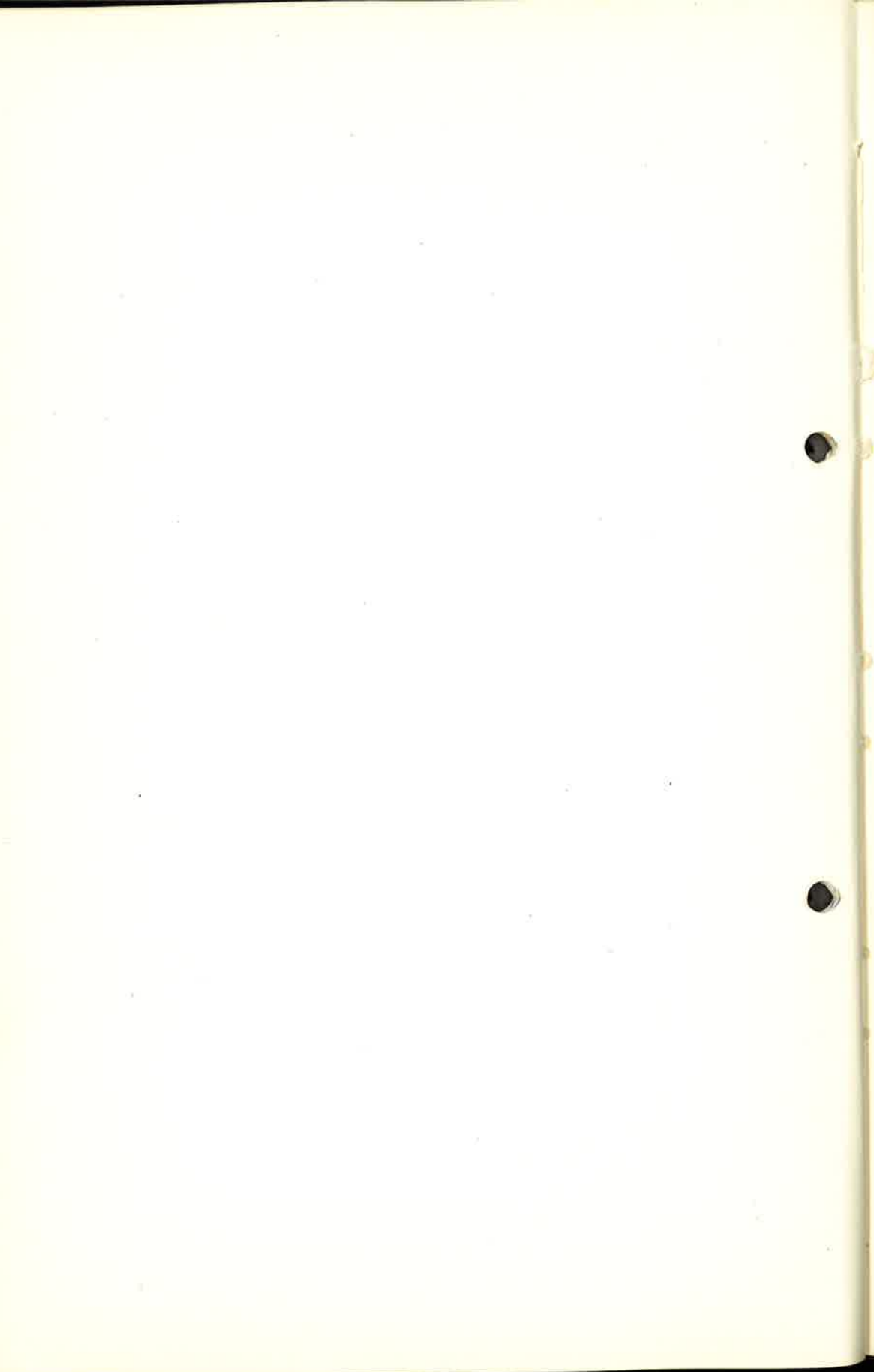
NATUURKUNDIG INGENIEUR

Dit proefschrift is goedgekeurd door den promotor
Prof. Dr. C. ZWIKKER.

De Directie der N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken en de Directie van het Natuurkundig Laboratorium der N.V. ben ik tot groote dank verplicht voor de ruime gelegenheid, welke zij mij geboden hebben het materiaal voor dit proefschrift te verzamelen, uit het werk dat ik op het laboratorium heb mogen verrichten.

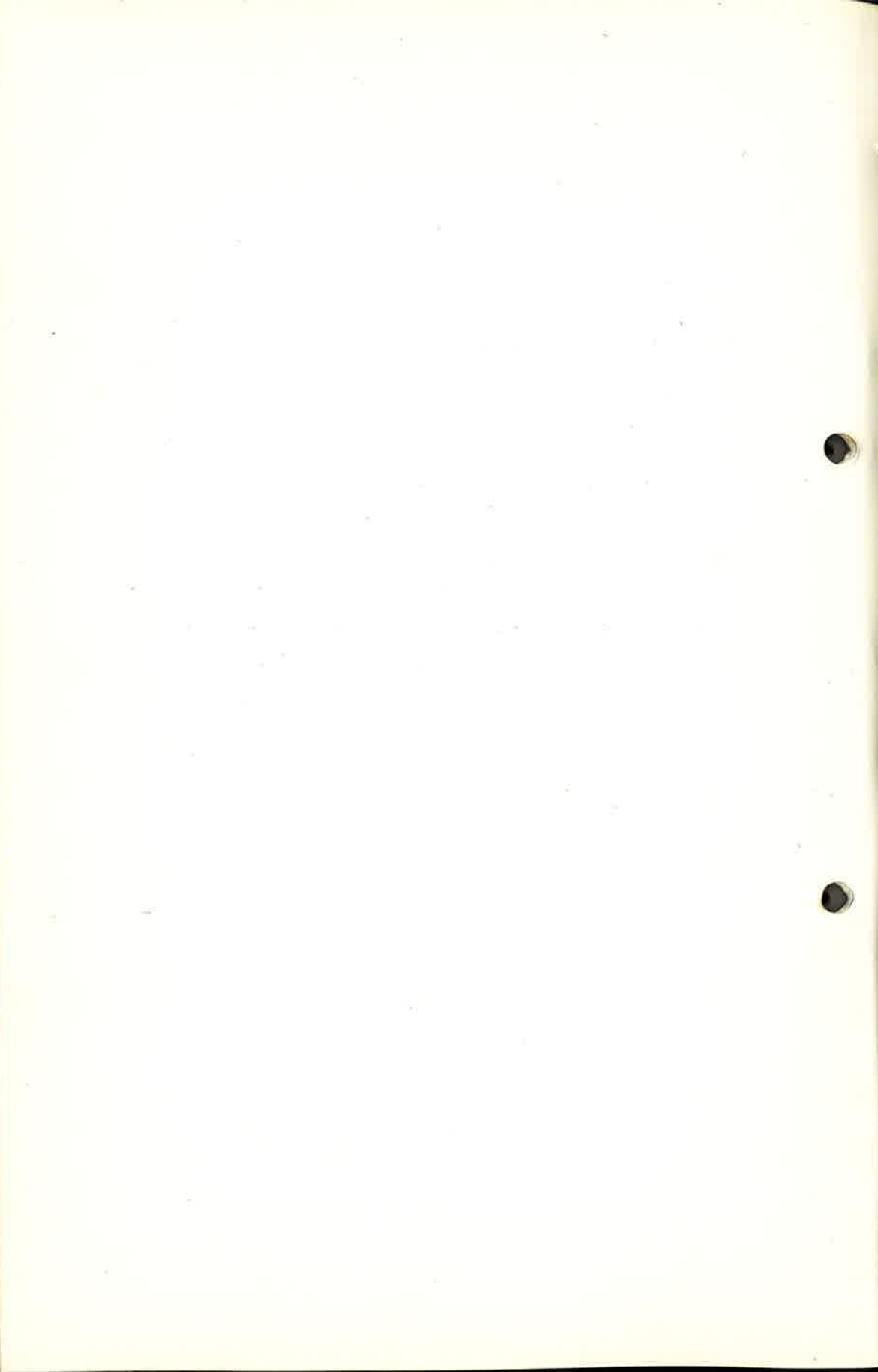


Aan mijn ouders.
Aan Jeanne.



INHOUD

| | Blz. |
|---|------|
| HOOFDSTUK I : Overzicht van de belangrijkste onderzoeken over het ruimtelijk hooren . | 11 |
| HOOFDSTUK II : Eigen aanvullend onderzoek betreffende het richtingshooren | 39 |
| HOOFDSTUK III: Overzicht van de historische ontwikkeling der stereofonische geluidswaergave | 54 |
| HOOFDSTUK IV: Realisatie van stereofonische geluidswaergave met luidsprekers in zalen . . | 63 |
| HOOFDSTUK V : Techniek der stereofonische geluidswaergave | 82 |
| Zusammenfassung | 112 |
| Summary | 114 |



INLEIDING.

Onze gewaarwording van geluid bevat als essentieel bestanddeel een ruimtelijke indruk omtrent de herkomst van het geluid. Geluiden, waarbij door een of andere oorzaak de ruimtegewaarwording ons in de steek laat, wekken vaak een onaangenaam gevoel in ons op, een soort van onbehaaglijkheid. Dit is heel goed te begrijpen, wanneer men de functie van het gehoor van een teleologisch standpunt bekijkt. Als oorspronkelijke taak van de gehoorszin mag men wel beschouwen het *waarschuwen voor gevaar* — een opvatting, die strookt met het feit, dat we wel een ooglid, maar geen „oor-lid” bezitten, d.w.z. geen voorziening voor het naar willekeur tijdelijk buiten werking stellen van het gehoor: want gevaar kan te allen tijde opdagen. Een waarschuwing voor gevaar echter, moge zij gegeven worden door het ritselen van takken in het bosch of door het loeien van een claxon op een straatkruising, kan voor den drager van het gehoor slechts nuttig zijn, wanneer het gehoor hem tevens mededeelt, van welke kant het gevaar komt, en tot op zekere hoogte ook, hoe dichtbij het al is.

Ook geluiden, die niets met eenig gevaar uitstaande hebben, zijn wij nu eenmaal gewend met een ruimtevoorstelling te associeeren. Zijn verschillende geluidsbronnen aanwezig, zooals de diverse sprekers in een tooneelstuk, dan onderscheiden we deze door het richtingshooren, en we beschouwen het als vanzelfsprekend, dat de acoustische en de visuele waarnemingen met elkaar kloppen. Evenzoo worden onze indrukken bij een concertuitvoering door een groot orkest in belangrijke mate beïnvloed door het feit, dat we het geluid der afzonderlijke instrumenten van verschillende kanten hooren komen en deze dus niet alleen door hun timbre, maar ook door hun richting kunnen identificeeren. Overigens is dit identificeeren van een geluid temidden van een groot aantal andere klanken op zichzelf een zeer belangrijk uitvloeisel van het richtingshooren: we bezitten het vermogen, onze aandacht op een bepaalde *richting* te concentreeren en op deze wijze storende of voor het oogenblik ongewenschte geluiden uit andere richtingen op de achtergrond te dringen.

Al deze verschijnselen in onze geluidsgewaarwording komen te vervallen bij de tegenwoordig gebruikelijke electro-acoustische methoden voor het versterken en overbrengen van geluid. Wanneer we in de huiskamer de radio-uitzending van een concert beluisteren, hooren we alle instrumenten uit één richting, de richting van de luidspreker; het plastische van de orkestmuziek gaat daarbij verloren. Bij een hoorspeluitvoering is de toehoorder voor het uit elkaar houden der verschillende stemmen in hoofdzaak aangewezen op verschillen in timbre (eventueel nog in intensiteit); spreken verscheidene stemmen door elkaar of zijn bijgeluiden aanwezig, dan kan het voor den luisteraar buitengewoon vermoeiend zijn, zonder de steun van richtingsverschillen zijn aandacht op één der stemmen te concentreeren, een feit, waarmede de regisseur terdege rekening moet houden. Bij de geluidswaergave in de bioscoop is eveneens het ontbreken van een ruimtelijk effect te signaleeren: men *ziet* bijv. een spreker over het doek bewegen, *hoort* echter zijn stem steeds uit eenzelfde richting, n.l. die van de achter het doek opgestelde luidspreker. Bedenkt men, dat in de ontwikkeling van de film een voortdurend streven naar grootere „natuurlijkheid” valt waar te nemen, dan ligt het geheel in de lijn, dat men de illusie nog tracht te verhoogen door de verschillende standen der geluidsbron bij de opname ook bij de waergave voor het oor onderscheidbaar te maken.

De mogelijkheid van een dergelijke stereofonische geluidsoverdracht zal in de volgende hoofdstukken worden besproken. Om nu hun onderling verband goed te kunnen begrijpen is het noodzakelijk eerst in het kort de grondbeginselen der stereofonische geluidswaergave uiteen te zetten.

Teneinde bij de electriche overbrenging van geluid de richtingsgewaarwording te behouden, moet het geluid aan de ooren van den luisteraar op dezelfde wijze worden toegevoerd als bij het natuurlijke hooren het geval zou zijn. Dit is op zichzelf betrekkelijk eenvoudig te verwezenlijken door in de opnameruimte in de plaats van den niet aanwezigen luisteraar een kunsthoofd op te stellen, waarin ter plaatse van de ooren twee microfoons zijn aangebracht. Elke microfoon voedt via een eigen versterker en transmissielijn (kanaal) één van de twee hoofdtelefoons op de ooren van den luisteraar.

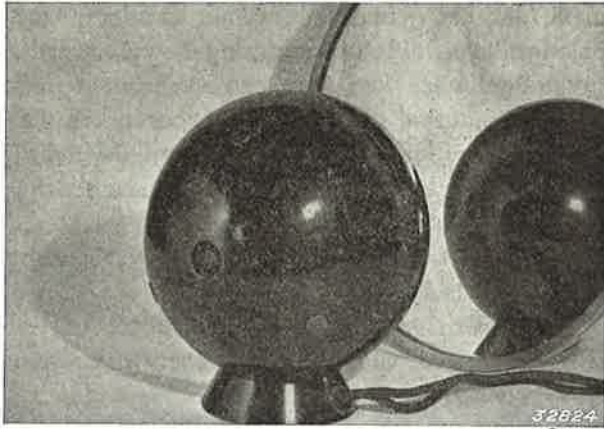


Fig. 1.

Als kunsthoofd kan een bol worden gebruikt met een diameter van ongeveer 20 cm. De microfoons staan aan de uiteinden van een horizontale diameter.

Over het feit, dat men voor een dergelijke transmissie moet beschikken over twee kanalen, willen we op deze plaats niet uitweiden.

Voor vele gevallen zal deze noodzaak geen overwegend bezwaar beteekenen. In de geluidsfilm bijvoorbeeld, waar de transmissielijn tusschen de plaatsen van opname en weergave wordt vervangen door een geluidsspoor op de filmstrook, is het mogelijk om hierop in plaats van één, desnoods twee geluidssporen onder te brengen, die elk het geluid voor één oor dragen. Onaangenaam is echter de eisch, dat volgens het beschreven principe elke toeschouwer in de bioscoopzaal een hoofdtelefoon zou moeten opzetten.

Men zou liever twee gemeenschappelijke „telefoons” voor het geheele auditorium willen toepassen, d.w.z. twee luidsprekers aan weerskanten van de zaal opstellen. Dan ontstaat echter direct een afwijking van het voorgestelde principe, in zooverre, dat nu niet elk oor geluid van één microfoon ontvangt, maar nu via de twee luidsprekers van beide microfoons. Desalniettemin is het bij proefnemingen mogelijk gebleken, op deze wijze toch een behoorlijk stereofonisch effect te verkrijgen.

Het voordeel, dat met stereofonische geluidswaergave wordt

verkregen is, dat het geluid natuurlijker aandoet, wat men zich als een belangrijke kwaliteitsverbetering bewust wordt.

Op eenvoudige wijze kan men een experiment doen, waarbij plotseling van monoraal naar binauraal hooren kan worden overgeschakeld. Het resultaat hiervan is treffend. Men krijgt het gevoel, alsof een zekere beklemming wegvalt, of men zich in dezelfde ruimte als de sprekers of de musici bevindt.

Nu kan men de waargenomen kwaliteitsverbetering van het geluid bij stereofonische weergave moeilijk in cijfers uitdrukken. Wel hebben proeven van MAXFIELD ¹⁾ aangetoond, dat een stereofonische weergave, waarbij het frequentiespectrum tot 6000 per/sec was beperkt, meer bevrediging schonk dan een normale weergave, waarbij een frequentiespectrum tot 15000 per/sec werd omvat.

Het doel van dit proefschrift nu, is de factoren, die bij de stereofonische geluidswaergave een rol spelen, nader te beschouwen. Daartoe wordt in Hoofdstuk I nagegaan, in hoeverre het werk van andere onderzoekers betreffende het ruimtelijk hooren materiaal levert om de hier optredende verschijnselen te verklaren. Dit blijkt niet in voldoende mate het geval te zijn. Eigen experimenten, die het ontbrekende aanvullen, zijn opgenomen in Hoofdstuk II en het blijkt, dat aan de hand hiervan de effecten, optredende bij stereofonische geluidswaergave met luidsprekers, kunnen worden beschreven en berekend.

In Hoofdstuk III vindt men de historische ontwikkeling der stereofonische geluidsreproductie.

Hoe stereofonische geluidswaergave in zalen kan worden verwezenlijkt, is in Hoofdstuk IV weergegeven.

Tot slot wordt in Hoofdstuk V de techniek der stereofonische geluidswaergave besproken aan de hand van verschillende toepassingen.

Twee nader uitgewerkte voorbeelden laten zien, welke eigenaardige moeilijkheden daarbij kunnen optreden.

¹⁾ J. P. Maxfield, Journ. Soc. Mot. Pict. Eng., 30, 131, 1938.

HOOFDSTUK I.

OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE ONDER- ZOEKINGEN OVER HET RUIMTELIJK HOOREN. ¹⁾

Het is al lang bekend, dat in tegenstelling met het „afstands-
hooren”, bij gebruik van slechts één oor het „richtingshooren” niet
mogelijk is; hierbij is een samenwerken van beide ooren vereischt.
Fysisch gezien moet dus de verschillende prikkeling van de ge-
hoororganen in een geluidsveld de oorzaak van het richtingshooren
zijn. In een stationnair geluidsveld, veroorzaakt door een zuiver
sinusvormige toon, kan dit verschil ontstaan door intensiteits- en
phaseverschillen. Bij plotseling ontstaande en weer verdwijnende
geluidsvelden komen verschillen in intensiteit en tijd van aan-
komst in aanmerking. Het is dan ook niet te verwonderen, dat elk
dezer drie verschijnselen de grondslag van een theorie over het
richtingshooren is geworden.

Eén der eerste theorieën over het richtingshooren is wel de in-
tensiteitstheorie geweest. De verstoring van het geluidsveld door
het hoofd behoort tot de buigingsproblemen. *) Bevindt het hoofd
van een waarnemer zich in een geluidsveld, dan treden door de
afschermende werking van het hoofd intensiteitsverschillen aan

¹⁾ Een overzicht van de literatuur, verschenen voor 1925, is te vinden bij
E. Meyer, *Electrot.* ZS 36, 805, 1925.

*) De buigingsverschijnselen die zich voordoen bij de verstrooiing van
geluidsgolven door eenvoudige lichamen zijn voor het eerst exact bere-
kend door Lord Rayleigh. Er bestaat een groote analogie van deze
verschijnselen met de buiging van electromagnetische golven.
Uitvoerige beschouwingen en berekeningen over deze laatste problemen
zijn te vinden in artikelen van Balth. v. d. Pol en H. Bremmer.

Lord Rayleigh. *The theory of sound.*

Phil. Trans. Roy. Soc. 203 A, 87, 1904.

Balth. v. d. Pol en H. Bremmer. *Phil. Mag.* 24, 141 en 825, 1937.

Phil. Mag. 25, 817, 1938.

Phil. Mag. 27, 261, 1939.

de ooren op. Dit is juist voor tonen met hooge frequenties, in het algemeen gezegd, voor die tonen, waarvan de golflengte klein is ten opzichte van de afmetingen van het hoofd. Voor tonen met lage frequenties kan deze theorie, die aanvankelijk ook door LORD RAYLEIGH (1880) werd aangehangen, onmogelijk juist zijn, daar hier de intensiteitsverschillen aan de ooren zeer klein en nauwelijks waarneembaar zijn.

Ook laboratoriumproeven, waarbij zuivere tonen met dezelfde phase maar ongelijke intensiteit door middel van hoofdtelefoons aan de ooren werden toegevoerd, gaven bewijsmateriaal, dat de intensiteitstheorie voor tonen met lage frequenties niet opgaat.

Ter vervanging hiervan publiceerde LORD RAYLEIGH ¹⁾ in 1907 een „phasetheorie”. Deze theorie geeft aan, dat het aan de ooren optredende phaseverschil beslissend moet zijn voor de richtingsbepaling. De aanhangers van deze theorie, waarbij speciaal BOWLKER ²⁾ moet worden genoemd, sloegen een verkeerde weg in. Zij drukten het phaseverschil in hoekmaat uit, en interpreteerden de theorie zoodanig, dat voor alle frequenties de ervaren richtingshoek gelijk zou zijn aan de phasehoek. Dit zou dus inhouden, dat de waargenomen richting van een geluidsbron zou moeten variëren met de toonhoogte. Dat inderdaad het phaseverschil voor stationnaire geluidsvelden, teweeggebracht door zuiver sinusvormige tonen, een belangrijke rol speelt, is een feit. Alleen moet het worden beschouwd als een tijdsverschil van de aan de ooren optredende verschijnselen. Van dit standpunt gingen VON HORNPOSTEL en WERTHEIMER ³⁾ met hun „tijdsverschillentheorie” uit.

Allereerst dient nu nog te worden vermeld, dat bij impulsen of geruisch een veel nauwkeuriger localisatie mogelijk is dan bij klanken of zuivere tonen.

Door het niet stationnaire geluidsveld van een impuls te bezien, laat zich de tijdsverschillentheorie het beste begrijpen. Bevindt een geluidsbron zich evenver van beide ooren af, dan treedt er geen

¹⁾ Lord Rayleigh. Phil. Mag. 13, 214, 1907.

²⁾ T. J. Bowlker. Phil. Mag. 15, 318, 1908.

³⁾ E. M. von Hornbostel en M. Wertheimer. Abhandl. d. Berl. Akad. 20, 338, 1920.

tijdsverschil op tusschen de geluidsimpulsen, die rechter en linker oor treffen. Beweegt nu de geluidsbron zich in een cirkel om het hoofd, dan treedt er een tijdsverschil op, dat maximaal is als de geluidsbron zich in de verbindingslijn der ooren bevindt. Zooals vanzelf spreekt wordt de geluidsbron gelocaliseerd in de richting van dat oor, dat het eerst door geluid wordt getroffen. Uit hun waarnemingen concludeerden VON HORNPOSTEL en WERTHEIMER, dat er een minimaal waarneembaar tijdsverschil van $3 \cdot 10^{-5}$ sec. was, d.w.z. dat de richting van een geluidsbron minstens een hoek van 3° met het middelloodvlak van de ooras moest maken om buiten dat vlak te kunnen worden waargenomen.

VAN SOEST en GROOT ¹⁾ hebben aangetoond dat dit niet juist is. Zij toonden aan, dat een dergelijke drempelwaarde niet bestond en dat het kleinst waarneembare tijdsverschil aan de ooren afhankelijk is van de geoefendheid van den waarnemer. Tijdsverschillen van 10^{-6} sec. konden zij nog waarnemen, *een waarde, die ongeveer $30 \times$ kleiner is dan de door VON HORNPOSTEL en WERTHEIMER gevonden waarde.*

Bevindt een geluidsbron zich in het verlengde der ooras, dan bedraagt het aan de ooren optredende tijdsverschil ongeveer $63 \cdot 10^{-5}$ sec. (afhankelijk van de afmetingen van het hoofd), overeenkomende met een weglengteverschil van 21 cm. Deze waarde van 21 cm is niet de oorafstand of een daarmee samenhangende grootte, maar een constante, k , waarover VON HORNPOSTEL en WERTHEIMER verder niets kunnen mededeelen. De waargenomen richtingshoek φ en het wegverschil a zijn nu verbonden door de formule:

$$a = k \sin \varphi.$$

Bij laboratoriumproeven is het mogelijk nog grooter tijdsverschillen tusschen de ooren aan te brengen dan $63 \cdot 10^{-5}$ sec. Ook dan is nog een richtingsgewaarwording te verkrijgen, die met toenemend tijdsverschil steeds onscherper wordt. Bedraagt het tijdsverschil $120 \cdot 10^{-5}$ sec. gelukt het niet meer, de impressies aan beide ooren tot één geluidsbeeld samen te voegen; de impulsen worden dan gescheiden waargenomen.

¹⁾ J. L. van Soest en P. D. Groot. Physica: 9, 111, 1929.

Willen we de localisatie van zuiver sinusvormige tonen met deze theorie verklaren, dan doen we het beste, met de aan de ooren optredende faseverschillen uit te drukken in tijdsverschillen tusschen overeenkomstige trillingstoestanden aan de ooren.

Wij willen de verschijnselen, die optreden bij de localisatie van zuivere tonen, nader toelichten aan de hand van de opvatting van VON HORNBORSTEL en WERTHEIMER. De proeven waren zóó ingericht, dat door middel van hoofdtelefoons zuivere tonen met gelijke intensiteit aan de ooren werden toegevoerd, maar zóó, dat tusschen de twee ooren een bepaald faseverschil kon worden ingesteld. Zooals we reeds hebben gezien, bedraagt het maximaal bij het natuurlijke hooren optredende tijdsverschil 63.10^{-5} sec. Dit is het geval, als de geluidsbron zich in het verlengde der ooras bevindt; of, aannemende, dat het hoofd door een bol mag worden voorgesteld, de richting van de geluidsbron over een hoek van 90° met het middelloodvlak van de ooras is gedraaid.

Wordt nu de frequentie van de bij het experiment gebruikte toon zoo gekozen, dat een faseverschil van 90° overeenkomt met een tijdsverschil van 63.10^{-5} sec., wat bij een toon van 400 per/sec het geval is, dan hebben we te doen met het geval, dat de schijnbare richting van de geluidsbron onder dezelfde hoek wordt waargenomen, als de fasehoek tusschen de telefoonstroomen bedraagt. Voor één toon met frequentie van 400 per/sec gaat dus de hiervoor genoemde phasetheorie van BOWLKER op.

Voor fasehoeken, grooter dan 90° , wordt het geluidsbeeld weer onder een kleinere hoek waargenomen en voor fasehoeken van 180° — 360° herhaalt het verschijnsel zich, maar nu aan de andere kant van het middelloodvlak van de ooras. Werd de proef gedaan met een toon van 800 per/sec, waarbij dus een tijdsverschil van 63.10^{-5} sec. overeenkomt met een phasedraaiing van 180° , dan trad het volgende verschijnsel op. Nam de fasehoek toe van 0° — 180° , dan werd de schijnbare richting van de geluidsbron waargenomen onder een hoek, die varieerde van 0° — 90° . Veranderde de fasehoek van 360° — 180° , dan werd hetzelfde effect waargenomen, maar nu aan het andere oor. Wordt nu de frequentie nog meer verhoogd, bijv. tot boven 1600 per/sec, dan kon voor de grootst optredende faseverschillen een tijdsverschil van 63.10^{-5} sec. niet meer bereikt worden en kon dus de geluidsbron

niet meer in het verlengde der ooras worden waargenomen. Soms werden verschillende geluidsbeelden tegelijk waargenomen. Dat dit mogelijk is, is eenvoudig in te zien, als men nagaat, dat bij een toon met frequentie van 1600 per/sec een phasedraaiing van 360° zoowel geïnterpreteerd kan worden als een tijdsverschil van $63 \cdot 10^{-5}$ sec., als een tijdsverschil van 0 sec.

Uit deze beschouwingen volgt dus, dat de tijdsverschillentheorie van VON HORNBOSTEL en WERTHEIMER niet toegepast mag worden op tonen met een frequentie hooger dan 1600 per/sec. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat voor dat gebied bij het normale hooren belangrijke intensiteitsverschillen aan de ooren kunnen optreden. ¹⁾

Metingen van VON BÉKÉSY ²⁾ hebben de theorie van VON HORNBOSTEL en WERTHEIMER betreffende de tijdsverschillen ten deele bevestigd en ten deele onvolledigheden daarvan aangetoond. Zijn proeven zijn zóó ingericht, dat hij met gelijke intensiteiten, maar met instelbare tijdsverschillen zuiver sinusvormige tonen, geruisch en knallen aan beide ooren kan toevoeren. Ook hij neemt waar, dat met knallen de beste richtingsgewaarwording wordt verkregen. Brengt hij nu een tijdsverschil aan, dan beweegt het geluidsbeeld zich naar opzij en bij een tijdsverschil: $t = k$ (constante van VON HORNBOSTEL en WERTHEIMER) bevindt het geluidsbeeld zich bijna in de ooras. Wordt het tijdsverschil nog meer vergroot, dan wordt de uitwijking van het geluidsbeeld nog grooter, terwijl het zich tevens van het hoofd schijnt te verwijderen en voor de waarde $t = 2k$ is het in het verlengde der ooras aangekomen.

Ook voor het gebied $k \leq \Delta t \leq 2k$ geldt de betrekking van VON HORNBOSTEL en WERTHEIMER, alleen moet daar de constante k worden vervangen door een andere constante: h . Uit metingen is gebleken, dat tusschen k en h de volgende betrekking bestaat:

$$h = 0.35 k.$$

De baan, die het geluidsbeeld beschrijft, ziet er schematisch als volgt uit:

¹⁾ H. Hecht. Naturwissensch. 10, 107, 1922. 10, 330, 1922.

H. Carsten en H. Salingen, Naturwissensch. 10, 329, 1922.

²⁾ G. von Békésy. Phys. ZS. 31, 824, 1930. 31, 857, 1930.

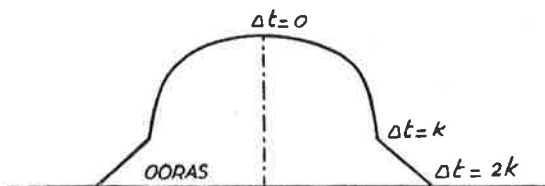


Fig. 2.

Baan, die het geluidsbeeld van een knal beschrijft door tijdsverschillen tusschen de ooren aan te brengen.

Na eenige oefening gelukt het ook, het geluidsbeeld andere banen te laten doorloopen, en wel achter het hoofd om en dwars door het hoofd heen langs de ooras. Het is zelfs mogelijk, het geluidsbeeld van de eene baan op de andere te laten springen.

Gelukt het nu bij het aanbrengen van tijdsverschillen het geluidsbeeld langs de baan, samenvallende met de ooras, te laten verschuiven, dan blijkt, dat de geschatte verplaatsing van het geluidsbeeld uit het midden evenredig is met het aangebrachte tijdsverschil. Dit is ook te verwachten, als men aanneemt dat het geluidsbeeld, als het om het hoofd heen loopt, een cirkelboog beschrijft. De evenredigheidsconstante is ook hier verschillend voor

$$0 \leq \Delta t \leq k \text{ en } k \leq \Delta t \leq 2k.$$

De constante k blijkt van waarnemer tot waarnemer verschillend te zijn. Ook is ze voor de meeste waarnemers afhankelijk van de intensiteit van het geluid, dat aan de ooren wordt toegevoerd. Slechts voor enkele personen is dit niet het geval en deze leenen zich het best voor het doen van experimenten, daar hun waarnemingen vrijwel niet door vermoeidheid worden beïnvloed.

In tegenstelling met de theorie van VON HORNBOSTEL en WERTHEIMER, die het richtingshooren uitsluitend willen verklaren met tijdsverschillen, hebben HARTLY en FRY ¹⁾ een theorie ontwikkeld, waarbij zoowel aan de ooren optredende intensiteits- als phaseverschillen een rol spelen.

Aannemende, dat het hoofd een massieve bol is in de vrije ruimte

¹⁾ A. V. L. Hartley, Phys. Rev. 13, 373, 1919.

A. V. L. Hartley, T. H. C. Fry. Phys. Rev. 18, 431, 1921.

en dat de ooren voorgesteld kunnen worden door 2 diametraal gelegen plaatsen op zoo'n bol, berekenden zij de aan de ooren optredende intensiteits- en faseverschillen, als een geluidsbron, die zuiver sinusvormige tonen produceert, in een horizontaal vlak op verschillende afstanden om het hoofd heendraait. Zij deden dit voor tonen met frequenties van 310, 620, 930, 1240 en 1860 per/sec. Voor een gegeven toon en een bepaalde stand van de geluidsbron ten opzichte van den waarnemer, zoowel wat betreft richting en afstand, treedt één bepaalde combinatie van intensiteits- en faseverschil aan de ooren van den waarnemer op. HARTLEY en FRY verwachtten, dat omgekeerd, als aan de ooren die bepaalde combinatie van intensiteits- en faseverschil optreedt, zoowel richting als afstand zouden kunnen worden waargenomen. Door oefening en gewoonte zouden de hersenen in staat zijn deze bepaling te doen.

Om te verklaren, dat ook nog een richtingsgewaarwording kan worden verkregen bij een combinatie van intensiteits- en faseverschillen, die bij het natuurlijke hooren niet kunnen optreden, nemen zij aan dat de mensch de mogelijkheid bezit, onbewust de waarnemingen zóó te corrigeren, dat zij in overeenstemming zijn met waarden, die normaal wel kunnen bestaan.

De verificatie van bovenstaande theorie is uitgevoerd door WIGHTMAN en FIRESTONE.²⁾

Met behulp van in een goed nagemaakte pop aangebrachte microfoons heeft FIRESTONE de amplitudeverhouding en het faseverschil van de geluidsdrukken, die optreden aan de ooren, gemeten als een geluidsbron, die zuiver sinusvormige tonen produceert, in een horizontaal vlak om het hoofd heendraait. Er werd gemeten met de volgende frequenties: 256, 1024 en 1944 per/sec en op afstanden van 20, 50, 100 en 400 cm van het hoofd. Men besteedde veel zorg aan de zuiverheid van de gebruikte tonen, die door een puntvormige geluidsbron werden teweeggebracht en de pop was volkomen vrij in de ruimte opgesteld. Het eenige oppervlak, waar het geluid aan kon reflecteeren, was de pop zelf.

Bij 256 per/sec is er een goede overeenstemming tusschen de door FIRESTONE gemeten en de door HARTLEY en FRY berekende

²⁾ F. A. Firestone. Journ. Acoust. Soc. Amer. 2, 260, 1930.

E. Wightman en F. A. Firestone. Journ. Acoust. Soc. Amer. 2, 270, 1930.

waarde van de aan de ooren optredende amplitudeverhouding van de geluidsdruk. De gemeten amplitudeverhouding is ongeveer 13 % kleiner dan de berekende. Dit is hierdoor te verklaren, dat de buiging van het geluid om het hoofd door de nek wordt beïnvloed.

Ook wat de phaseverschillen betreft, is er een goede overeenkomst. Voor een stand van de geluidsbron met azimuth van 100° vinden we:

$$v = 256 \text{ per/sec.}$$

| Afstanden | Phaseverschil in graden | |
|-----------|-------------------------|----------|
| | Gemeten | Berekend |
| 400 cm | 71 | 73 |
| 100 cm | 71 | 70 |
| 50 cm | 72 | 74 |
| 20 cm | 73 | 68 |

De hier optredende afwijkingen zijn waarschijnlijk te wijten aan reflecties aan de schouders.

De veronderstelling van HARTLEY en FRY dat het optredende phaseverschil beslissend zou zijn voor de afstandsgewaarwording, moet tonen met frequenties lager dan 256 per/sec wel foutief worden geacht, daar het phaseverschil hier niet ondubbelzinnig van de afstand afhangt. Zie fig. 3 en de hier bovenstaande tabel. In een normaal geval, als ook nog reflecties aan de bodem optreden, zou de verwarring nog grooter zijn.

Bij 1024 per/sec is de gemeten waarde van de amplitudeverhouding weer systematisch 13 % kleiner dan de berekende en de gemeten phasehoek hangt hier ondubbelzinnig af van de afstand.

De resultaten van de metingen bij 1944 per/sec geven groote afwijkingen te zien ten opzichte van de berekende waarde bij 1860 per/sec. Bij een azimuth van 50° — 80° en 100° — 130° was de phasedraaiing niet meer te meten. Een azimuthverandering van 5° in die gebieden kon de phase over meer dan 360° doen draaien.

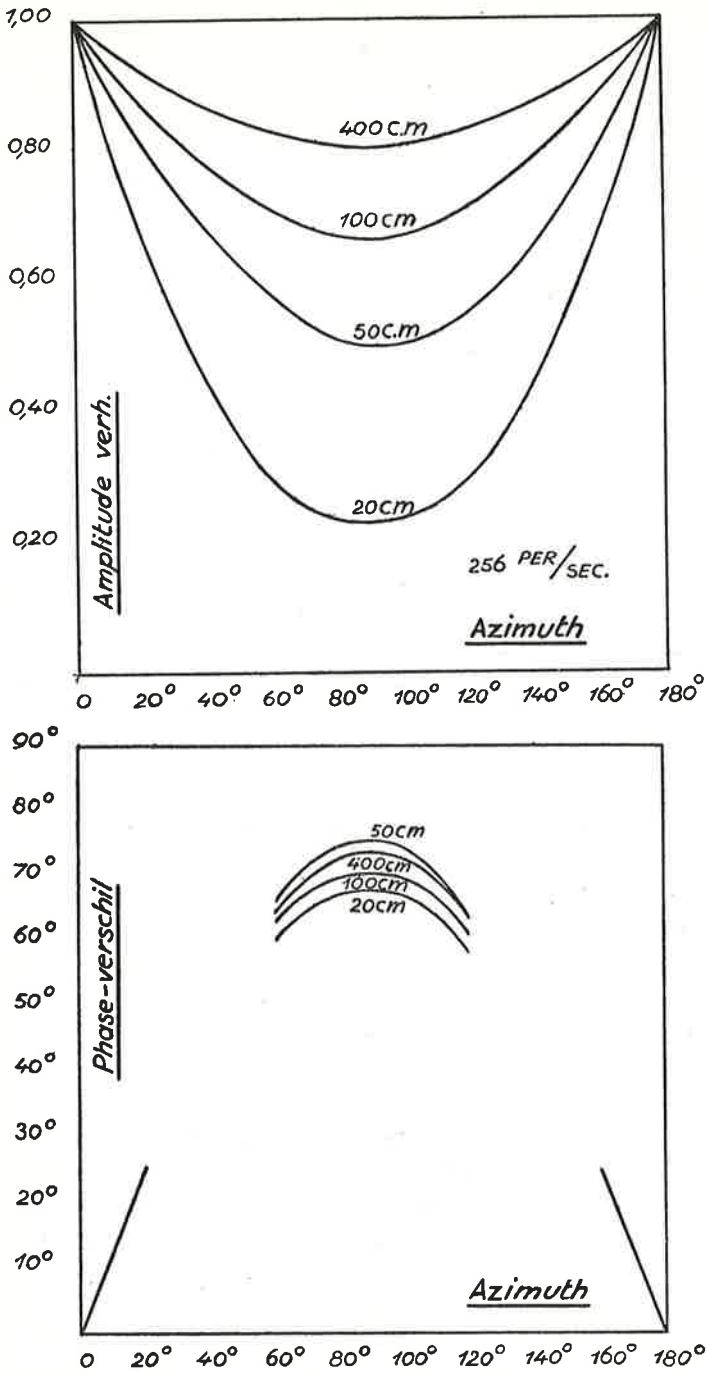


Fig. 3.

In deze figuur zijn aangegeven de door **Firestone** gemeten waarden van amplitudeverhoudingen en faseverschillen van de geluidsdrücken die aan de ooren optreden, als een geluidsbron die een toon van 256 per/sec voortbrengt, op verschillende afstanden om het hoofd heen draait.

De krommen, die het verband aangeven tusschen azimuth, amplitudeverhouding en phasedraaiing aan de ooren, uitgezet voor de verschillende afstanden, loopen zoo grillig, dat het niet waarschijnlijk is, dat van een zuivere toon met een frequentie van ongeveer 2000 per/sec de richting kan worden bepaald.

Conclusie:

Uit de metingen is gebleken, dat voor het frequentiegebied beneden 1000 per/sec de aan de ooren optredende amplitudeverhoudingen en phaseverschillen nauwkeurig berekend kunnen worden, aannemende, dat het hoofd een totaal reflecteerende bol in de vrije ruimte is.

De beste resultaten voor een reëel hoofd worden verkregen door de berekende waarden van de amplitudeverhouding aan een bol met 13 % te verminderen.

Aansluitend op het hierboven besproken werk van FIRESTONE, doen WIGHTMAN en FIRESTONE het volgende experiment. Een zuivere toon van 256 per/sec wordt met bepaalde amplitudeverhouding en phaseverschil van de geluidsdrukken aan de ooren van een waarnemer toegevoegd. Uitgaande van het standpunt, dat de richtingsgewaarwording gegeven wordt door het aan de ooren optredende phaseverschil en tengevolge van het feit, dat voor een bepaalde richting van de geluidsbron de amplitudeverhouding van de geluidsdrukken aan de ooren afneemt met toenemende afstand van de geluidsbron, onderzoeken zij, of zoowel een richtings- als een afstandsgewaarwording wordt verkregen.

De volgende phaseverschillen werden gebruikt: -90° , -70° , -20° , 0° , 20° , 40° , 70° en 90° . Het minteeken duidt aan, dat de phase aan het linker oor voor is. Bij ieder phaseverschil konden de volgende amplitudeverhoudingen optreden: -0.12 , -0.25 , -0.50 , 1.00 , 0.50 , 0.25 , 0.12 . Het minteeken geeft aan, dat de amplitude aan het linker oor grooter is.

De resultaten, die WIGHTMAN en FIRESTONE verkrijgen, vatten zij in het kort als volgt samen. In het werk van sommige onderzoekers wordt de suggestie gewekt, dat de richting van een zuivere toon nauwkeurig uit het aan de ooren optredende phaseverschil is te bepalen. Bij slechts drie van de acht waarnemers werd hier de richtingsgewaarwording beïnvloed door het phase-

verschil en zelfs van deze drie personen waren de resultaten niet reproduceerbaar. Bij vrijwel alle waarnemers werd de richtingsge-
waarwording beïnvloed door de amplitudeverhouding, doch een
afstandsgewaarwording werd hierdoor niet verkregen.

De reden, waarom er zooveel tegenspraak is in de literatuur
over het richtingshooren, schrijven WIGHTMAN en FIRESTONE toe
aan het feit, dat van zuivere tonen de richting vrijwel niet te be-
palen is. Voor samengestelde tonen is dat wel het geval. Als de
richting van samengestelde tonen met een laag timbre kan worden
vastgesteld, moet het faseverschil hier een belangrijke rol bij
spelen, daar op eenige afstand de intensiteitsverhouding aan de
ooren voor dergelijke geluiden vrijwel niet van de richting afhangt.
Daar er voor tonen met frequentie hooger dan 1000 per/sec vrijwel
geen fase-effect bekend is, zal voor dit frequentiegebied, indien
daar richtingswaarneming mogelijk is, de amplitudeverhouding de
beslissende factor moeten zijn.

Onderzoekingen omtrent de invloed van intensiteitsverschillen
alléén zijn gedaan door STEWART en HOVDA ¹⁾). Zuiver sinus-
vormige tonen met een frequentie van 256, 512 en 1024 per/sec
werden zonder faseverschil en met intensiteitsverschillen aan de
ooren van verschillende waarnemers toegevoerd. Het bleek, dat
de hoekverdraaiing van de geluidsbron evenredig was met de
logarithme van de intensiteitsverhouding aan de ooren. De schijn-
bare richting van de geluidsbron kon veranderen van 0 tot bijna
90°. De constante k van deze logaritmische betrekking, d.w.z. de
grootte van de richtingsverandering van de geluidsbron bij een
intensiteitsverhouding: e aan de ooren, liep voor verschillende
waarnemers bij één frequentie nogal uiteen en nam verder voor
iedere waarnemer af met toenemende frequentie.

Dat dit laatste globaal genomen het geval moet zijn, kan zoo
verklaard worden, dat bij toenemende frequentie de schaduw-
werking van het hoofd groter wordt en dus voor een bepaalde
richting van de geluidsbron een groter intensiteitsverschil aan de
ooren is te verwachten. Evenals WIGHTMAN vond STEWART, dat

¹⁾ G. W. Stewart. Phys. Rev. 15, 425, 1920.

G. W. Stewart en Hovda. Psych. Rev. 25, 242, 1918.

sommige waarnemers in bepaalde frequentiegebieden geen intensiteitseffect hadden. Ook STEWART heeft berekend welke intensiteitsverhoudingen aan de ooren zouden moeten optreden, als een geluidsbron, die zuivere tonen produceert, om het hoofd heendraait. De verschillende richtingen van de geluidsbron, corresponderende met deze berekende waarden, vergelijkt hij met die, welke door één van zijn waarnemers experimenteel zijn bepaald. Het resultaat is weergegeven in fig. 4.

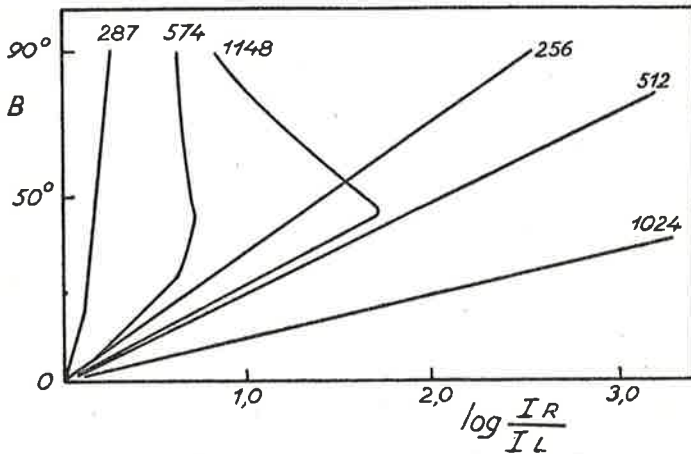


Fig. 4.

In deze figuur zijn aangegeven de door Stewart berekende en experimenteel bepaalde waarden van de intensiteitsverhoudingen, die corresponderen met een bepaalde uitwijking van de geluidsbron uit het mediane vlak van het hoofd. De rechte lijnen geven de gemeten waarden; de krommen de berekende waarden aan. De erbij geschreven getallen, de frequentie. $\frac{I_R}{I_L}$ stelt voor de intensiteitsverhouding tusschen rechter en linker oor.

De conclusie, welke STEWART uit deze resultaten trok, is, dat in het door hem onderzochte frequentiegebied intensiteitsverhoudingen een ondergeschikte rol spelen. Daar voor tonen boven 1000 per/sec ieder phase-effect onbreekt, meent hij, dat hier intensiteitsverhoudingen wel belangrijk kunnen zijn, doch dan in die zin, dat de kwaliteitsverschillen, die zij bij complexe geluiden aan de ooren teweegbrengen, de richtingsbepalende factoren zijn. Uit eigen proeven is echter gebleken, dat dit laatste niet juist is.

Belangrijk is het experiment van STEWART, waarin, behalve

een vaste intensiteitsverhouding, nog phaseverschillen aan de ooren van een waarnemer waren toegevoerd. De uitwijking van het geluidsbeeld is dan te bepalen uit die uitwijkingen, welke teweeggebracht worden door intensiteitsverhouding en phaseverschillen afzonderlijk.

Het door STEWART gevonden logarithmische verband tusschen hoekverdraaiing van het geluidsbeeld en intensiteitsverhouding aan de ooren is door VON BÉKÉSY ¹⁾ die dezelfde experimenten met knallen deed, bevestigd.

Ook belangrijk is nog een experiment door VON BÉKÉSY gedaan met knallen, waaruit blijkt, dat een uitwijking van het geluidsbeeld ten gevolge van een éézijdige intensiteitsverhooging kan worden gecompenseerd door een tijdsverschil tusschen de ooren aan te brengen. Ook hier vinden we dus een aanwijzing, dat er een samenwerking wat betreft tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen, moet bestaan.

Een experiment, waarbij deze samenwerking naar voren komt, is gedaan door VAN SOEST ²⁾. Een gummislang van 20 m lengte met een binnendiameter van 12 mm wordt in een cirkelvorm op een geluiddempende bodem gelegd en aan de beide einden met de ooren van den waarnemer verbonden. Een stemvork met een grondtoon van 128 per/sec wordt aangeslagen en met de steel op verschillende plaatsen van de slang gedrukt, nadat de eventueel optredende boventonen zijn gedempt. Als de stemvork op een bepaald punt van de slang wordt gedrukt, zal de waarnemer een zekere richtingsgewaarwording krijgen. De waargenomen richting wordt door VAN SOEST nu niet door een bepaalde hoek vastgelegd, maar door een waardeeringscijfer en wel als volgt: wordt het geluidsbeeld met minder of meer zekerheid rechts waargenomen, dan wordt deze gewaarwording resp. met de cijfers: + 1, + 2 of + 3 gewaardeerd.

Een middengewaarwording krijgt het cijfer 0 en minder of meer zekere linksgewaarwordingen resp. de cijfers: — 1, — 2, — 3. De cijfers 1, 2 en 3 zeggen dus niets omtrent de waargenomen richting, maar duiden alleen aan, dat het geluid met min of meer

¹⁾ G. von Békésy. Phys. ZS. 31, 857, 1930.

²⁾ J. L. van Soest. Physica. 9, 271, 1929.

stelligheid buiten het middelloodvlak van de ooras wordt waargenomen.

Voor elk punt van de slang wordt dus een waardeeringscijfer verkregen. Zet men nu de schaalverdeling der slang uit op een abcissenas en de bij de punten dier verdeling behorende waardeeringscijfers als ordinaten, dan verkrijgt men een „waardeeringskromme”.

Wordt dit experiment in plaats van met stemvorktrillingen met periodieke impulsen gedaan, dan verkrijgt men een kromme, die buiten het midden van de slang zeer snel tot de limietwaarde 3 der waardeering stijgt.

Bij sinusvormige trillingen is de kromme veel gecompliceerder en het resultaat is geschematiseerd weergegeven in fig. 5.

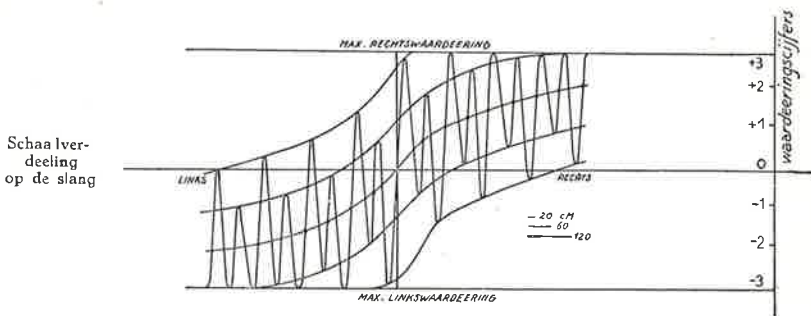


Fig. 5.

Deze figuur geeft geschematiseerd weer de bij het hierboven beschreven experiment van van Soest verkregen „waardeeringskromme”.

Bij het beschouwen van deze kromme nemen we de volgende bijzonderheden waar:

- 1) De kromme vertoont primaire en secundaire maxima en minima.
- 2) Deze vier groepen van extreme waarden liggen op vier krommen, die een flauw hellend verloop hebben, terwijl zich tevens een middellijn laat trekken met hetzelfde verloop.
- 3) De abscisafstand van extreme waarden, die in één bepaalde groep behoren, bedraagt 120 cm.

De waardeeringskromme wordt door VAN SOEST als volgt verklaard. Men mag aannemen, dat de golflengte der trilling in de buisruimte met 240 cm overeenkomt. Een periodiciteit van 120 cm

is dus te verwachten, daar een verplaatsing van de stemvork over een halve golflengte (overeenkomende met een heele golflengte wegverschil links en rechts) bij den waarnemer een overeenkomstige richtingsgewaarwording moet opwekken. Deze periodiciteit komt overeen met de afstand van 120 cm tusschen de primaire maxima of minima in fig. 5. De flauwe helling der geteekende lijnen, waarop de extreme waarden der kromme liggen, moet veroorzaakt worden door een neveneffect: dit moet een intensiteits-effect zijn, optredende ten gevolge van de demping, die de slang op de trillingen uitoefent. Het intensiteitsverschil, optredende aan de ooren, moet dus grooter zijn naarmate de stemvork zich meer uit het midden bevindt.

Zooals fig. 5 laat zien, toont ook dit experiment aan, dat wanneer tijds- en intensiteitsverschillen tezamen optreden, de totale uitwijking van het geluidsbeeld verkregen wordt door een additiviteit van de uitwijkingen, verkregen door ieder van deze factoren. Zou dit intensiteitseffect bij het experiment uitgeschakeld kunnen worden, dan zou de waardeeringskromme er volgens VAN SOEST uit moeten zien als aangegeven in fig. 6.

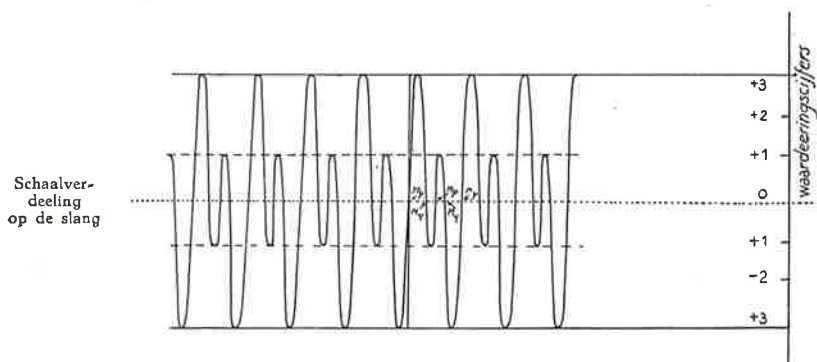


Fig. 6.

Deze figuur geeft weer hoe figuur 5 er uit zou zien, als bij het experiment van van Soest geen intensiteitseffect zou optreden.

Nu treedt een volledige periodiciteit op, welke door VAN SOEST met het tijdsverschil- of phase-effect wordt verklaard. We zullen hier niet nader op in gaan.

Een onderzoek betreffende geluiden, welke zich het best laten localiseeren, is gedaan door REICH en BEHRENS¹⁾. Wat zuiver sinusvormige tonen betreft, wordt de beste richtingsgewaarwording verkregen in het gebied van 400—800 per/sec. Zoowel bij hogere als lagere frequenties wordt de gewaarwording moeilijk verkregen en boven 1600 per/sec ontbreekt ze vrijwel geheel. Veel beter dan zuivere tonen alléén, kunnen combinaties van enkele zuivere tonen, geruisch en knallen waargenomen worden; hiervoor geven zij enkele algemeene regels aan.

- 1) Beeldt men de aan de ooren optredende geluidsdruk af als functie van de tijd, dan zijn voor de richtingsgewaarwording die plaatsen van de geluidsbeeldkromme beslissend, waar $\frac{d p}{d t}$ maximaal is. Hoe grooter $\frac{d p}{d t}$ is, des te scherper is de richtingsgewaarwording.
- 2) Is de richtingsgewaarwording niet ondubbelzinnig bepaald, doordat verschillende gelijkwaardige mogelijkheden aanwezig zijn, dan kunnen secundaire factoren een rol spelen en wordt óf die richting gekozen, die door ervaring, bijv. bij het inzetten van het geluid is waargenomen, óf die overeenkomende met het kleinste tijdsverschil.
- 3) De richtingsgewaarwording is slechter, naarmate meer gelijkwaardige mogelijkheden binnen een tijdsbestek van $6 \cdot 10^{-4}$ sec. aanwezig zijn.
- 4) Bovendien kan een druktoename in het eene oor met een even steile drukafname in het andere oor tot een richtingsindruk worden gecombineerd. Op pag. 78 wordt dit aan de hand van een voorbeeld nader toegelicht.

Bij de toepassingen, die wij beoogen in de vorm van stereofonische geluidsweergave, speelt de reproductie van spraak en muziek een belangrijke rol. Nu kunnen we verwachten, dat de resultaten, verkregen door experimenten uitgevoerd met knallen en geruisch, hun geldigheid zullen behouden voor spraak en muziek.

Uit het voorgaande overzicht mogen we de conclusie trekken, dat zoowel:

¹⁾ Reich en Behrens. ZS. f. techn. Phys. 14, 1, 1933.

- 1) intensiteitsverhoudingen als
- 2) verschillen in tijd van aankomst van het geluid aan beide ooren een rol zullen spelen, terwijl
- 3) voor het geval beide factoren tegelijk optreden, de waargenomen plaats van het geluidsbeeld moet kunnen worden afgeleid uit de beide effecten afzonderlijk.

In het volgende hoofdstuk zal worden nagegaan, in hoeverre de hiervoor beschreven experimenten moesten worden aangevuld, in het bijzonder betreffende de wijze, waarop het intensiteits- en het tijdseffect moeten worden gecombineerd. Bovendien zal daar blijken, dat ook het werk van REICH en BEHRENS voor het inzicht in de verschijnselen, optredende bij de stereofonische weergave van geluid, van belang is en wel voornamelijk wat betreft hun conclusie, dat een druktoename in het ééne oor met een even steile drukafname in het andere oor tot een richtingsgewaarwording aanleiding kan geven.

De richtingsbepaling van geluidsbronnen, die niet in het horizontale vlak door de ooras liggen.

Het richtingsbepalen is niet beperkt tot het horizontale vlak. Ook richtingen van geluidsbronnen, die daar een hoek mee maken, laten zich waarnemen, zij het iets minder nauwkeurig. In het midden gelaten of de richtingsgewaarwording tot stand komt door tijds- of intensiteitsverschillen bepalen deze toch alleen de hoek, welke de richting van de geluidsbron met de ooras maakt. De mogelijke richtingen liggen dan op een omwentelingskegel om de ooras heen met als top het midden van de ooras. Er moet dus nog een factor zijn, die ons één van deze richtingen als de juiste doet kiezen, die van andere aard is en aansluit op de informatie, geleverd door tijds- en intensiteitsverschillen.

WALLACH ¹⁾ heeft aangetoond, dat de keuze van die richting wordt bepaald door kleine bewegingen van het hoofd. Dat dit zoo zou moeten zijn, was reeds eerder door VAN SOEST ²⁾ verondersteld.

¹⁾ H. Wallach. Journ. Acoust. Soc. Amer. 10, 270, 1939.

²⁾ J. L. van Soest. Physica 9, 271, 1929.

Noemt men ψ de hoek, die de richting naar de geluidsbron met de ooras maakt en β de hoekverdraaiing van de ooras, als het hoofd om een verticale as draait, dan is $\frac{d\psi}{d\beta}$ beslissend voor de hoek, die de richting van de geluidsbron met het horizontale vlak maakt. Voor een richting in het horizontale vlak is $\frac{d\psi}{d\beta} = 1$; voor de richting loodrecht daarop: $\frac{d\psi}{d\beta} = 0$.

Voor twee dezelfde richtingen, maar naar „voor” of naar „achter” gericht, is $\frac{d\psi}{d\beta}$ gelijk, doch tegengesteld van teeken. Nu

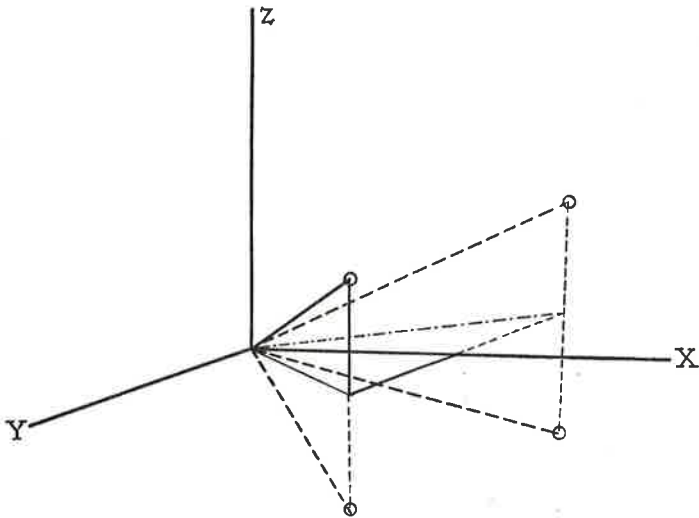


Fig. 7.

Deze figuur laat zien, dat voor een bepaalde waarde van $\left|\frac{d\psi}{d\beta}\right|$ nog vier verschillende richtingen mogelijk zijn.

blijft nog één dubbelzinnigheid over, n.l. of de geluidsbron boven of onder het horizontale vlak door de ooras ligt. Om daarover te kunnen beslissen, is nog een andere beweging van het hoofd noodig. Deze beweging kan klein zijn, daar zij geen richtingsbepaling

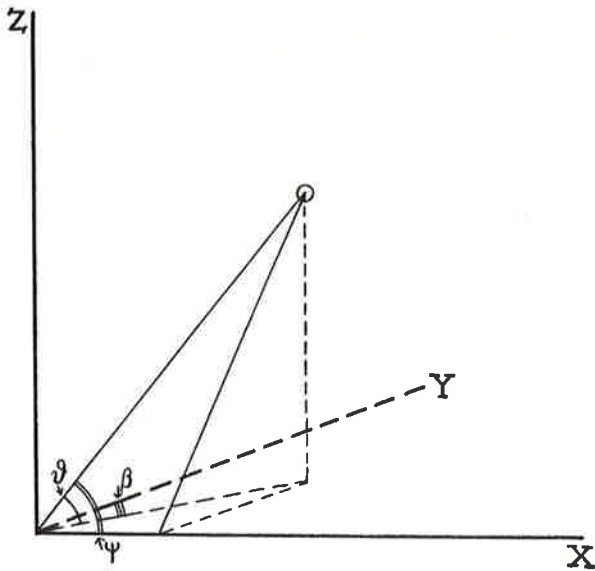


Fig. 8.

Uit deze figuur kan de hiernagenoemde betrekking:
 $\sin (90-\psi) = \sin \beta \cos \vartheta$ afgeleid worden.

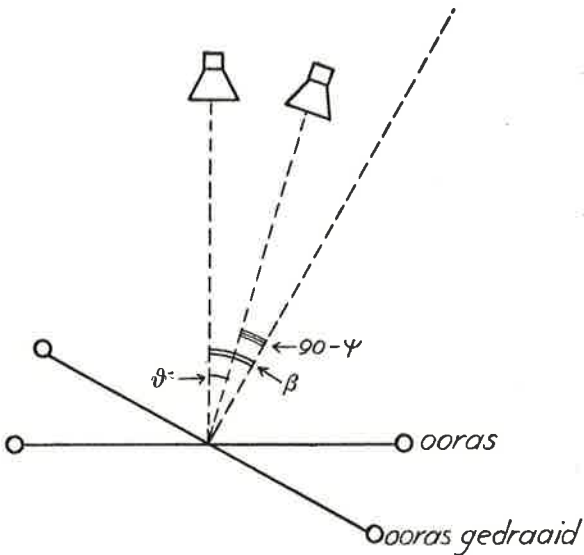


Fig. 9.

De formule: $\alpha = \beta - (90 - \psi)$ kan eenvoudig uit deze figuur afgeleid worden. We zien, dat als de oorras over een hoek β draait, de richting van de geluidsbron een hoek ψ met de oorras maakt.

hoeft te geven, maar alleen een keuze uit twee mogelijkheden moet toelaten. Zie fig. 7.

Daar een natuurlijke beweging van het hoofd er nooit één is om een vaste as, is daarin voorzien.

Om aan te toonen, dat het proces werkelijk zoo verloopt, als hierboven is aangegeven, doet WALLACH het volgend experiment. In een halve cirkel voor en om het hoofd van den waarnemer heen plaatst hij een groot aantal luidsprekers, en wel in het horizontale vlak door de ooras. Aan het hoofd van den waarnemer is een schakelaar bevestigd, zoodanig dat wanneer hij recht vooruit kijkt, de luidspreker midden voor hem is ingeschakeld en wanneer hij het hoofd om een verticale as draait, de luidsprekers achtereenvolgens om beurten worden ingeschakeld. Door de gelijke afstand der luidsprekers te wijzigen kan men $\frac{d\psi}{d\beta}$ alle waarden geven tusschen 0 en 1. Neemt men in zoo'n geval de hoek met het horizontale vlak waar, die bij de waarde van $\frac{d\psi}{d\beta}$ behoort, terwijl het geluid in werkelijkheid uit een richting *in* het horizontale vlak komt, dan is dit een bevestiging van de hierboven aangegeven veronderstellingen.

Noemt men nu ϑ de hoek, die de waargenomen „richting” van de geluidsbron met het horizontale vlak maakt, dan bestaat tusschen de hoeken ψ , β en ϑ de volgende eenvoudige betrekking:

$$\sin(90 - \psi) = \sin\beta \cos\vartheta. \quad (\text{Zie fig. 8})$$

Beperken we ons nu tot gevallen, dat β en $90 - \psi$ niet te groot zijn, dan mogen we schrijven:

$$(90 - \psi) = \beta \cos\vartheta.$$

is: $\alpha = \beta - (90 - \psi)$, (zie fig. 9) of omgewerkt:

$$\alpha = (1 - \cos\vartheta) \cdot \beta$$

β is vastgelegd op 3° , zijnde de hoek, die het hoofd moet draaien om een volgende luidspreker in te schakelen. Wil men dus een bepaalde geluidsrichting, die een hoek met het horizontale vlak maakt, verwezenlijken, dan is de onderlinge hoek van 2 opeenvolgende luidsprekers bepaald door de formule:

$$\alpha = 3(1 - \cos\vartheta)$$

α uitgedrukt in graden. De resultaten geven een goede overeen-

stemming met de theorie, zoals de volgende tabel, die de resultaten van enkele metingen weergeeft, aantoont.

| | | | |
|--------------------|-----|-----|------|
| Waar te nemen hoek | 60° | 78° | 120° |
| Waargenomen hoeken | 64° | 80° | 130° |
| | 61° | 75° | 122° |
| | 60° | 75° | 122° |
| | 55° | 75° | 119° |
| | 50° | 70° | 118° |
| | 48° | | 115° |
| | 43° | | 114° |

De formule, waaruit we a hebben berekend, bevat ϑ als een cosinusfunctie. Dit wil dus zeggen, dat de waarden van ψ en a slechts weinig verandering ondergaan als ϑ varieert tusschen 0° en 30°. Dit houdt in, dat het experiment, op deze wijze uitgevoerd, onnauwkeurig wordt, als we hoeken willen verwezenlijken tusschen 0° en 30° met het horizontale vlak. Deze hoeken kunnen gemakkelijk worden gerealiseerd door de heele opstelling 90° om de ooras te laten draaien. De luidsprekers komen dan in een halve cirkel boven het hoofd, de schakelaar wordt aan het achterhoofd bevestigd en het hoofd zelf maakt een schommelende beweging om een horizontale as loodrecht op de ooras. De hoeken 30° en 20° met het horizontale vlak kan men op deze wijze duidelijk gescheiden waarnemen.

| | | |
|---------------------|-----|-----|
| Waar te nemen hoek: | 30° | 20° |
|---------------------|-----|-----|

| | Waarnemer | | | | |
|--------------------|-----------|------|--------|------|--------|
| Waargenomen hoeken | A | 35° | voor | 19° | voor |
| | B | 33° | achter | 15° | achter |
| | B | 22° | achter | 13° | achter |
| | C | 22° | voor | 17½° | achter |
| | D | 35° | achter | 27½° | achter |
| | E | 43½° | achter | 37½° | achter |
| | F | 30° | voor | 16° | achter |
| | G | 46° | voor | 31° | voor |

Door dit laatste experiment kan niet beslist worden of de geluidsbron voor of achter den waarnemer is. Beide richtingen komen dan ook voor. Zoo zouden bij het eerste experiment, waar het hoofd om een verticale as draait, richtingen boven en onder het horizontale vlak door de ooras moeten worden waargenomen. Merkwaardigerwijze wordt dan bijna altijd een richting boven het horizontale vlak waargenomen.

Als bij een persoon deze experimenten niet gelukten bleek, dat ook bij normaal luisteren het vermogen ontbrak, geluidsbronnen buiten het horizontale vlak te localiseeren.

Ook de hoek $\vartheta = 180^\circ$ kan verwezenlijkt worden; dat wil zeggen, dat met de luidsprekers in een halve cirkel vóór het hoofd, men door kleine hoofdbewegingen het geluid van achteren hoort komen. Dit experiment faalde bij geen enkelen waarnemer en dit is zeer belangrijk. Ook bij een stilstaand hoofd kan men onderscheiden of een geluidsbron voor of achter is. De verklaring daarvan ligt in het verschil in timbre, dat het geluid in deze twee gevallen heeft, welk verschil zijn oorzaak vindt in de onregelmatige vorm van het hoofd. Dat dit in het algemeen echter niet de factor is, die de voor of achter bepaling mogelijk maakt blijkt uit het laatste experiment, waar de waarnemer twee tegenstrijdige gewaarwordingen ontvangt, doch onfeilbaar die aanduidingen volgt, die hem gegeven worden door kleine bewegingen van het hoofd.

Uit het werk van WALLACH zien we, dat een richtingsgewaarwording buiten het horizontale vlak door de ooras bij stereofonische geluidswaargave niet kan worden verkregen. Het is immers niet mogelijk, de vast opgestelde microfoons in een opnameruimte bewegingen te laten uitvoeren, corresponderende met die van een luisteraar in de zaal. Een groot verlies voor de stereofonische geluidswaargave is dit niet, daar in de meest voorkomende gevallen de geluidsbronnen zich vrijwel in één horizontaal vlak bevinden (dialogen, hoorspelen, orkesten).

Het afstandshooren.

Hoewel over dit onderwerp al vele proefnemingen zijn gedaan, is het eerst aan VON BÉKÉSY¹⁾ gelukt, een verklaring van de optredende verschijnselen te geven.

¹⁾ G. von Békésy. Akust. ZS. 3, 21, 1938.

Vele onderzoekers hebben verondersteld, dat de intensiteit, waarmede een geluidsbron wordt waargenomen, of de verhouding direct waargenomen geluid tot nagalm geluid de afstandsgewaarwording zou kunnen geven ¹⁾ Dat dit niet het geval kan zijn, kan men als volgt aantonen: Vergelijkt men in een normaal gedempte kamer de knal van een vonk met een continu aangehouden sinusvormige toon van 3000 per/sec, dan geeft de knal een scherp localiseerbaar geluidsbeeld, ook wat de afstand betreft, hetgeen niet het geval is met de toon van 3000 per/sec. Wordt van beide geluidsbronnen de intensiteit verhoogd, dan neemt men voor de knal geen afstandsvariatie waar; voor de zuivere toon wel. We zien hieruit, dat, als de *eigenlijke afstandsgewaarwording* ontbreekt zooals hier bij de toon van 3000 per/sec, factoren die gewoonlijk een *afstandsvariatie* begeleiden, een rol gaan spelen.

Dat ook ponderomotorische krachten op het gehoorapparaat geen rol spelen, blijkt uit het feit, dat, als het trommelvlies aan een onderdruk wordt bloot gesteld, er geen variatie van afstandsgewaarwording optreedt. Evenmin als men het aan sterke luchtdrukvariaties van 10 per/sec (vrij van hogere harmonischen) blootstelt.

Een andere veronderstelling is nog geweest, dat reflecties van de geluidsgolven tusschen hoofd en geluidsbron een rol zouden spelen. Om dit na te gaan, werd een geluidsbron in de vorm van een nauwe pijp gekozen. De kamer, waarin het experiment geschiedde, was goed gedempt. Bracht men nu achter de opening van de pijp een scherm aan om de reflecties tusschen hoofd en geluidsbron te vergrooten, dan gaf dit geen verandering in afstandsgewaarwording. Het blijkt trouwens, dat het geluidsveld in de nabijheid van het hoofd niet noodig is voor het afstandshooren en dat slechts die trillingen noodig zijn, die door de gehoorgang het trommelvlies treffen. Sluit men n.l. één oor geheel af en het andere door een met watten opgevulde holle pijp (de watten dienen om de pijpresonanties te dempen), dan blijft het afstandshooren volledig behouden, en de waargenomen afstanden zijn die van de geluidsbron tot het open uiteinde van de pijp.

Om na te gaan, wat dan wel de oorzaak van de afstandsgewaar-

¹⁾ E. M. von Hornbostel: Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. pg. 616.

wording kan zijn, analyseert VON BÉKÉSY het geluidsveld van een pulseerende bol. De beschouwingen gelden dan voor lage frequenties ook voor de geluidsvelden van de meeste luidsprekers en van de mond. De snelheidspotential φ is een functie van de tijd t en de afstand r tot het middelpunt van de bol, en wel als volgt:

$$4 \pi r \varphi = f \left(t - \frac{r}{c} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Hierin stelt f een functie voor, te bepalen uit de randvoorwaarden, en c de geluidssnelheid. Noemen we de geluidsdruk p en de snelheid der luchtdeeltjes u en is ρ de dichtheid van lucht, dan is:

$$p = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad \text{en} \quad u = - \frac{\partial \varphi}{\partial r} \dots \dots \dots (2)$$

$$p = \frac{\rho}{4 \pi r} f' \left(t - \frac{r}{c} \right) \dots \dots \dots (3)$$

$$u = \frac{1}{4 \pi} \left\{ \frac{1}{c r} f' \left(t - \frac{r}{c} \right) + \frac{1}{r^2} f \left(t - \frac{r}{c} \right) \right\} \dots \dots (4)$$

De fysieke beteekenis van de functie f is eenvoudig te bepalen. Bekijken we de hoeveelheid lucht, die per seconde door de geluidsbron naar buiten wordt gepompt, dan vinden we voor het middelpunt van de bolvormige golf:

$$\lim (4 \pi r^2 u)_{r \rightarrow 0} = f(t) \dots \dots \dots (5)$$

$f(t)$ geeft dus aan, als functie van de tijd, de hoeveelheid lucht, die naar buiten wordt gepompt. Is deze hoeveelheid 0 voor $t = 0$, dan kunnen we (3) en (4) als volgt schrijven:

$$f \left(t - \frac{r}{c} \right) = \frac{4 \pi r}{\rho} \int_0^t p \, dt \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{en} \quad u = \frac{1}{\rho c} p + \frac{1}{\rho r} \int_0^t p \, dt \dots \dots \dots (7)$$

Uit vergelijking (3) zien we, dat de geluidsdruk recht evenredig afneemt met de afstand tot het middelpunt van het golfvront, onafhankelijk van de frequentie. Met de snelheid van de luchtdeeltjes in een bolvormige golf is dit niet het geval. Zooals vergelijking (4) aantoont, is de snelheid van de luchtdeeltjes op verschillende afstanden van het centrum van het golfvront nog af-

hankelijk van de frequentie; en wel zoodanig, dat met kleiner wordende afstand de snelheid bij golven met lage frequenties meer toeneemt dan bij golven met hooge frequenties.

In deze frequentieafhankelijkheid van de snelheid der luchtdeeltjes als functie van de afstand, ziet BÉKÉSY het verschijnsel, dat de afstandsgewaarwording kan geven. Als dit het geval is, moet het oor ook een snelheidsontvangst toestaan. Zooals uit impedantiemetingen van het trommelvlies van TRÖGER¹⁾ en GEFFCKEN²⁾ blijkt, is dit inderdaad mogelijk. Uit deze theorie kan men direct twee conclusies trekken.

Zooals verg. (4) aangeeft, berust de hierboven genoemde frequentieafhankelijkheid op de verhouding van de twee termen, voorkomende in deze vergelijking. Voor groote afstanden mag men de term $\frac{1}{r^2} f(t - \frac{r}{c})$ verwaarloozen t.o.v. de term $\frac{1}{cr} f'(t - \frac{r}{c})$, en moet dus het afstandshooren niet meer mogelijk zijn. Inderdaad is gebleken, dat alleen afstanden kleiner dan 150 cm, scherp bepaald kunnen worden en dat de nauwkeurigheid van de afstandsbepaling met grooter wordende afstand afneemt.

Vatten we het voorgaande samen, dan kunnen we dus zeggen, dat het afstandshooren geschiedt door de waargenomen timbrevariatie, die optreedt als de afstand van de geluidsbron verandert. Daar een dergelijke variatie in timbre niet op kan treden bij geluidsbronnen, die aangehouden zuiver sinusvormige tonen produceeren, moet dus in die gevallen geen afstandshooren mogelijk zijn. Uit het voorgaande hebben we reeds gezien, dat de afstandsgewaarwording hier sterk wordt beïnvloed door de intensiteit wat altijd het geval is, als de werkelijk afstandsbepalende stimulans ontbreekt. Als de afstandsgewaarwording dus wordt bepaald door de verhouding van de twee termen $\frac{1}{r^2} f(t - \frac{r}{c})$ en $\frac{1}{cr} f'(t - \frac{r}{c})$, voorkomende in verg. (4), dan moet, als deze verhouding wordt gewijzigd, een andere afstand van de geluidsbron worden waargenomen.

¹⁾ J. Tröger. Phys. ZS. 31, 26, 1931.

²⁾ W. Geffcken. Ann. d. Phys. 19, 829, 1934.

Dit experiment is als volgt uit te voeren:

Een spreker wordt beluisterd via een snelheidsmicrofoon, versterker en hoofdtelefoon.

Door nu een kleine verandering in de versterker aan te brengen, is het mogelijk, de microfoonstroom te integreeren of te differentieeren naar de tijd.

Door integreeren wordt de invloed van de tweede term van vergl. (4) vergroot en inderdaad wordt een kleinere afstand waargenomen.

Bij differentieeren is het omgekeerde het geval.

Een belangrijk punt, dat bij deze experimenten nog naar voren komt, is, dat voor een goede afstandswaarneming een zekere kennis van het timbre van de geluidsbron noodzakelijk is.

Heeft men, zonder dat een waarnemer daar kennis van draagt, het timbre van een bekende geluidsbron veranderd, zooals in het bovengenoemde experiment gebeurt, dan wordt die afstand waargenomen, waarop de bekende geluidsbron een overeenkomstig timbre zou produceeren.

De conclusies, die we uit het werk van VON BÉKÉSY kunnen trekken, zijn, dat bij elektrische geluidsoverdracht een afstandsgewaarwording behouden kan blijven, mits gebruik wordt gemaakt van microfoons, wier uitgangsspanning evenredig is met de snelheid van de luchtdeeltjes van het geluidsveld, waarin zij zijn geplaatst.

Bij gebruik van een ander type microfoon, bijv. een zuivere drukmicrofoon, gelukt het alleen maar een gewaarwording van *afstandsverandering* over te brengen, die teweeggebracht wordt door factoren, die gemeenlijk met een afstandsvariatie van een geluidsbron gepaard gaan, zooals intensiteitsveranderingen en variaties in de verhouding direct waargenomen geluid tot nagalmgeluid ¹⁾.

Enkele proeven toonen dit aan.

Een geluidsbron wordt in een vertrek voor een condensator-

¹⁾ E. Meyer, *Electr. Nachr. Techn.* 4, 135, 1927.
 J. P. Maxfield, *Journ. Soc. Mot. Pict. Eng.*, 14, 85, 1930.
 I. Steinberg en W. Snow, *Electr. Eng.*, 53, 12, 1934.
 A. v. Rabinovich, *Journ. Acoust. Soc. Amer.*, 7, 199, 1935.
 I. G. Dreisen, *ZS. f. techn. Phys.*, 7, 681, 1937.

microfoon geplaatst. De microfoon vangt dus zowel direct geluid als nagalmgeluid op. Een waarnemer beluistert het geluid van de geluidsbron, dat via een hoofdtelefoon of luidspreker wordt weergegeven. Men doet nu de volgende experimenten:

- 1) De geluidsbron verandert niet van plaats, d.w.z.

de verhouding: $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ is constant.

De totale intensiteit varieert.

- 2) De geluidsbron verandert van plaats, d.w.z.

de verhouding: $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ varieert.

De totale intensiteit wordt constant gehouden.

- 3) De geluidsbron verandert van plaats, d.w.z.

de verhouding: $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ varieert.

De totale intensiteit varieert ook, en wel zoodanig, dat bij een toename van de verhouding $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ ook de totale intensiteit toeneemt, en omgekeerd.

In al deze gevallen geeft zowel een grooter worden van de totale intensiteit als van de verhouding $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ de sensatie van het naderen van de geluidsbron. Het meest natuurlijke effect wordt bereikt met experiment no. 3.

De hier genoemde factoren zijn niet essentieel voor het normale afstandshooren. Zij kunnen dan ook niet helpen bij de bepaling van de afstand, alleen in het onderkennen van een variatie daarvan.

In de vrije ruimte (dus geen nagalmgeluid) kan men veel beter en nauwkeuriger afstanden waarnemen dan in een vertrek, waar nagalm is, en bovendien is daar vanzelfsprekend de afstandsgewaarwording onafhankelijk van de intensiteit. Is de eigenlijke prikkel, die ons de afstandsgewaarwording geeft, niet meer aanwezig, dan blijken dus andere factoren, zooals intensiteitsvariatiën, aanleiding te kunnen geven tot een gewaarwording van afstandsverandering.

Evenzoo gaat het met de nagalm. Het nagalm-geluidsveld is een superpositie van de geluidsvelden, die ontstaan tengevolge van reflectie tegen de wanden. Daarom schijnt het nagalm-geluidsveld dan ook verder weg te zijn dan de geluidsbron. Afhankelijk van de grootte van de verhouding $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ komt het ééne of het andere geluidsbeeld meer tot zijn recht, waarmede dan ook een overeenkomstige afstandsvariatie verbonden is. Daar het nagalmgeluidsveld opgebouwd is uit verschillende velden, waarvan de bronnen alle op verschillende afstanden van de microfoon liggen, kan men in dat geluidsveld ook nooit een scherpe afstands-bepaling doen. Het geluidsbeeld is daar vaag en van een vrij groote uitgestrektheid.

HOOFDSTUK II.

EIGEN AANVULLEND ONDERZOEK BETREFFENDE HET RICHTINGSHOOREN.

Bij ons eigen onderzoek betreffende het richtingshooren zullen we ons beperken tot het richtingshooren in het horizontale vlak door de ooras.

Met het bepalen van richtingen buiten dit vlak zullen we ons voorloopig niet bezig houden, daar bij de in de praktijk meest voorkomende gevallen de geluidsbronnen zich meestal in één horizontaal vlak bevinden (dialogen, hoorspelen, orkesten).

Richtingshooren in het horizontale vlak van de ooras.

Zooals reeds opgemerkt, berust het richtingshooren op een samenwerken van beide ooren.

Bevindt het hoofd zich in een willekeurig geluidsveld, dan ontvangen beide ooren verschillende indrukken. We zullen eerst nauwkeurig nagaan waaruit deze verschillen bestaan.

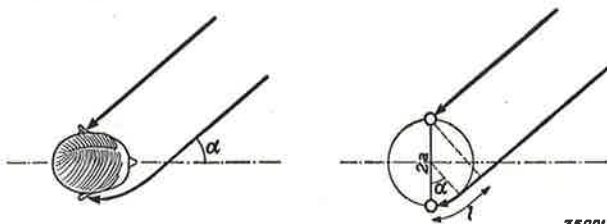


Fig. 10.

Geluid, dat uit een richting met de hoek α ten opzichte van het middelloodvlak van het hoofd komt, bereikt de beide ooren met een tijdsverschil: $t = l/c$ ($c =$ geluidssnelheid). De om het hoofd heengebogen golf is bovendien verzwakt.

Bevindt zich de geluidsbron in het middelloodvlak van de verbindingslijn der ooren, dan ontvangen deze precies dezelfde indrukken. Komt echter het geluid uit een richting: α (fig. 10), dan bereikt dit eerst het ééne oor en pas een zekere tijd later het andere, terwijl het bovendien bij de buiging om het hoofd van den waarnemer heen een zekere verzwakking ondervindt.

Ons gehoorcentrum is buitengewoon gevoelig voor deze ver-

schillen in tijd en intensiteit, die het door de ervaring geleid, als hoekafwijking uit het middelloodvlak interpreteert.

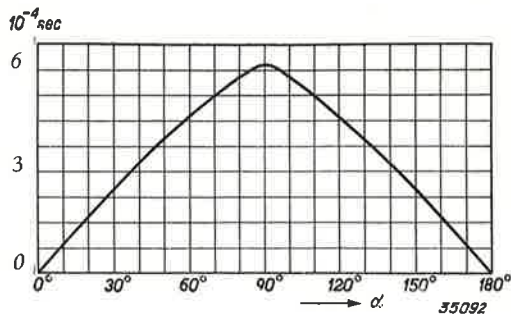


Fig. 11.

Tijdsverschil: t als functie van de hoek α .

Wat betreft de tijdsverschillen, deze kan men gemakkelijk berekenen uit het wegverschil: l en de geluidssnelheid. Wat men het hoofd eenvoudigheidshalve op als een bol met straal: a (zie fig. 10) dan is: $l = a (\alpha + \sin \alpha)$.

Uit proefnemingen blijkt, dat reeds een hoekafwijking van $0,1^\circ$ uit het middelloodvlak kan worden waargenomen, hetgeen bij een oorafstand: $2a = \text{ca. } 20 \text{ cm}$ overeenkomt met een tijdsverschil van 10^{-6} sec. ¹⁾

In fig. 11 is het tijdsverschil als functie van de hoek α uitgezet. De intensiteitsverschillen, die aan de ooren optreden, zijn niet zoo eenvoudig te berekenen. Zij zijn experimenteel bepaald door SIVIAN en WHITE ²⁾; in fig. 12 zijn hun resultaten weergegeven voor verschillende frequenties. Dat de aan de ooren optredende intensiteitsverschillen nog van de frequentie van het geluid moeten afhangen, is direct in te zien: de geluidsgolven worden door een hindernis alleen beïnvloed, wanneer de afmetingen daarvan minstens van dezelfde orde van grootte zijn als de golflengte van de desbetreffende trilling. Is de golflengte veel grooter dan de afmetingen van de hindernis, in dit geval het hoofd, dan oefent dit geen schaduwwerking uit.

¹⁾ J. L. van Soest en P. D. Groot. Physica 9, 111, 1929.

²⁾ J. Sivian en S. D. White. Journ. Acoust. Soc. Amer. 4. 288 1933.

Deze schaduwwerking wordt pas merkbaar, als de diameter van het hoofd gelijk is aan een kwart golflengte van de

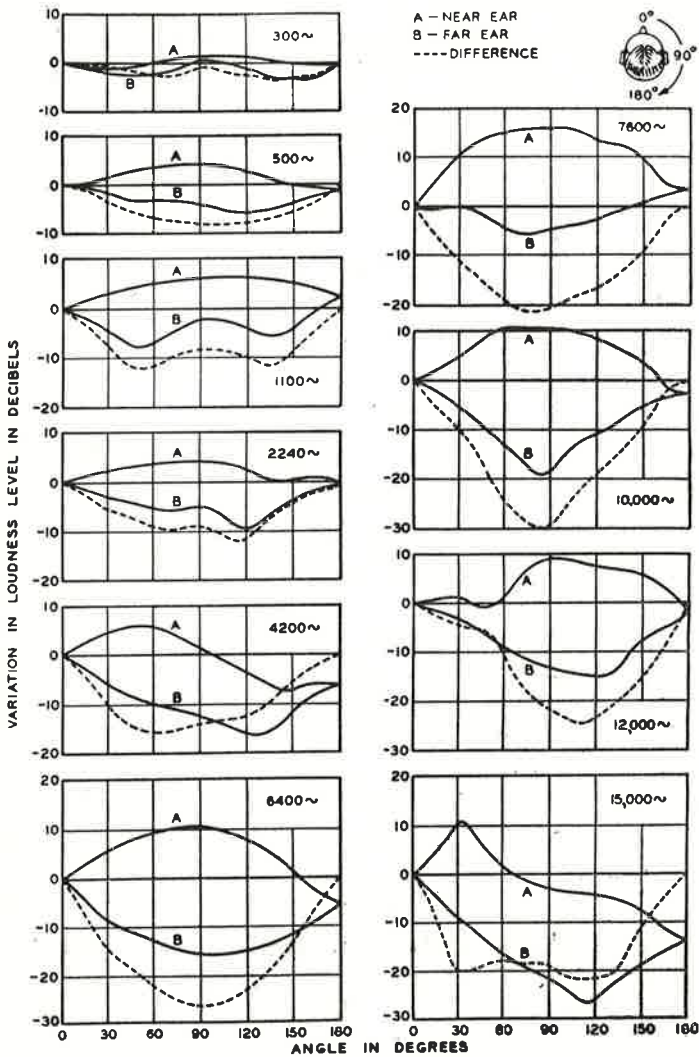


Fig. 12.

In deze figuur zijn de metingen van **Sivian** en **White** weergegeven, die bepaald hebben, welke intensiteitsvariaties aan de ooren optreden, als een geluidsbron, die zuiver sinusvormige tonen produceert, om het hoofd heen draait.

desbetreffende geluidstrilling. Hieruit volgt, dat bij tonen met een frequentie lager dan ongeveer 300 per/sec, het intensiteitsverschil aan de ooren voor alle hoeken vrijwel nul is.

Is de golflengte van het geluid veel kleiner dan de afmetingen van het hoofd, dan worden de geluidsgolven aan het hoofd vrijwel volledig gereflecteerd; het hoofd werkt dan als een bijna volkomen afscherming tusschen de ooren.

Nu is ons gebleken, dat de beste richtingswaarneming door intensiteitsverschillen plaats vindt bij tonen van ca. 1000—2000 per/sec, dus in hetzelfde frequentiegebied, waar ook de gehoordrempel het laagst ligt. In verband met de in de inleiding gebruikte teleologische beschouwingwijze, zou men dus kunnen zeggen, dat het gevoeligheidsmaximum van het oor aangepast is bij de grootte van het hoofd.

In het algemeen hebben we niet te doen met zuivere tonen, maar met geluiden van bepaalde spectrale samenstelling. Voor ons doel — de stereofonische weergave — is vooral de spraak van belang.

De gemiddelde intensiteitsverdeling van de spraak over het geheele frequentiespectrum is in fig. 13 weergegeven.

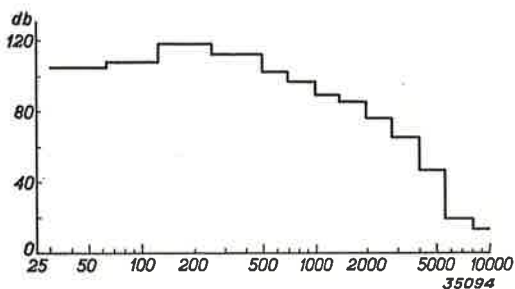


Fig. 13.

Spectrum van de spraak, gemiddelde mannenstem. Uitgezet is de intensiteit (in db) per eenheid van frequentieinterval als functie van de frequentie in per/sec.

Met behulp hiervan en van de krommen van fig. 12 kan de intensiteitsverhouding worden berekend, die aan beide ooren optreedt, wanneer een spraakbron uit verschillende richtingen wordt waargenomen. In fig. 14 is het resultaat weergegeven.

Men ziet, dat voor hoeken tusschen 0° en 50° de intensiteitsverhouding in db nagenoeg lineair met de hoek toeneemt; de maximale intensiteitsverhouding bedraagt ca. 7 db.

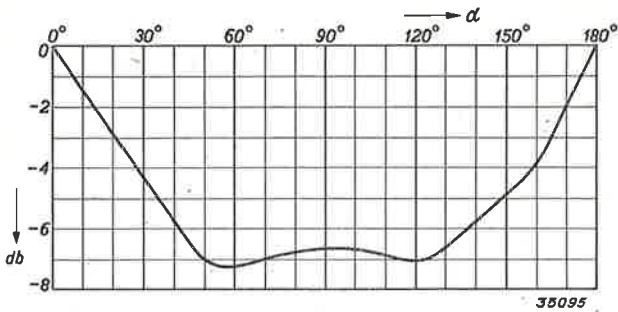


Fig. 14.

Intensiteitsverhouding (in db) aan rechter en linker oor als functie van de hoek α , bij het hooren van spraak.

De frequentieafhankelijkheid van de buiging van het geluid om het hoofd heeft een verandering van timbre tengevolge. Zetten we voor een bepaalde richting van de geluidsbron (hoek α) de relatieve verzwakking aan het eene oor uit als functie van de frequentie, dan krijgen we fig. 15.

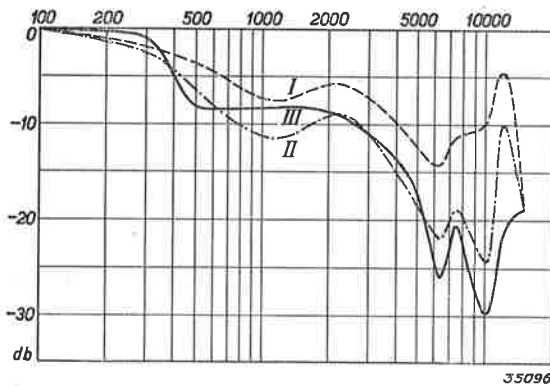


Fig. 15.

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

Men kan zeggen, dat, als een geluidsbron zich om het hoofd heen beweegt, het geluid als het ware een filter passeert met een frequentiekaracteristiek, die, zooals fig. 15 toont, voor verschillende hoeken α aanzienlijk kan uiteenloopen. Er ontstaan dus voor verschillende richtingen van de geluidsbron kwaliteitsverschillen van het geluid. Met behulp van deze kwaliteitsverschillen is tot op zekere hoogte ook een beoordeeling van de richting mogelijk onder medewerking van slechts één oor. Noodzakelijk is dan, dat men het karakter van het geluid kent. *)

We hebben nu gezien, welke intensiteits-, tijds- en kwaliteitsverschillen aan de ooren optreden als een geluidsbron, die spraak produceert, een willekeurige stand t.o.v. het hoofd inneemt.

In de inleiding hebben we reeds aangegeven, hoe stereofonische geluidsoverdracht verwezenlijkt kan worden door in de geluidsonruimte een kunsthoofd te plaatsen en ieder van de daarin aangebrachte microfoons met één van de telefoons op de ooren van den luisteraar te verbinden. De aan de microfoons optredende verschillen in intensiteit, aankomsttijd en kwaliteit zullen dus onveranderd aan de ooren van den luisteraar worden overgebracht, hetgeen tot resultaat heeft, dat een zeer goede ruimtelijke weergave wordt bereikt.

Eveneens in de inleiding hebben we gezien, dat we voor een auditorium deze zelfde installatie zouden willen behouden, maar met twee gemeenschappelijke „telefoons”, d.w.z. met twee luidsprekers aan weerskanten van de zaal opgesteld. De situatie wordt dan voor een luisteraar in zooverre gewijzigd, dat ieder oor geluid van beide luidsprekers ontvangt. De intensiteits-, tijds- en kwaliteitsverschillen, die aan de ooren van het kunsthoofd optreden, worden nu niet meer ongewijzigd aan de ooren van den luisteraar toegevoerd. We zullen nagaan, welke veranderingen daarbij optreden.

In fig. 16 is een opstelling aangegeven, die in een zaal zou kunnen worden toegepast (bijv. bioscoop). De twee luidsprekers zijn aan weerszijden van de zaal aangebracht. Den toehoorder laten we voorloopig voor de luidsprekers in het symmetrievlak der opstelling plaats nemen. Op overeenkomstige wijze zij ook het

*) We willen er hier nog eens op wijzen, dat in de verklaring van vor Békésy over het afstandshooren dezelfde eisch wordt gesteld.

kunsthofd in de studio geplaatst (bijv. geluidsfilmstudio), dus zoodanig, dat de resp. middelloodvlakken van kunsthofd en camera samenvallen; zie fig. 16. Bij een bepaalde stand van den spreker (hoek φ) verschillen de intensiteiten aan de beide „ooren” van het kunsthofd een factor p , die uit fig. 14 kan worden afgeleid. Dezelfde verhouding p bestaat voor de geluidsintensiteiten, die de beide luidsprekers in fig. 16 ter plaatse van den toehoorder leveren. Stel, dat het linker oor van den toehoorder, die recht voor zich uit kijkt, van de linker luidspreker een intensiteit I ontvangt. Dan levert de rechter luidspreker aan het rechter oor slechts een intensiteit pI . Bovendien ontvangt het rechter oor echter nog van de linker luidspreker een intensiteit qI , waarbij q de verzwakkingsfactor is, die volgens fig. 14 bij de hoek van de luidsprekerrichting behoort; en evenzoo ontvangt het linker oor een intensiteit $q \cdot pI$ van de rechter luidspreker. In totaal ontvangt dus het linker oor de intensiteit $I + pqI$, het rechter oor de intensiteit $pI + qI$. De werkelijke intensiteitsverhouding aan de ooren van den toehoorder is dus niet p , maar:

$$P = \frac{p + q}{1 + pq} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (1)$$

In deze vergelijking varieert p met de stand van den spreker in de opnamestudio, terwijl q een parameter is, die van de relatieve plaatsing van toehoorder en luidsprekers afhangt. Ware $q = 0$, d.w.z. zou elk oor van den toehoorder heelemaal geen ge-

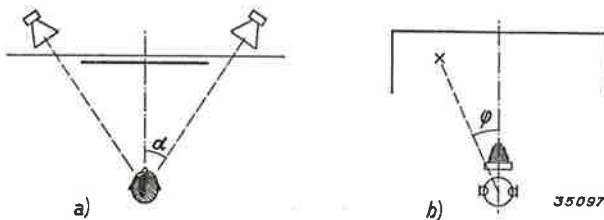


Fig. 16.

- a) Opstelling voor stereofonische weergave in een bioscoop. Twee luidsprekers staan aan weerszijden van het projectiescherm. Een toehoorder op een bepaalde afstand midden vóór het doek ziet de onderlinge afstand der luidsprekers onder een hoek 2α .
- b) Opstelling van het kunsthofd in de studio. De middelloodvlakken van camera en kunsthofd vallen samen. De spreker staat bijv. in de richting φ .

luid van de „verkeerde” luidspreker ontvangen, dan ware $P = p$; dit geval, waarbij dus de intensiteitsverhouding p geheel bewaard blijft, is met luidsprekers niet te verwezenlijken, daar volgens fig. 14, q nooit kleiner gemaakt kan worden dan 0,2 (overeenkomende met een verzwakking van 7 db), hetgeen de grootste verzwakking is, die bij het natuurlijke hooren optreedt, zie fig. 14.

In het andere extreme geval, wanneer $q = 1$, d.w.z. wanneer elke luidspreker even sterk op beide ooren inwerkt, wordt volgens verg. (1) $P = 1$; er treedt dus geen intensiteitsverschil aan de ooren van den toehoorder op. Voor alle tusschenwaarden van de parameter q is steeds $P > p$, zooals een blik op fig. 17 leert; *het intensiteitsverschil aan de ooren van den luisteraar is dus steeds kleiner dan dat aan de „ooren” van het kunsthoofd.* (p is steeds kleiner dan 1. Alleen voor het geval, dat de geluidsbron in het middelloodvlak van het hoofd is gelegen, is $p = 1$).

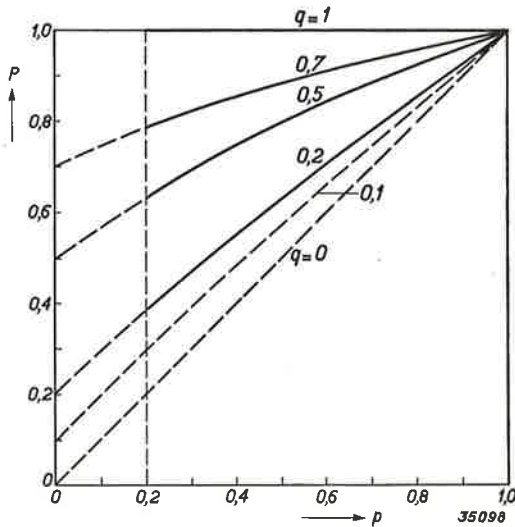


Fig. 17.

De intensiteitsverhouding P aan rechter en linker oor van den toehoorder (fig. 16a) als functie van de verhouding p aan de microfoons van het kunsthoofd (fig. 14). Als parameter treedt de intensiteitsverhouding q op van de geluidsbijdragen, die een luidspreker aan beide ooren levert; q hangt van a af, dus van de relatieve plaatsing van toehoorder en luidsprekers, kan echter volgens fig. 14 nooit kleiner dan ca. 0.2 worden. Men ziet, dat steeds $P > p$, d.w.z. het intensiteitsverschil voor den toehoorder is steeds kleiner dan dat voor het kunsthoofd.

Nu de tijdsverschillen. Bij de in fig. 16 b veronderstelde stand van den spreker in de studio ontvangt de linker microfoon van het kunsthoofd het geluid iets eerder dan de rechter; het tijdsverschil bedrage t sec. Doet men luisterproeven met zuiver sinusvormige tonen, dan kan men, zoo als in het vorige hoofdstuk reeds is uiteengezet, niet meer ondubbelzinnig van een „aankomsttijd” spreken.

Het is voor de volgende beschouwingen dan ook essentieel, dat steeds aan de weergave van spraak wordt gedacht. Het linker oor van den toehoorder (fig. 16a) zal b.v. het geluid van de linker luidspreker eveneens t sec. eerder ontvangen, dan het rechter oor het geluid van de rechter luidspreker ontvangt. Maar even later (T sec.) krijgen beide ooren het (een factor q zwakkere) geluid van de „verkeerde” luidspreker, en hierbij komt nu het *rechter* oor t sec. eerder aan de beurt. In fig. 18 is dit schetsmatig voorgesteld. We zien, dat eerst de beide ooren een tijdsverschil van t sec. tusschen de resp. geluidsbijdragen I en pI constateeren, en dat deze geheele indruk zich, met een factor q verzwakt en met *omgekeerd* tijdsverschil T sec. later als een soort echo herhaalt. Deze „echo” brengt een geringe verdoezeling van het richtings-effect teweeg, kan echter, wanneer $T > t$, hetgeen vaak het geval is, voor onze beschouwingen verwaarloosd worden.

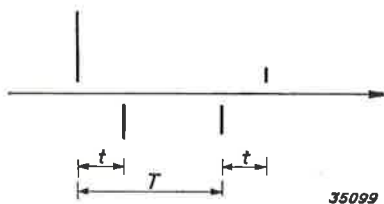


Fig. 18.

Boven de tijdas zijn de aankomsttijden van de geluidsbijdragen aan het linker oor aangegeven, **onder** de tijdas overeenkomstig voor het rechter oor. Het tijdsverschil t behoort bij de hoek φ (fig. 16b), het verschil T bij de hoek α (fig. 16a). De lengte der strepen drukt schematisch de intensiteiten uit, die de vier geluidsbijdragen kunnen hebben.

Het resultaat is dus, dat de toehoorder een intensiteitsverhouding P en een tijdsverschil t (voor het geval $T > t$ is) ontvangt, terwijl hij, op de plaats van het kunsthoofd staand, een (kleinere) intensiteitsverhouding p en een (gelijk) tijdsverschil t zou hebben

ontvangen. Tot welke richtingsgewaarwording zal nu de toehoorder de verhouding P en het verschil t verwerken?

Op deze vraag is geen rechtstreeks antwoord mogelijk, aangezien de combinatie P, t in ons „natuurlijk”, door de ervaring geleerd, richtingshooren nooit voorkomt! Immers, bij een bepaalde richting ten opzichte van ons hoofd, behoort zoowel een bepaalde intensiteitsverhouding, alsook een bepaald, ondubbelzinnig hieraan toegevoegd, tijdsverschil. Het zou denkbaar zijn, dat ons oor aan deze ondubbelzinnige toevoeging dermate gewend is, dat hiervan afwijkende combinaties slechts een gevoel van verwarring zouden teweegbrengen. Gelukkig is dit, zooals uit het volgende zal blijken, niet het geval.

De invloed van tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen.

Om het samenwerken van intensiteitsverhoudingen en tijdsverschillen te kunnen begrijpen, hebben we de volgende proeven gedaan. De beide luidsprekers werden volgens fig. 19 achter een doek opgesteld, terwijl op een horizontaal opgestelde lat voor het doek een schaalverdeling was aangebracht. De waarnemer bevond zich midden voor de luidsprekers. De onderlinge afstanden van waarnemer en luidsprekers zijn in fig. 19 aangegeven.

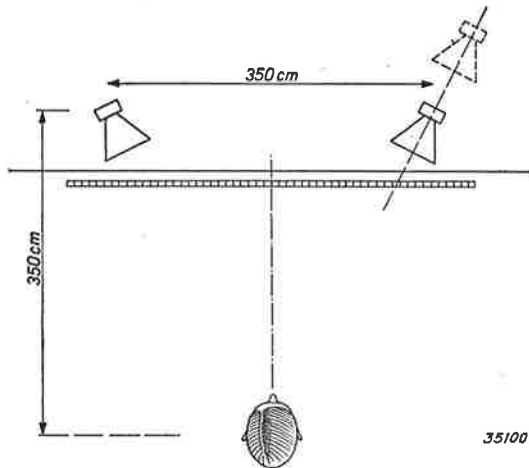


Fig. 19.

Opstelling der luidsprekers bij de proeven omtrent het samenwerken van tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen.

Nu willen we eerst de invloed van:

a) *uitsluitend intensiteitsverhoudingen* nagaan.

Eenzelfde gramfoonplaat wordt daartoe over beide luidsprekers afgespeeld en door middel van geijkte potentiometers kan de intensiteitsverhouding worden gewijzigd. De waarnemer ontvangt de indrukken van beide luidsprekers dus gelijktijdig; zij kunnen alleen in intensiteit van elkaar verschillen. Is de intensiteit van beide luidsprekers gelijk, dan wordt de schijnbare richting van het geluid, „het geluidsbeeld”, midden tusschen de luidsprekers waargenomen. Wordt de intensiteit van één der luidsprekers ten opzichte van de andere vergroot, dan beweegt het geluidsbeeld zich in de richting van de luidspreker met de grootste intensiteit. Het geluidsbeeld kan men scherp op de schaalverdeling localiseren met een nauwkeurigheid van enkele cm.

In fig. 20 is als functie van de intensiteitsverhouding tusschen de luidsprekers (in db) de zoo verkregen hoekverdraaiing van het „geluidsbeeld” uitgezet.

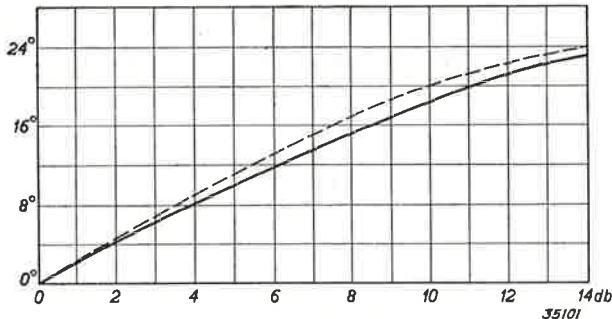


Fig. 20.

Hoekverdraaiing van het „geluidsbeeld” uit het midden bij het aanbrengen van intensiteitsverhoudingen alléén. De gestippelde kromme geeft de hoeken bij het natuurlijke richtingshooren, waar de intensiteitsverhouding steeds vergezeld is van het „toegevoegde” tijdsverschil.

Grijpen we nu terug naar formule

$$P = \frac{p + q}{1 + pq} \dots \dots \dots (1)$$

De factor p , de intensiteitsverhouding van de twee luidsprekers, kennen we ook, uit fig. 14. In dit geval is q de verzwakkings-

factor, die behoort bij de hoek 27° van de luidsprekerrichting. Voor ieder intensiteitsverschil tusschen de luidsprekers kunnen we dus de factor P berekenen, die de intensiteitsverhouding aan de ooren geeft. Zoeken we nu in fig. 14 terug, welke richting hoort bij een intensiteitsverhouding P aan de ooren, dan is dat dus de richting, die we bij een intensiteitsverhouding p van de luidsprekers hadden moeten waarnemen, indien tevens het bij het natuurlijke hooren tegelijk optredende tijdsverschil aanwezig was geweest. De aldus berekende waarden van de uitwijking van het geluidsbeeld zijn ook in fig. 20 als gestippelde kromme uitgezet. De waargenomen uitwijkingen zijn systematisch ongeveer 10 % kleiner dan de berekende.

De volgende stap is nu het onderzoek van het effect van
b) *tijdsverschillen alléén*.

De inrichting van het experiment is gelijk aan die bij het onderzoek van intensiteitsverhoudingen alléén. De tijdsverschillen worden teweeggebracht door één der luidsprekers langs de verbindingslijn luidspreker — waarnemer te verschuiven. Daarbij is het zaak,

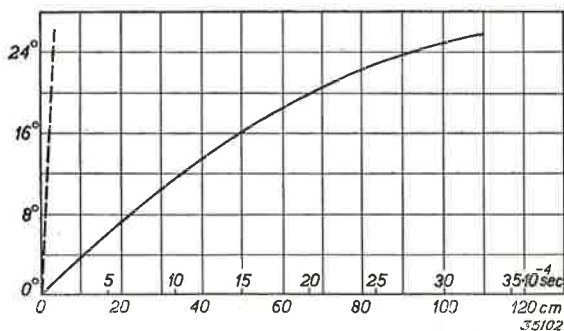


Fig. 21.

Als fig. 20, echter met tijdsverschillen alléén. De gestippelde kromme slaat weer op het natuurlijke richtingshooren. Op de abscis zijn tevens de wegverschillen aangegeven. Merkwaardig is, dat nog een localisatie mogelijk blijkt bij wegverschillen, die veel grooter zijn dan de afstand der ooren.

het geluidsvolume steeds zoodanig bij te regelen, dat de intensiteiten van beide luidsprekers ter plaatse van den waarnemer gelijk blijven. Wederom wordt een scherp geluidsbeeld waarge-

nomen, waarvan de uitwijking in fig. 21 als functie van het tijdsverschil is uitgezet. De gestippelde kromme geeft aan, welke hoek volgens fig. 11 in het natuurlijke richtingshooren zou worden waargenomen, dus bij medewerking van de „toegevoegde” intensiteitsverhouding.

Het is interessant, dat het gehoor nog tot een localisatie in staat is bij dusdanig groote tijdsverschillen, als bij het natuurlijke richtingshooren nooit voorkomen; die het oor dus feitelijk heelemaal niet „geleerd” kan hebben als richting te interpreteren. Overigens toonen de krommen (althans voor het bij de proeven onderzochte gebied van hoeken) kwalitatief aan, dat het totstandkomen van een normale richtingsgewaarwording, zooals reeds in fig. 20 bleek, grootendeels voor rekening van de intensiteitsverhoudingen komt.

Nu we de invloed van tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen alléén hebben onderzocht, zal ook nagegaan moeten worden wat er gebeurt als:

c) *intensiteitsverhoudingen en tijdsverschillen tegelijk optreden*, wat bijna altijd het geval is.

Geven we het geluidsbeeld een bepaalde uitwijking, b.v. ten gevolge van een intensiteitsverhouding, dan kunnen we door het aanbrengen van een bepaald tijdsverschil die uitwijking vergrootten of verkleinen, afhankelijk van de manier, waarop het tijdsver-

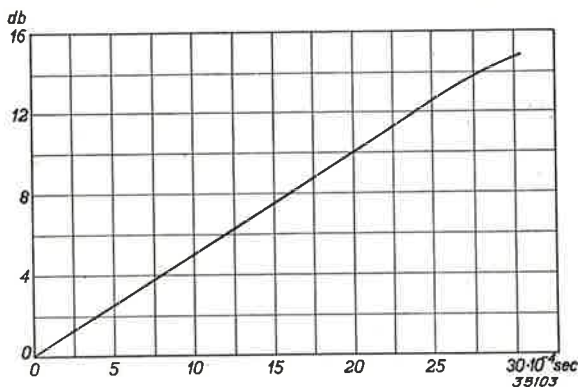


Fig. 22.

Bij elk tijdsverschil is uitgezet de intensiteitsverhouding, die dezelfde hoekverdraaiing van het „geluidsbeeld” veroorzaakt.

schil wordt aangebracht. Laat men het geluid van de luidspreker met de grootste intensiteit het eerst aankomen, dan wordt de uitwijking groter en omgekeerd. Dit wijst er op, dat er een zekere additiviteit moet bestaan tusschen tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen.

We zetten nu als functie van het tijdsverschil uit de intensiteitsverhouding in db, die dezelfde hoekverdraaiing van het „geluidsbeeld” zou bewerkstelligen. We vinden dan een lineair verband; zie fig. 22.

Met behulp hiervan kan elk tijdsverschil ondubbelzinnig uitgedrukt worden in een intensiteitsverhouding en omgekeerd. Om nu in een bepaald geval, waar intensiteitsverhoudingen en tijdsverschillen tezamen optreden, de uitwijking van het geluidsbeeld te bepalen, telt men de met het tijdsverschil aequivalente intensiteitsverhouding bij de reeds aanwezige intensiteitsverhouding op (in db). De bij deze totale intensiteitsverhouding behorende hoek, af te lezen uit de getrokken kromme van fig. 20, blijkt binnen de meetfouten overeen te stemmen met de experimenteel bepaalde hoekverdraaiing van het geluidsbeeld. Even goed kan men natuurlijk de intensiteitsverhouding volgens fig. 22 omrekenen in een aequivalent tijdsverschil en uit het totale tijdsverschil met behulp van fig. 21 de uitwijking van het geluidsbeeld bepalen. De hier gevonden additiviteit moet vanzelfsprekend ook voor het normale richtingshooren gelden, waarbij niet willekeurige intensiteitsverhoudingen en tijdsverschillen zijn gecombineerd, maar waarbij aan elke intensiteitsverhouding een bepaald tijdsverschil is „toegevoegd”.

Het is nu ook mogelijk, de afwijking tusschen gemeten en berekende kromme van fig. 20 te verklaren. We hadden daar kunstmatig een bepaalde intensiteitsverhouding aan de ooren aangebracht en de waargenomen richting vergeleken met de richting van de geluidsbron, die bij het natuurlijke hooren dezelfde intensiteitsverhouding aan de ooren geeft. Bij het natuurlijke hooren is vast aan iedere intensiteitsverhouding ook een tijdsverschil gekoppeld. Brengen we dat tijdsverschil in ons experiment aan, door verschuiving van één der luidsprekers, zodat kunstmatig aan de ooren een bepaalde intensiteitsverhouding met het bijbehorende tijdsverschil is aangebracht, dan stemt de waargenomen hoek vol-

komen overeen met de hoek, waaronder een geluidsbron bij het natuurlijke hooren dezelfde toestand aan de ooren teweegbrengt.

Dit experiment kan ook als „gedachte-experiment” worden uitgevoerd, door de toegevoegde tijdsverschillen om te rekenen in aequivalente intensiteitsverhoudingen. In fig. 23 geeft dan de ge-

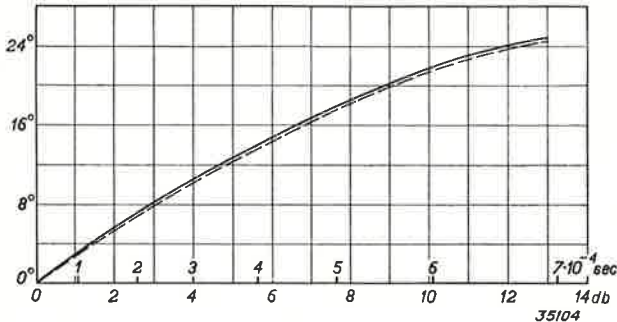


Fig. 23.

Hoegewaarwording bij het normale richtingshooren (getrokken kromme, identiek met de gestippelde kromme van fig. 20), waar bij elke intensiteitsverhouding een toegevoegd tijdsverschil optreedt (op abscis aangegeven). Door omrekenen in een aequivalente totale intensiteitsverhouding met behulp van fig. 23 en aflezen van de bijbehorende hoek in fig. 21 (getrokken kromme) wordt de gestippelde kromme verkregen, die goed met de getrokken kromme overeenstemt.

stippelde kromme de uitwijking van het geluidsbeeld weer, die bij deze totale intensiteitsverhouding behoort.

We mogen dus zeggen, dat globaal genomen in het door ons onderzochte gebied het richtingshooren voor spraak voor 90% veroorzaakt wordt door intensiteitsverhoudingen en voor 10% voor tijdsverschillen.

HOOFDSTUK III.

OVERZICHT VAN DE HISTORISCHE ONTWIKKELING DER STEREOFONISCHE GELUIDSWEERGAVE.

Stelsel Ader.

De eerste installatie, waarbij muziek elektrisch werd gereproduceerd met behoud van het ruimtelijk hooren, was ontworpen door ADER. In 1881, ter gelegenheid van een groote electriciteitstentoonstelling in Parijs, gaf hij stereofonische uitzendingen van de „Grand Opéra”. Op het tooneel had hij vlak achter de voetlichten een groot aantal van de door hem ontworpen koolmicrofoons opgesteld. Tachtig personen tegelijk konden de uitzendingen beluisteren. Iedere luisteraar was voorzien van twee telefoons, voor ieder oor één, die hun signaal ontvingen van twee op een bepaalde afstand geplaatste microfoons.

Alhoewel de voordeelen van een dergelijke wijze van weergeven volkomen werden erkend, geraakte de binaurale weergave weer spoedig in vergetelheid, daar er in deze uitvoering geen behoefte aan was.



Fig. 24.



Fig. 25.

In de fig. 24 en 25 is te zien, op welke wijze Ader stereofonische geluidswaergave voor een groot aantal toehoorders verwezenlijkte in 1881 te Parijs.

Met de ontwikkeling van gramfoon, radio en geluidsfilm komt die behoefte weer naar voren, doch men kan het systeem Ader niet gebruiken, daar het voor deze doeleinden te onpractisch is.

In 1911 dient ROSENBERG een patent in betreffende een geluidsfilminstallatie, waarbij het ruimtelijk hooren blijft behouden. Bij de opname stelt hij zich voor, aan weerszijden van het tooneel, waar de actie plaats vindt, een microfoon te plaatsen. De spanning, afgegeven door ieder dier microfoons, moet op een aparte film worden geregistreerd. De registraties moeten worden afgespeeld via luidsprekers („speaking" instrumentality) aan weerszijden van het projectiedoek geplaatst, en het publiek zal dan een gewaarwording krijgen, alsof het geluid van één luidspreker komt en de richting van het geluid zal worden bepaald door die luidspreker, die op een bepaald moment de grootste energie produceert.

Het gebruik van meerdere microfoons, registraties en luidsprekers zal het effect nog verbeteren.

Op het door dit patent beschermde principe kunnen alle later beschreven methodes voor ruimtelijke weergave teruggebracht worden.

Het Ultraphon-effect.

Omstreeks 1920 worden er verschillende patenten ingediend, die beoogen bij gramfoonweergave het geluid een meer ruimtelijk karakter te geven.

Door twee gramfoonopnemers vlak achter elkaar in dezelfde groef te laten loopen, wordt een soort nagalm-effect bereikt. De tijdsverschillen tusschen de geluiden van beide opnemers variëren van $1/6$ tot $1/40$ sec. In de meeste gevallen zijn beide gramfoonopnemers op een constante afstand van elkaar geplaatst, zoodat het tijdsverschil aan het begin der opname niet gelijk is aan dat, hetwelk aan het eind optreedt.

In een patent van KÜCHENMEISTER wordt daarin voorzien door de gramfoonopnemers een dusdanige stand te geven, dat het tijdsverschil over de geheele opname constant is en wel $1/15$ sec.

Het systeem is uitgevoerd, ook bij geluidsfilm, waar hetzelfde resultaat wordt bereikt door weer te geven over twee luidsprekers op eenige afstand achter elkaar, doch het effect, bekend als

Ultraphon-effect, is vrij gering. Een echt ruimtelijke weergave kan op deze wijze niet verkregen worden, zoodat het bij eenige demonstraties is gebleven.

Het verkrijgen van een ruimtelijke gewaarwording bij monaurale geluidswaergave.

Er zich bij neerleggende, dat bij geluidsfilm de waergave monauraal is, geeft MAXFIELD ¹⁾ aan, hoe men van de mogelijkheid om met één oor nog eenigszins een ruimtelijke gewaarwording te krijgen, partij kan trekken om een zoo reëel mogelijke waergave te verwezenlijken.

Bij een geluidsfilm is er maar één beeld en maar één geluidspoor en de sensaties, die we ontvangen, zijn dus eigenlijk die van iemand met maar één oog en één oor. Nu kunnen de cineasten de suggestie van diepte in het beeld geven door gebruik te maken van lenzen met bepaalde brandpuntsafstanden en door bepaalde verlichtingsmethoden. Eveneens is ook iemand met één oor in staat tot een afstandsbeplaling. Is een normale afstandsbeplaling niet mogelijk, dan zal men toch nog uit de intensiteitsverhouding van nagalm tot direct geluid een zekere afstandsgewaarwording krijgen.

Daar het nu mogelijk is gebleken, in beeld en geluid een zekere dieptegewaarwording te behouden, is het voor een zoo reëel mogelijke waergave noodig, dat een afstandsverandering in de beeldruimte precies overeenkomt met de afstand, waarover het geluid schijnt te verschuiven.

Daar er bij het normale zien en hooren overeenstemming is tusschen visueele en acoustische sensaties, kunnen we verwachten, dat wanneer bijv. een scène in een normale kamer wordt gefilmd, er een bepaalde brandpuntsafstand voor de cameralens is, die, als de microfoon zich naast de cameralens bevindt, overeenstemming zal geven tusschen visueele en acoustische afstandsbeplaling bij de waergave. Dit houdt dus in, dat wanneer men dezelfde scène in een vertrek met andere nagalmtijd filmt, een lens met andere brandpuntsafstand noodig is.

In de praktijk is het echter dikwijls noodig, lenzen met grootere brandpuntsafstanden te gebruiken, dan die, welke de acoustische

¹⁾ J. P. Maxfield. Journ. Acoust. Soc. Amer. 3, 69, 1931.

eischen voorschrijven. In dat geval moet de microfoon dus dichterbij het te filmen tooneel worden gebracht, daar dat de plaats is van een veronderstelde camera, die een lens heeft met een brandpuntsafstand, zoodanig, dat visuele en acoustische waarneming samenvallen en welke camera een beeld van de scène geeft van dezelfde grootte als de gebruikte camera. De ervaringen, opgedaan door het beluisteren van een groot aantal stukjes film onder bekende omstandigheden opgenomen, geeft MAXFIELD in fig. 26 weer.

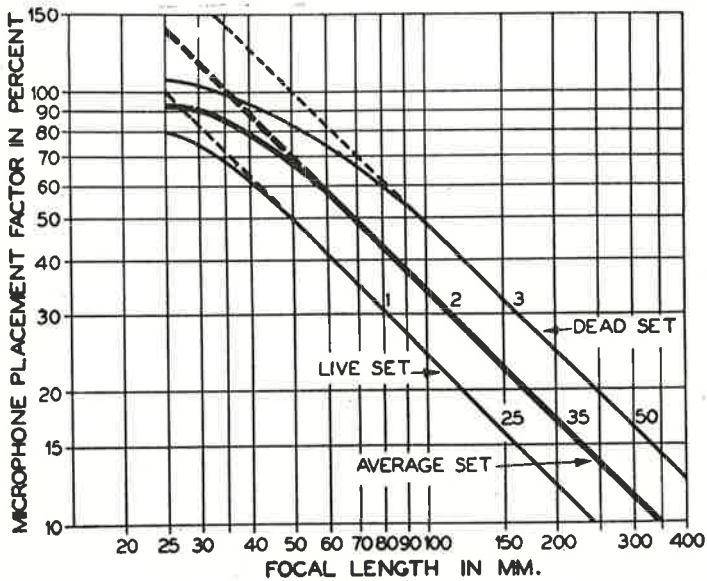


Fig. 26.

In fig. 26 geven de drie geteekende krommen de microfoon-plaatsbepalende factor weer als functie van de brandpuntsafstand van de cameralens. Onder de microfoon-plaatsbepalende factor verstaan we de verhouding van de microfoonafstand tot de cameraafstand (gemeten vanaf de te filmen scène), uitgedrukt in procenten, welke noodig is om visuele en acoustische illusie te laten coördineeren. Kromme twee geldt voor tooneelen, waar de nagalm op het gehoor even groot is als in de ruimte, die het tooneel moet voorstellen. Kromme één als de nagalm merkbaar grooter en kromme drie als deze merkbaar kleiner is.

Dat de krommen bij kleine brandpuntsafstanden van een rechte lijn afwijken, vindt zijn oorzaak in het volgende: lenzen met kleine brandpuntsafstand worden gebruikt om scènes met een groote uitgestrektheid van dichtbij te kunnen filmen. Door de microfoon op de acoustisch juiste afstand te plaatsen, zal de afstand van geluidsbronnen tot microfoon te groot worden, zoodat te veel bijgeluid wordt opgevangen. Daarom is het in die gevallen beter, de microfoon iets dichter bij te zetten, wat hier niet zoo storend is, daar voor groote afstanden de afstandsbeplating toch onzeker is. De hierboven beschreven werkwijze van MAXFIELD heeft zooveel succes gehad, dat zij door verschillende van de groote „producers” is overgenomen.

Een enkel punt is hier ook nog van belang. De microfoon moet zoo dicht mogelijk staan bij de verbindingslijn van camera en te filmen scène. Dit is vooral van belang, als een spreker het hoofd afwisselend naar de microfoon toe of het er van af gewend heeft. De daarmee samenhangende kwaliteitsvariaties van het geluid zullen niet in overeenstemming met het visueel waargenome zijn, als de microfoon zich belangrijk opzij van de camera bevindt.

Het Philadelphia-Washington experiment.

Op 27 April 1933 vond een lijn-uitzending plaats van het Philadelphia symphonie orkest naar de Constitution Hall te Washington. Voor het orkest waren naast elkaar opgesteld drie microfoons, ieder via een transmissielijn verbonden met een luidspreker. De drie luidsprekers bevonden zich naast elkaar achter een scherm in de zaal te Washington. De weergegeven frequentieband strekte zich uit van 40 tot 15000 per/sec en de dynamiek bedroeg 70 db.

Dit experiment was een groot succes. Een zeer goede ruimtelijke weergave werd met dit systeem bereikt en gaf aanleiding tot een aanzienlijke verbetering van de weergavekwaliteit. De artistieke leiding berustte bij LEOPOLD STOKOWSKY, de technische leider was HARVEY FLETCHER.

De richtlijnen, volgens welke bij luidsprekerweergave een ruimtelijke indruk van het geluid behouden kan blijven, vinden we aangegeven in een artikel van HARVEY FLETCHER ¹⁾. Deze gaat van

¹⁾ Harvey Fletcher. Bell. Syst. Techn. Journ. 13, 239, 1934.

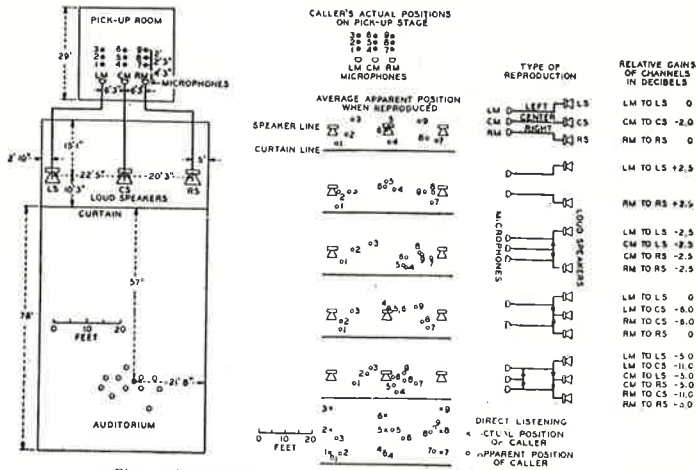
het volgende uit: bij een ideale geluidsreproductie moeten op ieder moment de trillingspatronen van de geluidsopname- en weergaveruimte volkomen identiek zijn. Dit houdt dus al in, dat twee precies gelijke zalen noodig zijn. Stel nu, dat er zich tusschen podium en zaal een gordijn bevindt van zoodanige aard, dat de geluidstrillingen er niet door worden beïnvloed en dat dit gordijn volkomen bedekt was met een zeer groot aantal microfoons van zeer kleine afmetingen. In een tweede volkomen gelijke zaal zou zich een dergelijk gordijn moeten bevinden, maar nu volledig bedekt met geluidsweargevers, ieder via een transmissielijn en versterker verbonden met de in plaats overeenkomende geluidsopnemer. Is nu de geluidsoverdracht voor iedere microfoon-luidspreker combinatie ideaal, d.w.z. worden de geluidstrillingen naar vorm en grootte volkomen juist weergegeven, dan zullen luisteraars op overeenkomstige plaatsen in beide zalen dezelfde muzikale sensatie hebben.

Theoretisch zijn er dus een oneindig aantal microfoons en luidsprekers noodig en ieder van hen zou oneindig klein moeten zijn. In de practijk blijkt echter, dat wanneer het publiek zich op eenige afstand van het orkest bevindt, zooals gemeenlijk het geval is, men zelfs al met twee microfoon-luidspreker combinaties kan volstaan om een goede ruimtelijke weergave te verkrijgen.

Onder goede ruimtelijke weergave is dan te verstaan een weergave, waarbij verschillende geluidsbronnen in de opnameruimte in richting en afstand gescheiden van elkaar kunnen worden waargenomen in de afspeelruimte.

Welke resultaten te bereiken zijn met dergelijke eenvoudige installaties, is nagegaan door STEINBERG en SNOW.¹⁾ Daartoe hebben zij de volgende serie experimenten gedaan. In fig. 27 ziet men de opzet schematisch aangegeven. De microfoons LM (links), CM (midden) en RM (rechts) bevinden zich in een behoorlijk gedempte studio. De luidsprekers LS, CS en RS zijn in een zaal achter een ondoorzichtig gordijn geplaatst. Twaalf waarnemers bevinden zich in de zaal, waar hun gemiddelde plaats door een kruis is aangegeven. Het doel van het experiment was nu, na te gaan, waar de luisterende personen een spreker dachten waar te nemen, die zich in de opnameruimte achtereenvolgens op de negen verschillende plaatsen, in de figuur aangegeven, bevindt. Rechts

¹⁾ J. C. Steinberg en W. B. Snow, Bell. Syst. Techn. Journ. 13, 245, 1934.



—Diagram of arrangement (left) for sound localization tests and (right) the results obtained.

Fig. 27.

In deze figuur zijn schematisch de resultaten weergegeven, die Steinberg en Snow verkregen bij hun proeven betreffende weergavesystemen voor stereofonische geluidsoverdracht, met ruimtelijk gescheiden microfoons.

in de figuur is aangegeven welk overdrachtssysteem is gebruikt, in het midden waar de spreker werd waargenomen. De experimenten beperkten zich niet alleen tot systemen, waarbij iedere microfoon via een transmissielijn met één luidspreker was verbonden, maar ook werden schakelingen nagegaan, waarbij microfoons en luidsprekers onderling electricch aan elkaar waren gekoppeld. Uit fig. 37 blijkt, dat bij gebruik van drie microfoon-luidsprekercombinaties, het drie-kanalensysteem, een goede overeenkomst bestaat tusschen werkelijke positie van den spreker in de opname-ruimte en de schijnbare positie in de afluisterzaal. Er is zowel een richtings- als een dieptegewaarwording. Ter vergelijking dient het laatste diagram, waar direct is geluisterd naar een spreker, die op negen verschillende plaatsen achter het gordijn staat. De kruisjes geven de werkelijke positie van den spreker aan en de cirkels de plaats, waar hij wordt waargenomen.

Tusschen twee- en drie-kanalensysteem zien we enkele belangrijke verschillen. De middenplaatsen worden naar achteren

verschoven waargenomen en de diepte van het denkbeeldige tooneel is kleiner, de breedte ervan grooter geworden. Brengt men bij het twee-kanalensysteem een derde microfoon aan, die zijn spanning aan beide kanalen afgeeft, dan komen de middenplaatsen naar voren en de breedte van het denkbeeldig tooneel is kleiner dan bij het twee-kanalensysteem.

Het aanbrengen van een derde luidspreker, die zijn spanning van beide kanalen ontvangt, houdt de middenplaatsen naar achteren verschoven en maakt de breedte van het denkbeeldig tooneel aanzienlijk kleiner dan bij het twee-kanalensysteem. Het aanbrengen van een derde microfoon, zoowel als een derde luidspreker, maakt het denkbeeldig tooneel smaller. De derde microfoon brengt de middenplaatsen naar voren; met de derde luidspreker is dit niet het geval. Het drie-kanalensysteem is beter gebleken dan één der twee-kanalensystemen.

STEINBERG en SNOW hebben geprobeerd, voor deze systemen de plaats van het geluidsbeeld te berekenen bij een willekeurige stand van een spreker voor de microfoons, uitgaande van de veronderstelling, dat alleen de intensiteitsverhoudingen die aan de ooren van de waarnemers optreden, beslissend zijn voor de richtingsgewaarwording. Bij hun berekeningen maken zij gebruik van de krommen van SIVIAN en WHITE ¹⁾, die aangeven welk intensiteitsverschil aan de ooren optreedt, als een geluidsbron, die zuivere tonen produceert, in een horizontaal vlak om het hoofd heen draait. Daar zij geen tijdsverschillen in rekening brengen, die, zooals uit het voorgaande gebleken is, een belangrijke rol kunnen spelen, moet de waarde van de verschuiving van het geluidsbeeld, die zij berekenen, altijd kleiner zijn dan wat wordt waargenomen. In fig. 28 zijn hun resultaten weergegeven voor het twee-kanalensysteem.

De conclusies, die STEINBERG en SNOW uit hun contrôleproeven trekken, zijn de volgende:

- 1) Het geluidsbeeld wordt *altijd* onder een grootere hoek met het middelloodvlak van de ooras waargenomen dan uit de berekening volgt. Echter achten zij de overeenkomst tusschen beiden voldoende.

¹⁾ Sivian en White. Journ. Acoust. Soc. Amer. 4, 288, 1933.

- 2) Beweegt een waarnemer zich uit het midden naar opzij, dan doet het geluidsbeeld dat ook, echter *belangrijk meer* dan uit de intensiteitstheorie volgt.
- 3) Als een luisteraar zich beweegt in een richting, loodrecht op de verbindingslijn der luidsprekers, dan heeft dit weinig invloed op de plaats van het geluidsbeeld.

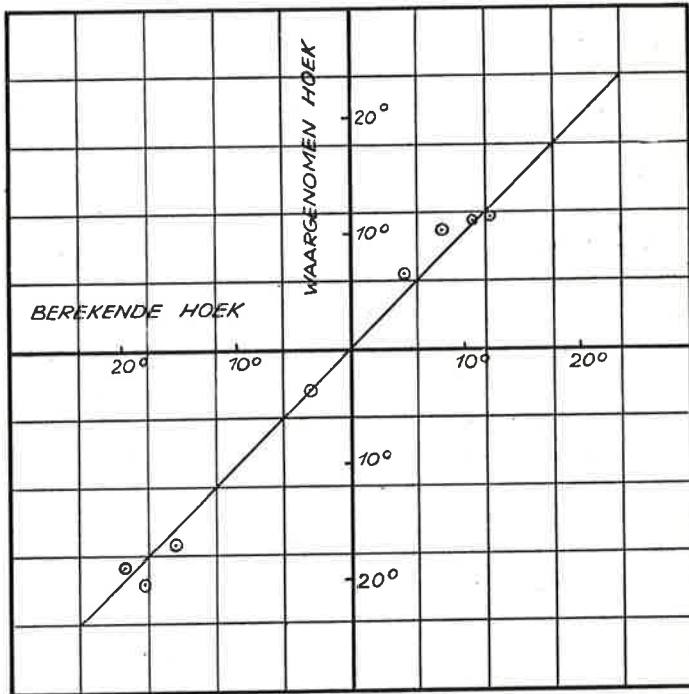


Fig. 28.

In deze grafiek zijn de waarnemingen van Steinberg en Snow betreffende het twee-kanalensysteem weergegeven. De waargenomen uitwijking van het geluidsbeeld is uitgezet als functie van de berekende uitwijking, als de intensiteitsverhouding van de luidsprekers varieert. Bij dit experiment waren twee luidsprekers opgesteld in het horizontale vlak door de ooras en waarvan de richtingen hoeken van resp. 20° en 12° met het middelloodvlak van de ooras maakten.

HOOFDSTUK IV.

REALISATIE VAN STEREOFONISCHE GELUIDS- WEERGAVE MET LUIDSPREKERS IN ZALEN.

Zooals we reeds eerder hebben uiteengezet, kan een eenvoudige stereofonische installatie verwezenlijkt worden door in een studio een kunsthoofd met twee microfoons te plaatsen en ieder dier microfoons via een lijn en een versterker te verbinden met een eigen luidspreker. Analoge resultaten kan men verkrijgen door twee microfoons ruimtelijk gescheiden en op eenige afstand van elkaar aan te brengen. Men is natuurlijk niet aan twee kanalen gebonden, maar om verschillende redenen is dit toch wel het meest bruikbare systeem. Behalve dat dit systeem met de minste kosten is uit te voeren, is het, als we aan eventueele registratie denken, ook het eenvoudigst te realiseeren. Passen we bovendien een juiste dimensionering toe, wat opstelling der microfoons betreft, dan behoeft het, wat ruimtelijke weergave aangaat, niet onder te doen voor systemen, waarbij meerdere kanalen worden gebruikt. Op de afbeelding van het twee-kanalensysteem zullen we nog verder ingaan.

Neemt een spreker een willekeurige stand in ten opzichte van de microfoons van een twee-kanalensysteem, dan kan men eenvoudig berekenen, welke intensiteitsverhouding en welk tijdsverschil tusschen de microfoons en dus ook tusschen de luidsprekers zullen optreden. Met behulp van de gegevens, verwerkt in de figuren 20, 21 en 22, is nu de vraag te beantwoorden, waar de toehoorder, die geplaatst is als in fig. 19, het geluidsbeeld zal waarnemen. Bij een anderen toehoorder echter, die zich meer opzij bevindt, zullen een andere intensiteitsverhouding en een ander tijdsverschil aan de ooren optreden, wat tot gevolg heeft, dat hij het geluidsbeeld op een andere plaats waarneemt. Zooals eenvoudig is in te zien, is de wijziging van tijdsverschil en intensiteitsverhouding dusdanig, dat bij een zich naar opzij bewegen van den toehoorder, het geluidsbeeld in dezelfde richting medebeweegt. We komen dus voor het feit te staan, dat toehoorders, die zich op

willekeurige plaatsen bevinden, een andere afbeelding van de studioruimte krijgen dan één die de plaats inneemt, als aangegeven in fig. 19.

Nu blijkt het mogelijk te zijn, voor iedere plaats in een zaal uit te rekenen, waar het geluidsbeeld van een spreker, die zich op een willekeurige plaats voor de microfoons bevindt, zal worden waargenomen.

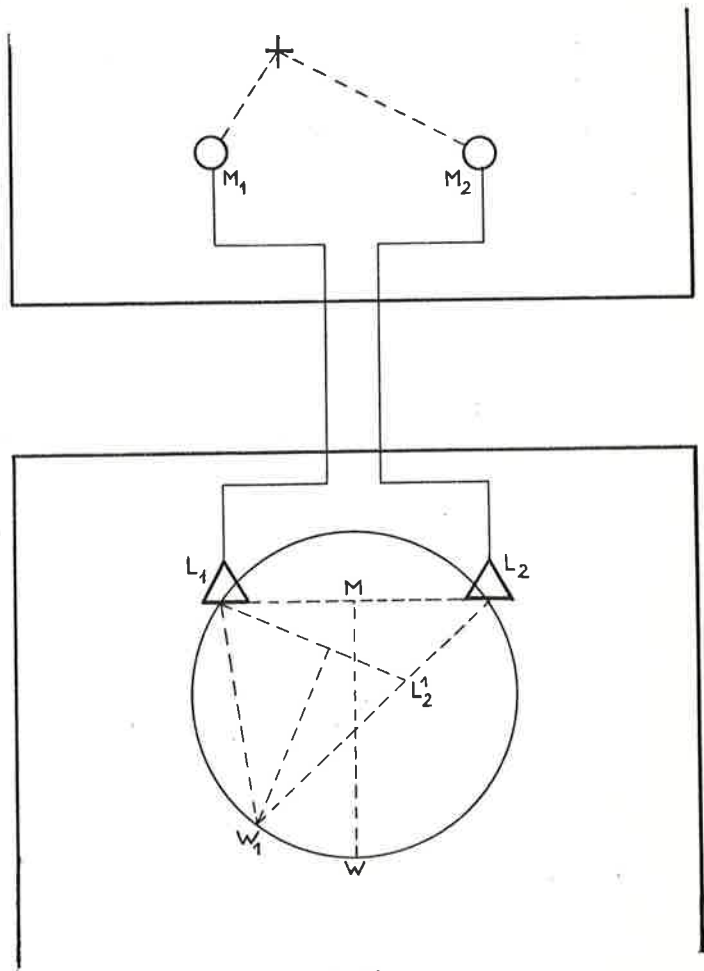


Fig. 29.

De onderlinge stand van L_1 , L_2 en W is dezelfde als in fig. 19.

Bij de proeven, die we hebben gedaan, is de maximale hoekverdraaiing, die het geluidsbeeld kan hebben, 27° . De krommen, die het verband aangeven tusschen uitwijking van het geluidsbeeld als functie van tijdsverschillen en intensiteitsverhoudingen, gelden dan ook alleen voor die plaatsen, waarvoor geldt, dat de hoek L_1WL_2 54° is; dus voor die plaatsen, die liggen op een cirkel, getrokken door L_1 , L_2 en W . Willen we nu bepalen, waar W_1 het geluidsbeeld waar zal nemen, dan gaan we als volgt te werk; zie fig. 29. We trekken de bissectrice van hoek $L_1W_1L_2$ en laten daar uit L_1 een loodlijn op neer. Deze snijdt W_1L_1 in L_2' . We denken nu luidspreker L_2 vervangen door L_2' , waarbij L_2' de intensiteit heeft, die L_2 ter plaatse van L_2' geeft en bovendien nog een tijdsvertraging, overeenkomende met de afstand L_2L_2' .

Op de reeds eerder aangegeven wijze berekenen we, waar W_1 het geluidsbeeld waarneemt. Willen we dergelijke berekeningen voor het geheele platte vlak kunnen verrichten, dan moeten de krommen: uitwijking geluidsbeeld als functie van tijdsverschillen en van intensiteitsverhoudingen alléén nog bepaald worden voor een waarnemer, die zich op verschillende plaatsen bevindt op de middelloodlijn van L_1L_2 .

In de praktijk is echter gebleken, dat het voldoende is de berekening uit te voeren voor een waarnemer, die een plaats inneemt als is aangegeven in fig. 19. Heeft men naar aanleiding van die berekening de sprekers voor de microfoons dusdanig weten op te stellen, dat voor die plaats de meest gunstige afbeelding wordt verkregen, dan is dit ook gemiddeld voor alle andere plaatsen in de zaal het geval.

We hebben al aangetoond, dat, als een waarnemer zich van uit het midden naar opzij verplaatst, het geluidsbeeld zich in dezelfde richting medebeweegt. Neemt een zich in het midden bevindende waarnemer een geluidsbeeld waar, dat zich verplaatsen kan over het geheele gebied, gelegen tusschen de luidsprekers, dan is dit voor een waarnemer opzij niet meer het geval; voor hem is de afbeelding ineengekrompen. Nemen we nu aan, dat men om voordeel van de stereofonische geluidswaergave te hebben, een geluidsbeeld-verschuiving over een gebied van de halve afbeeldingsruimte moet kunnen waarnemen, dan laat zich aan de hand van luisterproeven bepalen, welke plaatsen in een zaal daaraan niet

voldoen. Zoals vanzelf spreekt, kan men dit resultaat ook door de hierboven aangegeven berekeningsmethode verkrijgen.

De proeven zijn genomen in een kleine bioscoopzaal van eenvoudige vorm. De luidsprekers bevinden zich achter het projectiedoek en aan de zijkanten daarvan, zoodat het visuele en het geluidsbeeld zich over de geheele breedte van het doek kunnen bewegen. Het resultaat is in fig. 30 weergegeven.

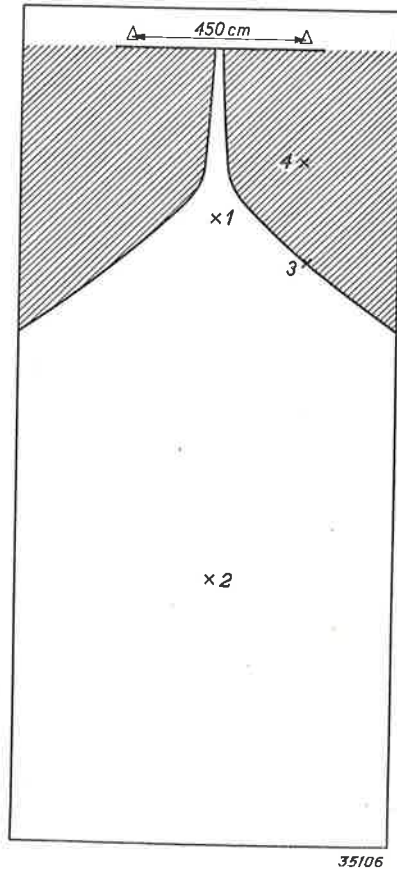


Fig. 30.

Op plaatsen in de gearceerde gebieden neemt de toehoorder een maximale verschuiving van het „geluidsbeeld” waar, over hoogstens de halve breedte van het projectiedoek, zoodat hier het stereofonisch effect onvoldoende is. De luidsprekers zijn aan de zijkanten van en achter het projectiedoek geplaatst.

We zien, dat de goedkoope rangen, vooraan en opzij in de zaal, het minste profijt van de stereofonische weergave trekken. De beste weergave wordt verkregen voor plaatsen, die zich bevinden in het middelloodvlak van de verbindingslijn der luidsprekers.

In fig. 31 is bovendien nog aangegeven voor de plaatsen 1, 2, 3 en 4 uit fig. 30 welke geluidsbeeldverschuivingen kunnen worden waargenomen. Zooals direct opvalt, is dit voor plaats 4 onvolgende.

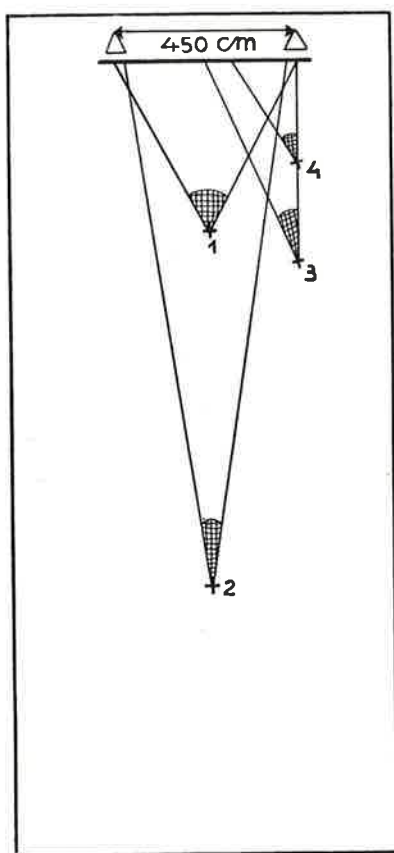


Fig. 31.

In deze figuur geven de vanuit iedere plaats getrokken lijnen aan, over welk gebied geluidsbeeldverschuivingen kunnen worden waargenomen.

De afbeelding, die wordt bereikt, door gebruik te maken van twee microfoons, geplaatst in een „kunsthoofd”.

We willen nagaan welke afbeelding men bereikt, als men de microfoons niet ruimtelijk gescheiden aanbrengt, maar diametraal in een bol met een diameter van 20 cm, een „kunsthoofd” dus. Aannemende, dat een dergelijke bol vrijwel dezelfde werking als acoustisch obstakel zal hebben als een normaal hoofd, kunnen we uit fig. 14 en fig. 11 voor iedere stand van een spreker ten opzichte van deze bol nagaan, welke intensiteitsverhouding en tijdsverschil aan de microfoons en dus aan de luidsprekers optreden. Met behulp van de fig. 20, 21 en 22 kunnen we nu berekenen, waar een waarnemer, geplaatst volgens fig. 19, het geluidsbeeld zal waarnemen. Het resultaat is weergegeven in fig. 32.

De berekende waarden, als in fig. 32 aangegeven, kloppen met de waarneming voor het geval de spreker zich op een afstand van het kunsthoofd bevindt grooter dan 350 cm. Dat dit zoo

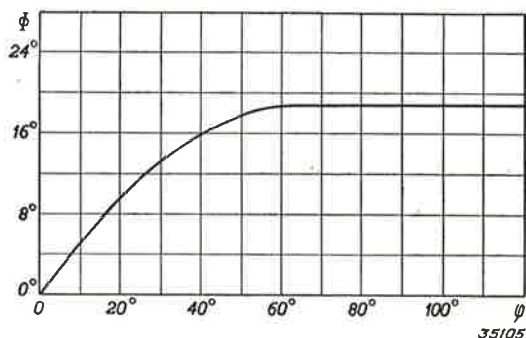


Fig. 32.

Hoekverdraaiing ϕ van het „geluidsbeeld” als functie van de hoek φ van de spreker ten opzichte van het kunsthoofd.

moet zijn, is direct in te zien uit het feit, dat de geheele berekening berust op de metingen van SIVIAN en WHITE ¹⁾, die de intensiteitsverhoudingen hebben bepaald, welke aan de ooren optreden als een geluidsbron, zuiver sinusvormige tonen produceerde, zich om het hoofd heen beweegt. Bij deze proeven moet de afstand van de geluidsbron tot het hoofd groot zijn ten opzichte van de

¹⁾ J. Sivian en S. D. White. Journ. Acoust. Soc. Amer. 4, 288, 1933.

afmetingen van het hoofd, als men nauwkeurig de buiging en reflectie van de geluidsgolven om en aan het hoofd wil bepalen. Is dit niet het geval, dan treden ook nog intensiteitsverhoudingen aan de ooren op, omdat men de afstanden van ieder der ooren tot de geluidsbron niet meer als gelijk mag aannemen.

Zoolang de spreker binnen een hoek van 50° rechts of links van het midden blijft, wordt een behoorlijke lineaire afbeelding van de beweging der geluidsbron verkregen. De maximale uitwijking van het geluidsbeeld is nog niet geheel 19° , terwijl de luidsprekers zich onder een hoek van 27° ten opzichte van den waarnemer bevinden. Zou men dit systeem in verband met ge-

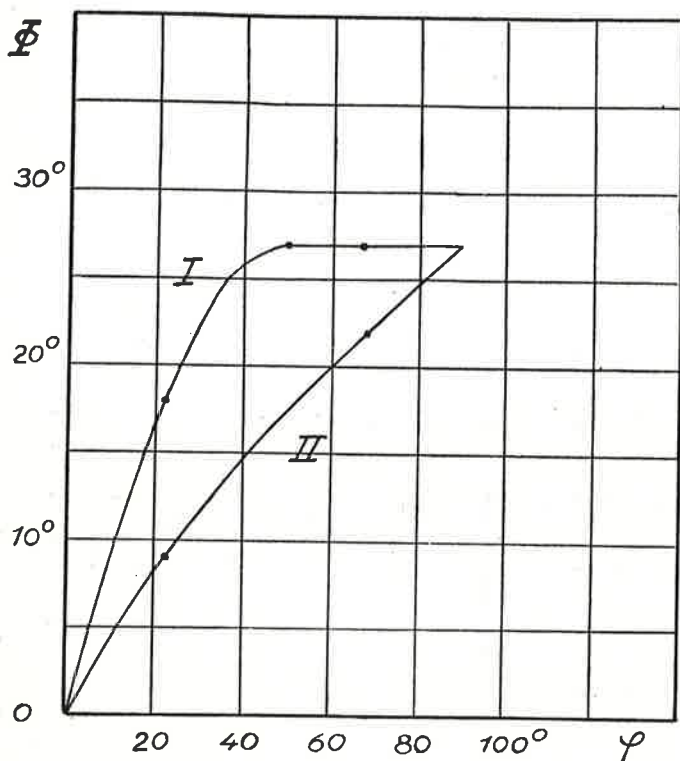


Fig. 33.

Hoekverdraaiing van het geluidsbeeld als functie van de hoek van den spreker t.o.v. het kunsthoofd. De spreker bevindt zich op 125 cm afstand van het kunsthoofd. Kromme I geldt voor een kunsthoofd met diameter van 20 cm.

Kromme II voor een kunsthoofd met diameter van 8 cm.

luidsfilm willen gebruiken, dan zouden de luidsprekers dus buiten het doek moeten worden opgesteld om visuele en acoustische gewaarwording te laten kloppen.

Nu leent de eenvoudige compacte opstelling der microfoons in een kunsthoofd zich bijzonder goed voor het uitzenden van hoorspelen e.d., kortom scènes, waarbij verschillende personen met elkaar in gesprek zijn. Zou men in die gevallen twee gescheiden microfoons gebruiken, dan zouden om een gunstige afbeelding te krijgen, de sprekers op vrij groote afstand van elkaar moeten zijn, hetgeen een vlotte natuurlijke conversatie belemmert. Ook bij gebruik van een kunsthoofd zal men dus de sprekers liever op een kleinere afstand van de microfoons hebben dan 350 cm, bijv. op een afstand van 125 cm. De afbeelding, die we dan krijgen, is in fig. 33 weergegeven, en wel door kromme I.

We zien, dat een goede vrijwel lineaire afbeelding wordt bereikt, zolang de sprekers binnen een hoek van 30° rechts of links van het midden blijven. Deze ruimte is echter te klein om een behoorlijk aantal sprekers te herbergen. Een beter resultaat bereikt men dan ook, door een kunsthoofd te nemen met kleinere diameter. Bij een bepaalde hoekverdraaiing van den spreker ten opzichte van het kleine kunsthoofd zijn dan zoowel de intensiteitsverhouding als het tijdsverschil kleiner dan bij het normale kunst-

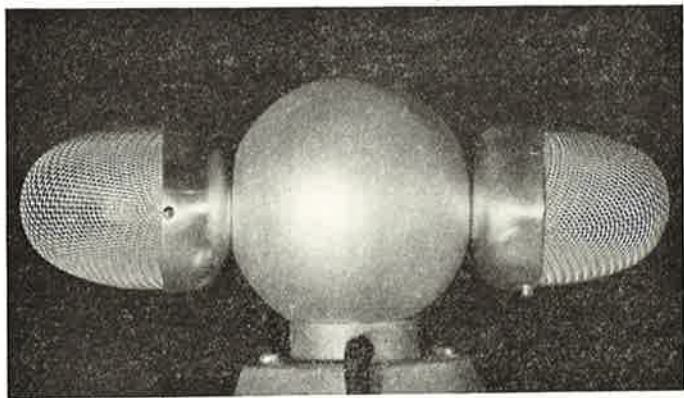


Fig. 34.

Het geeft voordeel in bepaalde gevallen een „klein kunsthoofd” te gebruiken. De microfoons moeten hier buiten op het hoofd worden aangebracht.

hoofd, zoodat we voor iedere stand van den spreker een kleinere uitwijking van het geluidsbeeld zullen waarnemen. Het resultaat is in kromme II van fig. 33 weergegeven. Er is een goede lineaire afbeelding en het blijkt, dat, als de spreker een hoek van 90° ten opzichte van het kunsthoofd is gedraaid, ook juist de uitwijking van het geluidsbeeld maximaal is, zoodat de ruimte, waarin we sprekers kunnen onderbrengen, hier driemaal zoo groot is als bij het groote kunsthoofd.

Voor het geval, dat de acoustische sensaties niet door visueele ondersteund worden, zooals bijv. bij radiouitzendingen het geval zal zijn, biedt het kleine kunsthoofd nog het voordeel, dat het geluidsbeeld scherper gedefinieerd is. Onwillekeurig maakt een spreker kleine bewegingen, waardoor zijn mond telkens iets van plaats verandert, terwijl de spreker zelf toch op zijn plaats blijft.

Een luisteraar, die deze kleine bewegingen van de mond niet ziet, wordt zich de kleine bewegingen van het geluidsbeeld als een zekere onscherpte daarvan bewust. Hoe kleiner nu $\frac{d\Phi}{d\varphi}$ is, des te minder zal het verschijnsel optreden. Zooals we uit fig. 33 zien, komen we ook wat dit punt betreft, met een klein kunsthoofd gunstiger uit.

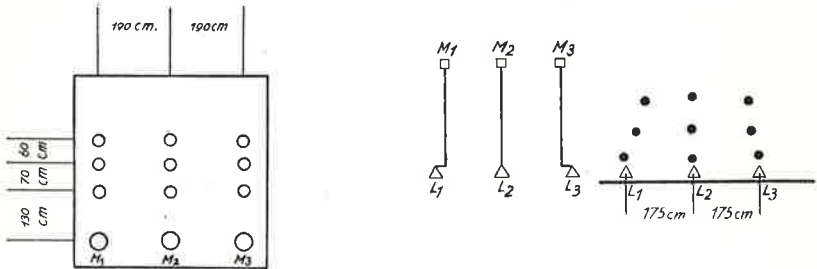
De afbeelding, die wordt bereikt met ruimtelijk gescheiden microfoons.

Wil men groote orkesten stereofonisch weergeven, dan is het beter, gebruik te maken van ruimtelijk gescheiden microfoons. We hebben de proeven van STEINBERG en SNOW daarover zelf nog eens herhaald en de resultaten zijn in de figuren 35 en 36 weergegeven. Aan de linkerkant is door 9 stippen aangeduid, welke plaatsen een spreker voor de microfoons (M) inneemt. In het midden is de schakeling van microfoons en luidsprekers schematisch uitgebeeld en rechts ziet men de plaatsen aangegeven, waar een waarnemer (op 350 cm afstand midden voor de luidsprekers gezeten) veronderstelde, dat de spreker zich bevond. De luidsprekers zijn achter een projectiedoek opgesteld. Daar bij de reproductie van geluid wel de gewaarwording van afstandsvariatie wordt overgebracht, doch niet de afstandsgewaarwording zelf, hebben we de waarnemers ook laten luisteren, als de spreker

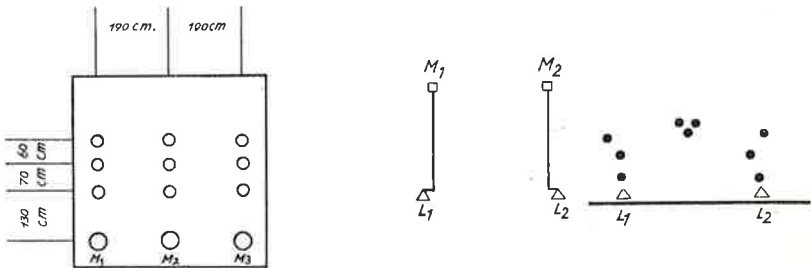
van plaats verandert (al sprekende). Op deze wijze is het gemakkelijker een gewaarwording te krijgen over de onderlinge afstand van de negen achtereenvolgende geluidsbeelden.

De resultaten zijn als volgt:

Drie-kanalensysteem.



Twee-kanalensysteem.



Gemengd systeem I.

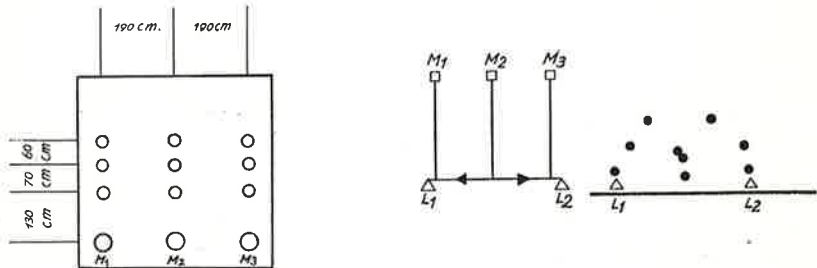
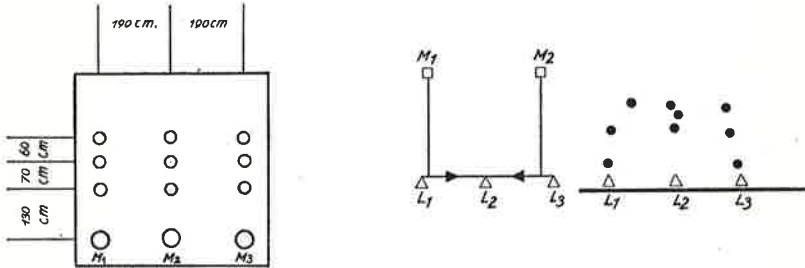


Fig. 35.

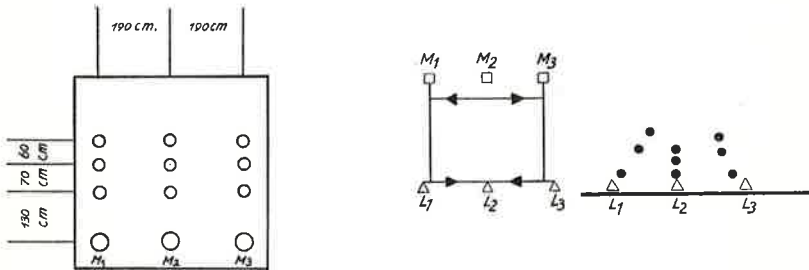
a) *Het drie-kanalensysteem:*

Dit bestaat uit 3 microfoons, ieder verbonden met hun eigen luidspreker. Een goede afbeelding is hier al bereikt.

Gemengd systeem II.



Gemengd systeem III.



Spreken achter filmdoek.

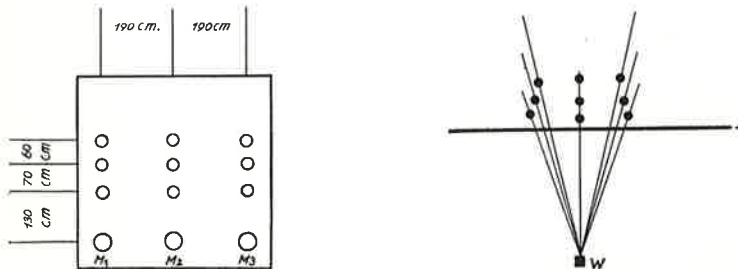


Fig. 36.

b) *Het twee-kanalensysteem:*

Twee microfoons, ieder verbonden met hun eigen luidspreker. Voor de plaatsen midden tusschen de microfoons zijn zoowel de totale intensiteit als de verhouding: $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ kleiner dan bij het drie-kanalensysteem en ook kleiner dan voor de zijplaatsen bij het twee-kanalensysteem. We zullen deze plaatsen dus op grooter afstand (meer naar achteren verschoven) waarnemen.

c) *Gemengd systeem I.*

Drie microfoons, verbonden met twee luidsprekers volgens schema. M_2 geeft zoowel zijn spanning af aan kanaal I als aan kanaal III. Terugwerking van de kanalen I en III op elkaar is niet mogelijk. M_2 vergroot nu de intensiteitsverhouding tusschen L_1 en L_2 . Daardoor worden alle plaatsen meer naar het midden verschoven waargenomen. Tevens zorgt microfoon M_2 er voor, dat de middenplaatsen, die bij het twee-kanalensysteem meer naar achteren worden waargenomen, nu weer meer naar voren worden aangeduid.

d) *Gemengd systeem II.*

Twee microfoons, volgens schema verbonden met drie luidsprekers. L_2 ontvangt energie van de kanalen I en III, doch deze kunnen niet op elkaar inwerken. Voor de middenplaatsen geldt weer, dat de totale intensiteit en de verhouding: $\frac{\text{direct geluid}}{\text{nagalm geluid}}$ kleiner is dan voor de zijplaatsen, wat tot gevolg heeft, dat zij verder weg worden waargenomen. Door L_2 wordt de intensiteitsverhouding aan de ooren vergroot, waardoor dus alle zijplaatsen meer naar het midden toe worden afgebeeld.

e) *Gemengd systeem III.*

Drie microfoons volgens schema verbonden met drie luidsprekers. De kanalen I en III kunnen niet op elkaar inwerken. M_2 zorgt er voor, dat de middenplaatsen naar voren worden waargenomen en M_2 en L_2 tezamen, dat alle plaatsen meer naar het midden worden afgebeeld.

Wat de gemengde systemen betreft, kunnen we de afbeelding

van de buitenplaatsen net zooveel naar het midden trekken als we willen, naarmate we de midden-microfoon en/of luidspreker meer of minder laten medewerken dan de buiten-microfoons en luidsprekers.

Tot slot werd nog een spreker op 9 verschillende plaatsen achter het filmdoek gezet. Het bleek, dat de richting, waarin de spreker zich bevond, feilloos werd waargenomen.

Bij alle hier genoemde systemen kon de richting van het geluidsbeeld gemakkelijk en vrij nauwkeurig worden aangegeven. Met de afstand was dat niet het geval. De indruk, die daarover werd verkregen, was vaag. Evenwel was dit ook het geval, alhoewel in mindere mate, toen van een spreker achter het filmdoek de afstand geschat moest worden.

Zonder twijfel voldoet het drie-kanalensysteem het beste. In verband met commerciële mogelijkheden zullen we ons echter tot het minimum van een twee-kanalensysteem moeten beperken en in dat verband voldoet het *Gemengd systeem I* het beste. We hebben hier bij de opname weliswaar drie microfoons met bijbehorende versterkers nodig, doch dat is niet belangrijk. Wat wel belangrijk is, is het feit, dat er slechts twee kanalen (dus ook bijv. op film slechts twee registraties) nodig zijn en dus ook de afspeelinstallatie de eenvoudigst denkbare is, n.l. die van het twee-kanalensysteem, terwijl er een betere afbeelding is dan bij het normale twee-kanalensysteem.

Vergelijken we onze eigen waarnemingen met die van STEINBERG en SNOW (waarvan de resultaten in het vorige hoofdstuk zijn weergegeven), dan blijkt er goede overeenkomst te zijn. De verschillen, die nog optreden, zullen voornamelijk tot oorzaak hebben, dat zij hun waarnemers op veel grotere afstand van de luidsprekers hebben geplaatst. Het heeft echter voordeelen, de afstand van waarnemer tot luidsprekers niet te groot te maken, daar anders bij niet zeer goed acoustisch gedempte zalen de nauwkeurigheid van richtingswaarneming door de nagalm ongunstig wordt beïnvloed. Een grotere afstand dan bij onze eigen proeven het geval was, is ook niet nodig, daar gebleken is, dat als de stereofonische weergave voor een waarnemer, opgesteld zoals bij onze proeven het geval was, het best voldeed, dit ook voor het geheele auditorium het geval was.

Verschijnselen, die optreden als de luidsprekers tegengesteld in phase zijn.

Bij de voorgaande proeven is altijd stilzwijgend verondersteld, dat de luidsprekers in phase waren. Is dit niet het geval, dan ontvangt de waarnemer geen scherpe richtingsgewaarwording meer.

We herhalen de proef, waarbij een goede spraak-gramfoonplaat wordt afgespeeld via twee identieke versterkers en luidsprekers. De plaats van den waarnemer is weer midden voor de luidsprekers; zie fig. 37.

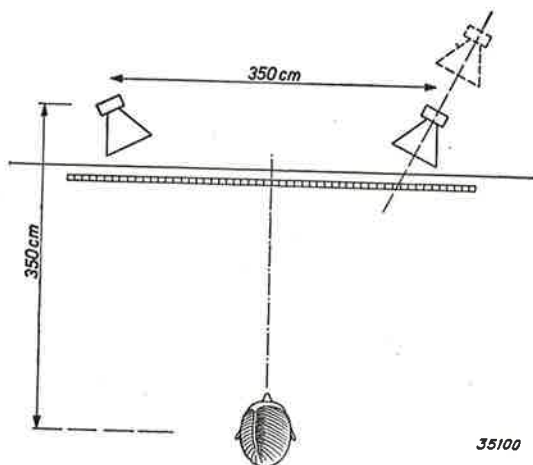


Fig. 37.

Onderlinge stand van waarnemer en luidsprekers bij de proeven over het niet in phase zijn van de luidsprekers.

Zijn de luidsprekers in phase en hebben zij gelijke intensiteit, dan neemt men een scherp begrensd geluidsbeeld waar midden tusschen de luidsprekers. Poolt men nu één der luidsprekers om, zoodat zij in tegenphase zijn, dan wordt het geluidsbeeld zeer vaag. Men neemt het geluidsbeeld nog in het midden waar, doch kleine bewegingen van het hoofd naar rechts of links doen het

geluidsbeeld eveneens naar rechts of links verspringen en wel over ongeveer 70 cm. (Deze uitwijking is moeilijk nauwkeurig te bepalen, daar dit geluidsbeeld vaag is).

Geeft men, met de luidsprekers in fase, door een intensiteitsvariatie het geluidsbeeld een uitwijking uit het midden en poolt men dan een der luidsprekers om, dan wordt het geluidsbeeld wederom zeer vaag en men neemt het nog verder uit het midden verschoven waar. De oorzaak voor deze extra uitwijking van het geluidsbeeld kan nu de volgende zijn:

- 1) Door het ompolen wordt de intensiteitsverhouding aan de ooren gewijzigd. Dit is niet te verwachten.
- 2) Het effect kan op een of andere wijze met een tijdsverschil samenhangen.

Om uit te maken of inderdaad wijziging van de intensiteitsverhouding aan de ooren optreedt, is het volgende experiment gedaan:

a) Met de luidsprekers in fase wordt aan het geluidsbeeld een uitwijking van 75 cm naar rechts gegeven. De intensiteit van het geluid ter plaatse van den waarnemer is hoog, ongeveer 80 phon. Na 8 minuten ononderbroken luisteren wordt het intensiteitsniveau der luidsprekers plotseling weer gelijk gemaakt en het geluidsbeeld neemt men nu 45 cm links van het midden waar. Daarna beweegt het zich weer langzaam naar het midden toe. Dat het geluidsbeeld direct na het ompolen links van het midden wordt waargenomen, vindt zijn oorzaak hierin, dat het rechter oor meer verdoofd is geraakt dan het linker en daardoor minder gevoelig is geworden.

b) Met de luidsprekers in fase wordt aan het geluidsbeeld een kleine uitwijking (15 cm) gegeven naar rechts. Door ompolen van één der luidsprekers verschuift het geluidsbeeld nu nog meer naar rechts. De uitwijking bedraagt dan ongeveer 80 cm. Ook nu wordt ononderbroken 8 minuten geluisterd (geluidsniveau ter plaatse van den waarnemer weer 80 phon.), en daarna omgepoold. Het geluidsbeeld wordt nu weer in zijn beginstand waargenomen. De verdooving voor beide ooren is dus even sterk, zoodat we dus mogen aannemen, dat door het ompolen geen wijziging in de intensiteitsverhouding tusschen de ooren ontstond en het verschijnsel als een tijdseffect moet worden beschouwd.

Opheldering hierover verschaft een artikel van REICH en BEHRENS ¹⁾ Zij hebben proeven genomen omtrent het verkrijgen van een richtingsgewaarwording bij zuivere tonen en impulsen. De proeven werden gedaan met hoofdtelefoons en onderzocht werd de invloed van tijdsverschillen. Zij komen o.m. tot de volgende conclusies:

- 1) De richtingsgewaarwording berust op de combinatie der prikkels, die van de plaatsen met grootste $\frac{dp}{dt}$ van de geluidsdruk-tijdkromme uitgaan.
Zijn er verschillende mogelijkheden, dan kiest men de combinatie met het kleinste tijdsverschil.
- 2) Bovendien kan de combinatie van een druktoename in het eene oor met een even steile drukafname in het andere oor tot een richtingsindruk leiden.

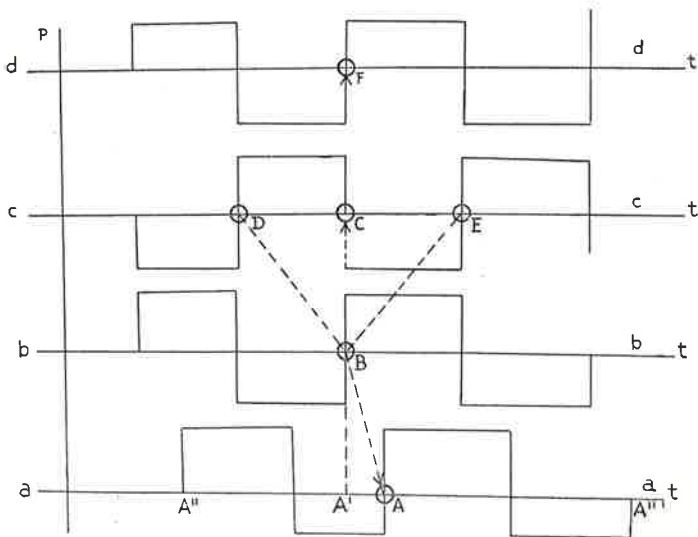


Fig. 38.

In figuur 38 geven de grafieken a en b voor een bepaald geval aan, hoe de geluidsdruk verandert als functie van de tijd aan ieder van een paar ooren. (De geluidsdruk wordt bijv. door een hoofdtelefoon teweeggebracht).

¹⁾ Reich en Behrens. ZS. f. techn. Phys. 14, 1, 1933.

In punt B van kromme b is nu: $\frac{d p}{d t}$ maximaal en positief. Overeenkomstige punten op kromme a zijn bijv. A, A'', A'''. Het gehoor kan nu kiezen uit vele combinaties, doch kiest de combinatie: BA, daar deze correspondeert met het kleinste tijdsverschil, n.l. A'A. Zijn nu bijv. b en d de geluidsdrukkrommen, dan ziet men dat geen tijdsverschil waargenomen wordt. Poolt men één der hoofdtelefoons om, dan treden aan de ooren geluidsdrukken op, voorgesteld door de krommen b en c. Er zijn nu twee volkomen gelijkwaardige combinatiemogelijkheden, n.l. BD en BE en het gehoor weet niet, welke te kiezen. REICH en BEHRENS vonden, dat in zulke gevallen de moeilijkheid nog wordt vergroot, doordat er dan een „stoorcombinatie" optreedt, n.l. BC. Dat is een combinatie, waarbij men twee gelijke, doch van tegengesteld teken voorziene $\left(\frac{d p}{d t}\right)_{\max}$ gaat combineeren. Men kan dus drie verschillende richtingsgewaarwordingen krijgen, overeenkomende met de tijdsverschillen, die voortspruiten uit de drie mogelijke combinaties.

Hetzelfde geval doet zich voor bij ompolen van één der luidsprekers en het geluidsbeeld in het midden. Vanwege de optredende onzekerheid wordt het geluidsbeeld vaag. Blijft men stil met het hoofd zitten, dan neemt men de stoorcombinatie in het midden waar. Is er al een oorzaak, die het geluidsbeeld uit het midden in een bepaalde richting doet verschuiven (bijv. een zijdelingsche verplaatsing van het hoofd of een intensiteitsverschil), dan wordt *die* combinatie uitgekozen, die het geluidsbeeld in dezelfde richting doet verschuiven en wordt de uitwijking van het geluidsbeeld dus vergroot.

Vermeld dient nog te worden, dat verschillende personen de effecten, die bij ompolen optraden, niet konden waarnemen. Zij hadden in dat geval heelemaal geen richtingsgewaarwording meer.

Enkele belangrijke punten bij de realisatie van stereofonische geluidsweergave met luidsprekers in zalen.

Het is van het grootste belang, dat bij stereofonische weergave, waar het geluid dus via verschillende „kanalen" gereproduceerd wordt, deze kanalen ook volkomen identiek zijn. Is dit niet het geval, dan gaat de toehoorder kwaliteitsverschillen mede tot een

richtingsgewaarwording verwerken en neemt hij het „geluidsbeeld” waar, verschoven in de richting van de luidspreker, die het meest natuurlijke geluid produceert.

Om de intensiteitsverhoudingen niet te vertroebelen, is het gewenscht, dat de geluidsstraling der luidsprekers constant is binnen de hoek, waaronder de luidspreker het publiek ziet. Dit is natuurlijk op zichzelf al een noodzakelijkheid als men de eisch stelt, dat overal in de zaal de kwaliteit van het geluid dezelfde moet zijn.

Buiten de hier aangegeven hoek moeten de luidsprekers liefst zoo weinig mogelijk stralen, daar de hierdoor onstane geluids-bijdragen de toehoorders na één of meer reflecties alsnog bereiken in de vorm van nagalm, waardoor de „scherpte” van het geluidsbeeld nadeelig wordt beïnvloed. Aan deze eischen voldoen de zoo-genaamde „multi-cellular horns”, die tegenwoordig veel in bioscopen worden gebruikt. Het openingsoppervlak van deze hoorns is echter vrij groot, meestal ongeveer één vierkante meter. Wordt het geluid door één zoo'n hoorn gereproduceerd, dan is de richting daarvan al niet nauwkeurig te bepalen en bij stereofonische weergave heeft dat tot gevolg, dat geen scherp geluidsbeeld wordt verkregen. Wat dat betreft, voldoen in het algemeen luidsprekers met kleinere opening beter.

Besparing aan luidsprekers bij stereofonische weergave.

Bij geluidswaergave in bioscopen worden tegenwoordig veelal voor het hooge en het lage frequentiegebied verschillende luidsprekers gebruikt. De scheidingsfrequentie ligt meestal bij 250 à 300 per/sec. Nu hebben we reeds gezien, dat tonen met frequenties lager dan 300 per/sec, practisch geen richtingsgewaarwording kunnen veroorzaken. Men hoeft dus voor een stereofonische weergave alleen twee luidsprekers voor hooge tonen aan weerskanten van het doek op te stellen, terwijl de lage tonen door een enkele luidspreker op een willekeurige plaats, bijv. midden achter het doek, kunnen worden weergegeven.

„Schijnstereofonie”.

Bij de monaurale reproductie van muziek is een verbetering te verkrijgen door toepassing van schijnstereofonie. De versterkte

spanning van één microfoon, pick-up of wat dies meer zij wordt toegevoerd aan twee gescheiden luidsprekers. De luisteraar zal dus het geluid ergens tusschen de luidsprekers waarnemen, afhankelijk van de plaats, die hij ten opzichte van de luidsprekers inneemt. De indruk, dat alle muziek uit één opening komt, n.l. uit die van de luidspreker, is nu verdwenen.

Zorgt men nu nog, dat het ontstane geluidsbeeld vaag is, door bijvoorbeeld luidsprekers met groote opening te nemen, dan neemt men de muziek over een vrij groote ruimte uitgespreid waar, wat aangenamer aandoet dan wanneer alle geluid uit één scherp gedefinieerde richting komt.

HOOFDSTUK V.

TECHNIEK DER STEREOFONISCHE GELUIDS- WEERGAVE.

De gebieden, waarop de stereofonische geluidswaergave met vrucht is toe te passen, zijn de volgende:

- A. Geluidsfilm.
- B. Omroep.
- C. Geluidsversterking voor spraak („Public Address”) en muziek („Bandrepeaters”).
- D. Apparaten voor slecht-hoorenden.
- E. Sterefoonplaten.

Ieder van deze gebieden zal nu nader worden besproken.

Geluidsfilm.

Op de eer, het eerst de stereofonische waergave bij geluidsfilm te hebben toegepast, wordt door het Ufabedrijf te Neubabelsberg aanspraak gemaakt. Dit geschiedde begin 1934 ¹⁾. De spanningen, afgenomen van twee zich op 21 cm afstand bevindende condensatormicrofoons, werden gescheiden versterkt en toegevoegd aan een Kerrcel, waarvan een plaat in het midden was doorgesneden, zoodat op de film twee gescheiden sporen ontstonden. Voor de waergave, werd een normale projector, door afbeelding van de waergavespleet op twee gescheiden fotocellen, voor dubbele af-tasting omgebouwd. Ook hier werd door de mogelijkheid van ruimtelijk hooren een verrassende toename in waergavekwaliteit vastgesteld.

De eerste openbare stereofonische geluidsfilm-demonstratie werd in 1937 te New-York gegeven ²⁾. De film was volgens het twee-kanalensysteem opgenomen en de registratie geschiedde met een

¹⁾ C. Becker. Kinotechn. 20, 120, 1938.

²⁾ J. P. Maxfield. Journ. Soc. Mot. Pict. Eng. 30, 131, 1938.

„four ribbon light valve”, *) zooals ook bij push-pull registratie gebruikelijk is. Aan ieder paar bandjes werd het signaal van één microfoon toegevoegd. De registratie ziet er dan ook uit als een gewoon push-pull spoor, behalve dan, dat beide helften ervan nu niet 180° in fase zijn verschoven. Ook hier geschiedde de aftasting met een dubbele fotocel. Bij deze film kon ook worden nagegaan, welk effect optrad, als visueele en acoustische waarneming met elkaar in tegenspraak waren. Daartoe was een scène zoodanig opgenomen, dat het visueele beeld zich in een andere richting bewoog dan het geluidsbeeld. Het effect werd door het publiek duidelijk waargenomen en veroorzaakte een gevoel van onbehaaglijkheid.

Door deze scène is dus nog eens aangetoond, welk een goede ruimtelijke weergave met het twee-kanalensysteem wordt verkregen, daar bij normaal afspelen van een film (dus met één geluidsspoor) het geluidsbeeld bijna altijd naar de plaats van het visueele beeld wordt toegetrokken.

Dat de mogelijkheid bestaat, een stereofonische geluidsfilm op te nemen door op twee films ieder één spoor te registreren, is aangetoond door HUNT ¹⁾. Zoowel bij het opnemen als bij het afspelen werd door middel van een speciaal aangebracht synchronisatieapparaat zorg gedragen, dat beide films met volkomen dezelfde snelheid werden bewogen.

Om na te gaan of een dergelijke perfecte synchronisatie noodzakelijk is, hebben we zelf nog het volgend experiment gedaan:

*) Een light-valve wordt gebruikt bij het vastleggen van geluid op film, volgens het „variabele-intensiteitssysteem”.

Het is dat deel van de registratieapparatuur dat wordt gebruikt om de lichtbundel, die op de film valt te moduleeren. De inrichting ervan is als volgt: In een magnetisch veld bevinden zich twee metalen bandjes, die in tegengestelde richting door de te registreren stroom worden doorlopen. De bandjes zijn zoodanig in het veld aangebracht, dat zij door hun bewegingen een spleet van veranderlijke breedte vormen en op deze wijze een modulatie geven van het op de film vallende licht.

Voor „push-pull recording” worden twee van dergelijke systemen tot een eenheid samengebouwd. Vandaar de naam: „four ribbon light valve”.

¹⁾ F. L. Hunt, Journ. Soc. Mot. Pict. Eng. 31, 351, 1938.

Twee Philips-Miller *) geluidsopnamemachines van verouderd type, waarbij de registratie nog op geperforeerde film plaats vond, waren via twee tandwieloverbrengingen aan één motor gekoppeld. De film doorliep achtereenvolgens beide machines en de twee geluidssporen werden naast elkaar opgeteekend, doch over eenigen afstand in de lengterichting der film verschoven. De stand van de film bij het opnemen werd vastgelegd, zoodat bij het afspelen de film op precies dezelfde wijze kon worden ingelegd.

Om zoo goed mogelijk de eventueele gebreken van de registratie- en afspeelapparatuur te kunnen nagaan, werd op de volgende wijze een schijnstereofonie-opname gemaakt: Eén bandmicrofoon werd op 10 cm afstand besproken en de spanning hiervan aan beide opnameversterkers toegevoerd. De volgende voordeelen worden hiermede bereikt:

- a) Door het van zoo korte afstand bespreken van de microfoon wordt de nagalm (die tot verbreeding van het geluidsbeeld aanleiding geeft) uitgeschakeld.
- b) Door het gebruik maken van één microfoon voorkomt men, dat door kleine bewegingen van den spreker intensiteitswijzigingen tusschen de luidsprekers optreden, wat een verschuiving van het geluidsbeeld met zich mede brengt. Werden nu bij het weergeven de spanningen van beide fotocellen ieder aan een versterker en luidspreker toegevoerd en bevond een waarnemer zich voor de luidspreker als in fig. 37 aangegeven, dan nam deze het volgende waar.
 - 1) De plaats van het geluidsbeeld was midden tusschen de luidsprekers.
 - 2) Het geluidsbeeld bleef op zijn plaats. Geen verschuiving werd waargenomen.
 - 3) Het geluidsbeeld was moeilijk waar te nemen. Het was over een vrij groote breedte „uitgesmeerd”.

Om te kunnen bepalen, wat de oorzaak van de geluidsbeeldverbreeding kon zijn, hebben we op de film twee sporen gesneden van lage frequentie n.l.: 80 per/sec. De film werd afgespeeld en de output-spanningen werden zoo geregeld, dat zij gelijk waren.

*) Een uitvoerige beschrijving van het Philips-Miller-systeem voor geluidsregistratie geeft: R. Vermeulen, Philips Techn. Tijdschr. 1, 107, 1936.

Ieder der spanningen werd op een stel plaatjes van een kathodestraaloscillograaf gezet. Vonden er nu tusschen de filmsporen geen tijdsverschuivingen plaats, dan zou men een lijn onder 45° moeten waarnemen, of voor het geval de fasedraaiing van beide versterkers niet gelijk was, een ellips met assen onder een hoek van 45° . Waargenomen werd een ellips met assen onder een hoek van 45° , waarvan de assenverhouding zich periodiek en in dezelfde mate wijzigde (een pulseerende ellips dus). Door de assenverhouding der ellips in de twee uiterste standen te bepalen, was de maximale faseverschuiving en dus het maximale periodiek optredende tijdsverschil, dat tusschen beide sporen optrad, te bepalen.

Brengt men twee trillingen, ieder met maximum amplitude: a en cirkelfrequentie: ω , waarvan de één in phase een hoek φ verschoven is t.o.v. de andere, ieder op een stel plaatjes van een kathodestraaloscillograaf, dan is de ontstane figuur eenvoudig af te leiden:

$$x = a \sin \omega t \qquad y = a \sin (\omega t + \varphi)$$

$$x^2 + y^2 - 2xy \cos \varphi = a^2 \sin^2 \varphi.$$

Draaien we de assen over 45° , dan krijgen we:

$$x = \frac{1}{2} \sqrt{2} (\bar{x} - \bar{y}) \qquad y = \frac{1}{2} \sqrt{2} (\bar{x} + \bar{y})$$

Dit gesubstitueerd geeft:

$$\frac{x^2}{\frac{a^2 \sin^2 \varphi}{1 - \cos \varphi}} + \frac{y^2}{\frac{a^2 \sin^2 \varphi}{1 + \cos \varphi}} = 1.$$

De verhouding der assen is: $\sqrt{\frac{1 + \cos \varphi}{1 - \cos \varphi}}$.

We zien dus, dat deze verhouding zich met variable hoek φ wijzigt. De opgemeten assenverhouding in de uiterste standen der ellips bedroegen resp. 8.0 en 2.5. Voor deze waarden vindt men: $\varphi = 44^\circ$ en $\varphi = 14^\circ$. Dus een maximale faseverschuiving van 30° .

Bij een herhaling van het geheele experiment bedroegen de assenverhoudingen resp. ∞ en 4.4, waaruit volgt een maximale faseverschuiving van 26° . Gemiddeld dus een faseverschuiving van 28° . Dit komt overeen met een grootste tijdsverschuiving van de geluidssporen ten opzichte van elkaar van:

$$\frac{28}{360} \times \frac{1}{80} \text{ sec.} = 10^{-3} \text{ sec.}$$

Een tijdsverschuiving van 10^{-3} sec. veroorzaakt een uitwijking van het geluidsbeeld van 70 cm. (Zie fig. 22). Er treedt dus een periodieke verschuiving van het geluidsbeeld op. Is de frequentie van deze verschuiving groter dan 1 per/sec, wat hier het geval is, dan kunnen we de verschuiving niet meer volgen, doch interpreteren het verschijnsel als een vaag geluidsbeeld. In ons geval trad dus een geluidsbeeldverbreding op van 70 cm, wat niet toelaatbaar is.

De kleine periodiek optredende verschuivingsmogelijkheid, die beide films ten opzichte van elkaar hebben door onregelmatigheden in de tandwieloverbrenging, staat hier een goed stereofonisch effect in de weg.

Om de overgang van normale naar stereofonisch opgenomen films gemakkelijker te maken, hebben OFFENHAUSER en ISRAËL¹⁾ het volgende „quasi-binaural system” aangegeven. Uitgaande van één geluidsspoor (bij de gehouden demonstraties was dat een grammofoonplaat), voerden zij de daarvan verkregen wisselspanning toe aan een inrichting met regelorganen door hen „Perspective control device” genoemd. Op de uitgang hiervan waren twee naast elkaar opgestelde luidsprekers aangesloten. Op deze wijze verkregen zij met behulp van een één-kanaalopname een twee-kanalenweergave, die inderdaad eenigszins een ruimtelijke gewaarwording gaf. Hiermee stelden zij zich het volgende voor: Een geluidsfilm wordt normaal opgenomen en dan afgespeeld via het „perspective control device”, zoodanig, dat optisch- en geluidsbeeld met elkaar in overeenstemming zijn. De uitgangsspanningen hiervan worden opnieuw geregistreerd en kunnen daarna op één film worden samengevoegd, zoodat we één film met twee geluidssporen verkrijgen. Bij de weergave in bioscopen kunnen dan de twee sporen gescheiden worden weergegeven of ze kunnen worden gemengd door aftasting met één lichtspleet en dan op de gebruikelijke wijze worden weergegeven. In dit laatste geval treedt natuurlijk in het geheel geen stereofonie op, terwijl het eerste geval een voorbeeld is van „schijnstereofonie”. Gegevens over het „perspective control device” ontbreken volkomen. De bereikte effecten bij de hiervoor genoemde demonstratie zijn de volgende:

¹⁾ W. H. Offenhauser en J. J. Israël. Journ. Soc. Mot. Pict. Eng. 32, 139, 1939.

Het geluidsbeeld kan bewegen:

- A) Van de eene zijde van de ruimte naar de andere (zelfs buiten de luidsprekers).
- B) Naar voor en naar achter.
- C) Naar boven en naar beneden.

Het geluidsbeeld van de eene zijde van de zaal naar de andere laten bewegen, kan eenvoudig geschieden door de intensiteitsverhouding van de luidsprekers te wijzigen. (Zie Hoofdstuk: Richtingshooren). Door de luidsprekers niet naar het publiek te richten, maar naar de zijwanden van de zaal, kan het effect worden bereikt, dat het geluidsbeeld zich buiten de luidsprekers bevindt. De toehoorders ontvangen dan vrijwel alleen gereflecteerd geluid van de zijwanden, zoodat dus schijnbaar de afstand van de luidsprekers is vergroot tot een afmeting, grooter dan de breedte van de zaal.

In dit verband is een opmerking van OFFENHAUSER belangrijk, n.l. dat de luidsprekers de hoge tonen goed moeten kunnen weergeven. Als de weergave werkelijk zou geschieden, als hierboven is aangegeven moet dat als regel gepaard gaan met een verlies in het hoge-tonen-register.

De beweging van voor naar achter kan eenvoudig worden verkregen door toepassing van het „Ultraphon-effect”. Door de spanning van een tweede gramfoonopnemer die zich in dezelfde groef op eenige afstand van de normale opnemer bevindt, meer of minder aan de luidsprekers toe te voeren, kan een kunstmatige variatie van de nagalm worden bereikt, die verandering van afstandsgevoel teweegbrengt.

Hoe zij het geluidsbeeld in een verticale richting laten bewegen, is niet zonder meer te verklaren, als men aanneemt, dat de luidsprekers vast zijn opgesteld en niet ter bereiking van dit effect gedraaid kunnen worden.

Een echt ruimtelijke weergave kan met dit systeem niet worden bereikt. Het is alleen werkzaam, als er maar één geluidsbron is. Met enkele geluidsbronnen tegelijk gaat de ruimtelijke weergave verloren. Immers, heeft men bijv. twee sprekers naast elkaar dan correspondeert met ieder van die sprekers een andere intensiteitsverhouding aan de luidsprekers.

Kunstmatig kunnen we de luidsprekers maar één intensiteitsverhouding geven, zoodat de twee sprekers altijd op dezelfde plaats zullen worden afgebeeld. De weergave komt dus overeen met die, welke onder de titel „schijnstereofonie” reeds is besproken.

Resumeerende kunnen we zeggen, dat voor de invoering van sterefonisch opgenomen geluidsfilm geen bepaalde technische problemen meer behoeven te worden opgelost. Met een verandering aan het optische aftaststelsel en door bijvoegen van een extra serie versterkers en luidsprekers is iedere bestaande bioscoopinstallatie voor ruimtelijke weergave geschikt te maken.

Wat de opnametechniek betreft, is het registreeren van een dubbel spoor geen enkel bezwaar, daar dit ook nu bij „push-pull recording” reeds plaats vindt. De moeilijkheid zit meer in de financiële zijde der zaak. Geen firma zal stereofonisch opgenomen films vervaardigen, als daar geen afzetgebied voor is, en aan de andere kant zal geen bioscoopdirecteur zijn theater voor stereofonische weergave in laten richten, als niet een groot aantal films daarvoor ter beschikking staat.

Omroep.

Bij de omroep is tot nu toe stereofonische geluidswaergave nog niet toegepast. De moeilijkheid treedt ook hier op, dat de luisteraars, die voor de stereofonische ontvangst niet zijn ingericht — wat vooral in het begin voor de groote massa het geval zal zijn — toch een radioontvangst van goede kwaliteit zullen blijven eischen. Nemen we nu het eenvoudigste geval van een twee-kanalenuitzending, waarbij de spanning van ieder der microfoons aan een aparte zender wordt toegevoerd, en dat via twee radioapparaten wordt afgeluisterd, dan komen we tot de volgende beschouwing.

Essentieel bij de stereofonische weergave is, dat de intensiteit en weergavekwaliteit van beide kanalen belangrijke schommelingen ondergaan ten opzichte van elkaar. De luisteraar, die niet op stereofonie is ingericht, zal dus gemiddeld een geluidskwaliteit ontvangen, die minder is dan die, welke hij tot nu toe gewend is.

In het algemeen zullen echter geen twee op verschillende golflengten werkende zendinstallaties voor één uitzending ter beschikking staan.

Misschien zal het mogelijk blijken, de twee zijbanden aan weerskanten van één draaggolf als gescheiden kanalen te gebruiken. Een moeilijkheid zal echter altijd het optreden van fading blijven, daar de daarmee gepaard gaande variaties van de phase en de kwaliteit het stereofonisch effect kunnen bederven.

Veel gunstiger staan wat dat betreft radiocentrales er voor, die direct van de studio via een telefoonlijn hun programma's kunnen uitzenden. Hier kan, bij eenvoudige verdubbeling der gebruikte apparatuur, een goede stereofonische geluidswaergave worden gewaarborgd.

Geluidsversterking voor spraak (Public Address) en muziek (Bandrepeaters).

Een verdere mogelijke toepassing, die we hier willen noemen, is het plastisch hoorbaar maken van een orkest in verschillende zalen tegelijk bijv. in een restaurant. Daar het hier meestal om een aantal musici gaat, niet grooter dan 10, zullen we hier met microfoons, aangebracht in een klein kunsthoofd, uitstekende resultaten bereiken. In fig. 39 is de opstelling van het orkest en de microfoons schematisch aangegeven.

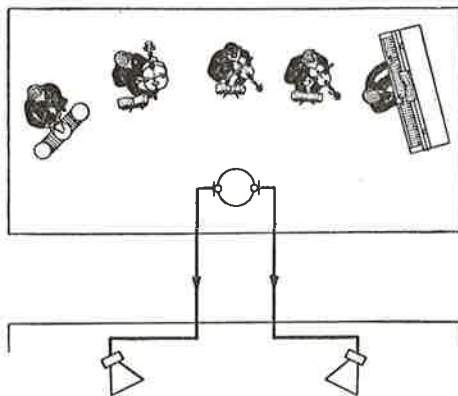


Fig. 39.

Schema voor stereofonische geluidsoverdracht, toe te passen bij bandrepeaters.

Bij Public Address zal in het algemeen geen stereofonische waergave noodig zijn. Mocht dit toch het geval zijn, bijv. om een debat

of een optreden van verschillende personen goed weer te geven, dan is ook hier de microfoonopstelling in een klein kunsthoofd aangewezen, daar, wil men bij „Public Address” een behoorlijke versterking van het geluid verkrijgen en daarbij acoustische koppeling van microfoons en luidsprekers vermijden, een van dichtbij bespreken van de microfoons noodzakelijk is, wat bij gebruik van een klein kunsthoofd te verwezenlijken is.

Een installatie voor een slechthoorende, waarbij het ruimtelijk hooren blijft behouden.

Dat men tegen een slechthoorende harder praat, dat hij zijn oor dichtter bij de geluidsbron brengt of met zijn hand achter de oorschelp een grootere hoeveelheid van de geluidsenergie tracht op te vangen, zijn zeer voor de hand liggende middelen om de verminderde oorgevoeligheid van een slechthoorende te compenseren. Zij kunnen echter niet baten, wanneer de drempel der oorgevoeligheid van den slechthoorende al te hoog ligt, en hebben bovendien gewoonlijk het ongewenschte gevolg, dat de conversatie van de zijde van den normaalhoorenden gesprekspartner een onnatuurlijk karakter gaat aannemen. Na de uitvinding van de telefoon bood de techniek een in deze opzichten meer bevredigende methode tot vergroting van de intensiteit: een combinatie van een hoofdtelefoon en een koolmicrofoon, gevoed uit een in de zak te dragen droge batterij. Toch heeft ook dit hulpmiddel veelal teleurgesteld.

De verhooging van het intensiteitsniveau wordt hierbij n.l. verkregen ten koste van de kwaliteit van het gehoorde; teneinde de telefoon voldoende gevoelig te maken voor de zeer zwakke microfoonstroom, moet gebruik gemaakt worden van resonanties van het trillende systeem, hetgeen beteekent, dat sommige frequenties bevoorrecht worden en dat een belangrijke vervorming van de door de microfoon opgenomen klanken ontstaat.

In fig. 40 is als voorbeeld de frequentiekaracteristiek van een dergelijke telefoon weergegeven, die in de genoemde combinatie kan worden gebruikt.

Ook de koolmicrofoon zelf heeft een onregelmatige frequentiekaracteristiek, die de vervorming nog verergert. Tengevolge van

de vervorming gaat de verstaanbaarheid sterk achteruit, een feit dat strookt met de ervaring, dat het volgen van een telefoongesprek, vooral in een vreemde taal, meer inspanning kost dan een

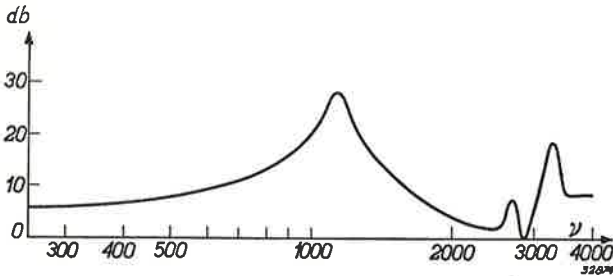


Fig. 40.

Frequentiekaracteristiek van een hoofdtelefoon, die voldoende gevoelig is om rechtstreeks op een koolmicrofoon met zakbatterijen te worden aangesloten. De hoge gevoeligheid is verkregen door resonantiepieken, dus ten koste van de kwaliteit der geluidswaergave. (De kromme is geteekend volgens een karakteristiek, gemeten door W. West en D. McMillan: J. Inst. electr. Eng. 75, 328, 1934. fig. 8).

direct onderhoud. Bij deze geestelijke vermoeienis voor den slechthoorende komt nog, dat het oor door de intensiteitspieken bij de resonantiefrequenties van het systeem overbelast dreigt te worden, hetgeen vooral bij zwakke ooren wel zeer pijnlijk en ongewenscht kan zijn.

Toepassing van een versterker.

Deze moeilijkheden kunnen worden vermeden, wanneer men gebruik maakt van de zeer goede microfoons en telefoons, die tegenwoordig ter beschikking staan. De veel geringere gevoeligheid van deze, juist een gevolg van het gewenschte vlakke verloop der frequentiekaracteristiek, maakt echter het gebruik van een *versterker* noodzakelijk. Hiertoe zal men des te gereeder overgaan, daar het gebruik van versterkers nog andere verbeteringen in een gehoorapparaat mogelijk maakt.

Deze verbeteringen willen we in hetgeen volgt bespreken aan de hand van een installatie, die in het Philips-laboratorium op voorstel van Dr. KÖSTER, oorarts te 's-Gravenhage, voor één zijner patienten werd vervaardigd. Hierbij was afstand gedaan van de

wensch om een draagbaar toestel te verkrijgen, waardoor het mogelijk was, van normale versterkers uit te gaan.

Bij den slechthoorende is de oorgevoeligheid in vergelijking met een normaal oor verminderd. De vermindering is echter in het algemeen niet voor alle frequenties dezelfde. Het kan voorkomen, dat het gehoor bijv. alleen voor lage frequenties verzwakt is, of alleen voor hooge. In plaats van het normale frequentieverloop van de gehoordrempel, weergegeven in fig. 41, vindt men dan een andere kromme. Door den oorarts werd het verschil tusschen de drempelwaarden van den persoon in kwestie en van een normaalhoorende gemeten.

Dit verschil is boven de normale drempel in fig. 41 uitgezet, waardoor de gestippeld geteekende drempelkromme gevonden wordt.

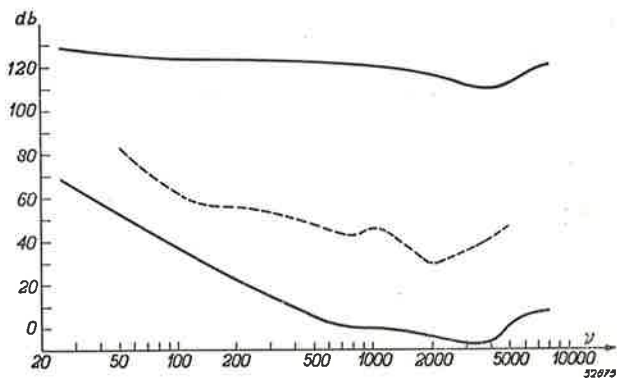


Fig. 41.

Het gehoorgebied van den normalen mensch (getrokken lijnen). De onderste lijn geeft, als functie van de frequentie ν in per/sec, de minimale intensiteit in db, die nog juist kan worden waargenomen (drempelwaarde: de drempel voor de frequentie 1000 per/sec is gelijk nul db gesteld). De bovenste lijn geeft de pijngrens. Bij een slechthoorende is de oorgevoeligheid voor sommige of voor alle frequenties verminderd, d.w.z. de drempel ligt hoger. In het bovengenoemd geval werd de gestippeld weergegeven drempelkromme gevonden.

Wil men nu de gehoorindruk van den slechthoorende zooveel mogelijk aanpassen bij die van den normalen mensch, dan ligt het voor de hand, de versterking voor de verschillende frequenties te doen beantwoorden aan de gemeten vermindering der gevoelig-

heid. Dit is betrekkelijk eenvoudig te verwezenlijken, daar men door geschikte schakelingen de frequentiekarakteristiek van de te gebruiken versterker elk gewenscht verloop kan geven. In fig. 42 is de frequentiekarakteristiek van de versterker voor deze persoon weergegeven.

Het dient hier te worden vermeld, dat de slechthoorenden zelf een dergelijke aanpassing van de versterker bij hun individueele gehoorafwijking niet steeds als een vooruitgang aanvoelen. Soms wordt zij zelfs als bepaald onaangenaam bestempeld. Vermoedelijk is dit te wijten aan het feit, dat de slechthoorende, wanneer hij jarenlang zonder correctie heeft moeten hooren, aan een bepaalde vervorming van het geluid gewend is geraakt en derhalve het voor normale ooren natuurlijke timbre van een geluid juist „onnatuurlijk” vindt. De beslissing, of in een dergelijk geval een aanpassing toch gewenscht is, om den slechthoorende weer aan een normaal geluid te doen wennen, moet natuurlijk aan den behandelenden geneesheer overgelaten worden.

Overigens bestaan ook gevallen van doofheid, waarbij de gehoorvermindering bij normale intensiteiten verschilt van die bij intensiteiten in de buurt van de drempelwaarde. Hier geldt in nog hogere mate, dat het advies van den oorarts ingewonnen moet worden, alvorens tot het gebruik van een versterker kan worden overgegaan.

Wegens de geringe speling, die bij een slechthoorende tusschen de drempel der oorgevoeligheid en de pijngrens aanwezig is, is het zeer belangrijk, dat de aan de telefoon toegevoerde versterkerstroomen een bepaalde grens niet overschrijden. Te dien einde kan een automatische volumeregeling aangebracht worden, waardoor de aan het oor van den slechthoorende toegevoerde geluidsterkte tot bijv. 20 of 30 db boven de drempel wordt begrensd.

Behoud van het richtingshooren.

Bij de bedoelde installatie is er speciaal voor gezorgd, dat de slechthoorende niet beroofd wordt van de mogelijkheid van het *richtingshooren*. Van de practische beteekenis dezer mogelijkheid, die berust op het gelijktijdig waarnemen met beide ooren, zijn velen zich zeker niet bewust. Men kan zich echter gemakkelijk van

het belang van het richtingshooren overtuigen, indien men het tijdelijk uitschakelt door één zijner ooren goed af te sluiten. In een kamer zittende, waar verschillende gesprekken gelijktijdig gevoerd worden, blijkt het nu vrijwel ondoenlijk, één der gesprekken te volgen, terwijl dit onder normale omstandigheden slechts geringe inspanning vergt: door het richtingshooren kan men zijn aandacht in een bepaalde richting concentreren en kunnen de prikkels uit andere richtingen psychisch op de achtergrond worden gedrongen. Ditzelfde verschijnsel speelt een groote rol, wanneer storende geluiden aanwezig zijn.

Bij het „binaurale” hooren wordt hiervan alléén waargenomen, hetgeen uit de richting komt, waarop de aandacht is geconcentreerd. Bij het „monaurale” hooren daarentegen werken storende geluiden uit alle richtingen tezamen. Dit is de reden, waarom gebruikers van apparaten voor slechthoorenden veelal klagen over het „lawaaï”: bij een combinatie van een bijv. op de borst gedragen microfoon en twee hierop aangesloten telefoons wordt immers het geluid door slechts één „oor” (de microfoonopening) ontvangen.

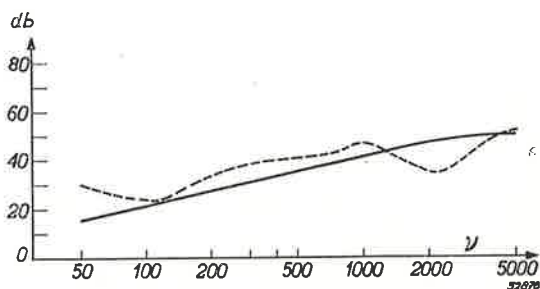


Fig. 42.

Vermindering der oorgevoeligheid (gestippeld) van den slechthoorende, voor wien het beschreven toestel werd ontworpen. (De kromme geldt voor het rechter oor. Zij beantwoordt aan de gestippelde drempelkromme in fig. 41; hier is het gemeten verschil van de getrokken en de gestippelde drempelkromme uitgezet). De getrokken kromme is de frequentiekaracteristiek van de gebruikte versterker. Zoals men ziet, wordt de gehoorvermindering behoorlijk gecompenseerd.

Verder is dit ook, zoals reeds eerder is vermeld, één van de redenen, waarom er in omroepstudio's op de grootst mogelijke stilte moet worden gelet en de nagalm hier kleiner moet zijn dan

normaal; want de luisteraar ontvangt de geluiden, die uit alle richtingen van de studio de microfoon treffen, uit slechts één richting, n.l. uit de opening van de luidspreker.

Nu ligt het voor de hand, op welke wijze men bij het luisteren met microfoons het richtingshooren kan behouden. Men moet twee microfoons gebruiken, waarvan ieder over een afzonderlijke (aan het desbetreffende oor aangepaste) versterker één telefoon voedt. Daar de gehoorvermindering in het bedoelde geval voor het linker oor vrijwel hetzelfde verloop had als voor het rechter oor, is voor beide versterkers dezelfde, n.l. de in de fig. 42 weergegeven frequentiekarakteristiek gekozen.

Om te zorgen, dat de het richtingsgevoel veroorzakende intensiteits- en tijdsverschillen tusschen de door beide microfoons opgevangen geluiden beantwoorden aan die bij het normale hooren met beide ooren, moeten de microfoons aangebracht worden op een „kunsthoofd”, dat een soortgelijke vervorming van het geluidsveld veroorzaakt als het menselijk hoofd. Als kunsthoofd is het voldoende, een bol te nemen, die ongeveer dezelfde afmetingen heeft als het hoofd. De microfoons zijn in de bol aan de uiteinden van een horizontale diameter aangebracht.

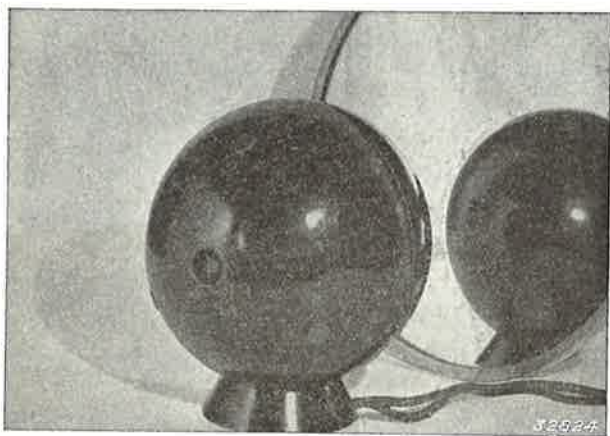


Fig. 43.

De als kunsthoofd gebruikte bol. De bol heeft een diameter van ongeveer 20 cm. Aan de uiteinden van een horizontale diameter zijn de beide microfoons aangebracht. (Bij de opname is de bol voor een spiegel geplaatst om beide microfoons tegelijk te kunnen laten zien).

Plaatst men een dergelijk kunsthoofd dicht bij den slechthoorende, dan zullen de visuele richtingsbepaling en die van het kunsthoofd met elkaar in overeenstemming zijn.

Bij groepsinstallaties in theaters, vergaderzalen e.d. plaatst men de microfoons altijd zoo dicht mogelijk bij tooneel of podium. Zou men dit nu ook met het kunsthoofd doen, dan zou men de geluidsbron onder een veel grootere hoek hooren dan zien. Dit is te voorkomen door de diameter van het kunsthoofd kleiner dan 20 cm te maken. De optredende intensiteits- en tijdsverschillen en dus ook de waargenomen richting zullen dan kleiner zijn dan bij het normale kunsthoofd.

Interessant is nog het volgende. Zooals WALLACH ¹⁾ heeft aangetoond, kan men het voor of achter zijn van een geluidsbron onderscheiden door kleine bewegingen met het hoofd te maken. Ook indien het hoofd volkomen stil wordt gehouden is een dergelijke bepaling, alhoewel moeilijk, nog te doen, doordat men tengevolge van de onregelmatige vorm van het hoofd een verschil in timbre waarneemt bij een geluidsbron, die onder een bepaalde hoek voor of achter is.

Deze experimenten zijn met de installatie voor een slechthoorende eenvoudig uit te voeren. Wanneer het kunsthoofd zich in een andere kamer bevindt dan de persoon, die de telefoons gebruikt, localiseert deze een spreker wel in de juiste richting, d.w.z. onder die hoek, waarin de spreker staat t.o.v. het kunsthoofd, echter steeds in de richting naar achteren of naar boven en nooit naar voren. Daar het kunsthoofd een bol is, zoodat tusschen voor of achter geen verschil bestaat, zou men verwachten, dat beide richtingen waargenomen moesten kunnen worden.

Ook als men luisterproeven doet met een stel microfoons, waarbij het hoofd niet door een bol, maar door een meer gedetailleerd uitgewerkt kunsthoofd wordt benaderd, neemt men hetzelfde waar.

Nu ligt het timbreverschil van een geluidsbron, die zich onder een bepaalde hoek voor of achter het hoofd bevindt, in hoofdzaak in het frequentiegebied boven 3000 per/sec, met dien verstande, dat dit gebied verzwakt is, als de geluidsbron zich achter het hoofd bevindt.

¹⁾ H. Wallach. Journ. Acoust. Soc. Amer. 10, 270, 1939.



Fig. 44.

De pop, waarmede de invloed van de details van de vorm van het hoofd werd nagegaan. In haar ooren zijn de microfoons gemonteerd, welke de twee hoofdtelefoons van den slechthoorende voeden.

Ditzelfde frequentiegebied wordt door vrijwel alle koptelefoons al niet meer weergegeven, zoodat de waarnemer, indien de geluidsbron om het kunsthoofd heendraait, onafhankelijk of dit een bol of een meer gedetailleerd voorwerp is, geen timbre-variatie waarneemt en het zeer verzwakt aanwezig zijn van het frequentiegebied

boven 3000 per/sec interpreteert als behorende bij een geluidsbron die zich achter het hoofd bevindt. Bovendien zou hier de gewaarwording nog kunnen worden beïnvloed door de overtuiging, dat een geluidsbron, die zich voor ons zou moeten bevinden, ook zichtbaar zou moeten zijn.

Zoals hiervoor reeds is gezegd, kan men onder bepaalde omstandigheden, de geluidsbron recht boven of midden achter het hoofd waarnemen. Dit is het geval, als de geluidsbron zich in het middelloodvlak van de ooras van het kunsthoofd bevindt. Men neemt dan de geluidsbron in een richting waar, die een hoek van 90° met de ooras maakt; men krijgt een middengewaarwording. Maakt men nu met het hoofd kleine bewegingen om een verticale as, dan blijft de middengewaarwording behouden, daar de onderlinge stand van geluidsbron en kunsthoofd niet is gewijzigd. Men hoort dan het geluid recht van boven komen, daar dit de eenige richting is, welke bij draaien van het hoofd om een verticale as een middengewaarwording blijft geven. Laat men het hoofd schommelen om een horizontale as, loodrecht op de verbindinglijn der ooren, dan neemt men de geluidsbron waar midden achter zich in het horizontale vlak door de ooras, daar dit de richting is, die bij een dergelijk bewegen van het hoofd een middengewaarwording blijft geven.

In het algemeen kan men dus zeggen, dat het niet veranderen van de schijnbare richting van de geluidsbron bij bewegen van het hoofd, een gevolg van de vaste stand van het kunsthoofd, een onzekerheid in de richtingsbepaling veroorzaakt.

Om op eenvoudige wijze de uitwerking van kleine hoofd Bewegingen na te gaan, kan men het volgende doen. Men laat het kunsthoofd schommelingen maken om een verticale as en de waarnemer met de telefoons, die zich in een andere kamer bevindt, maakt precies dezelfde bewegingen mee. Na eenige oefening zal men hier in slagen. Men aarzelt dan geen moment of de geluidsbron voor of achter het kunsthoofd is en het geluidsbeeld neemt in scherpte toe. Nog eenvoudiger wordt het experiment, als men het kunsthoofd op het hoofd van den waarnemer plaatst. Men moet dan zorgen, dat de telefoons goed aan de ooren aansluiten, zoodat geen direct geluid de ooren treffen kan. De contrôle hierop is, dat men de microfoons en telefoons zoodanig aansluit, dat de

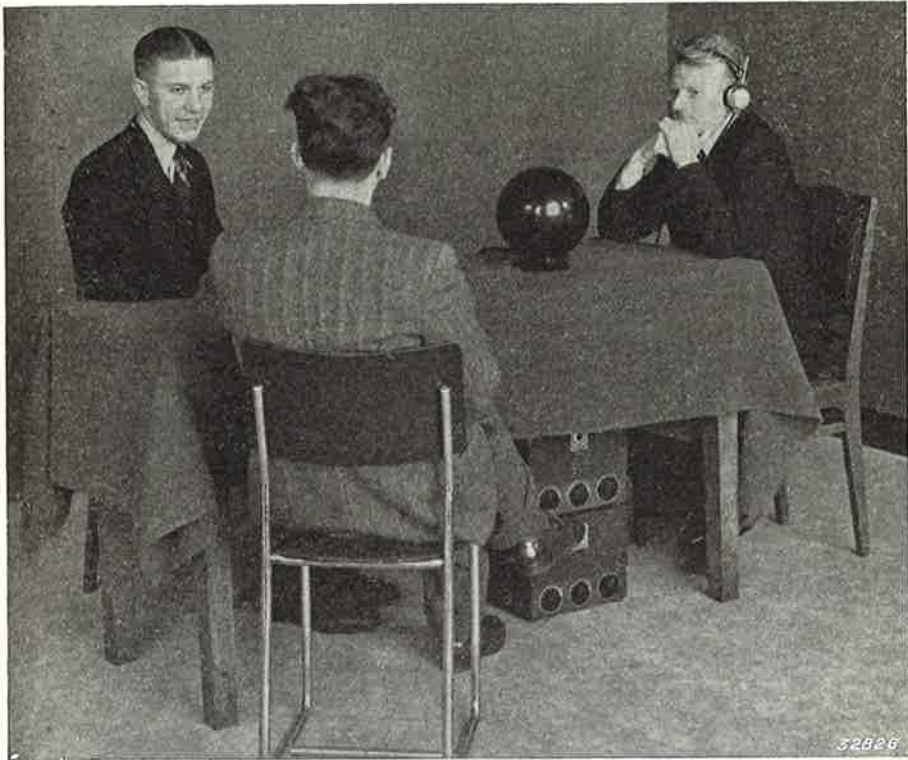


Fig. 45.

Overzicht van de installatie in gebruik. Op de tafel staat het kunsthoofd.

Onder de tafel zijn beide versterkers opgesteld.

rechter microfoon verbonden is met de linker telefoon en omgekeerd. Inderdaad neemt men dan alle richtingen over 180° verschoven waar.

Bij een apparaat voor slechthoorenden zou het dus het beste zijn, de microfoons op de telefoons te bevestigen, daar zij dan alle bewegingen van het hoofd mede kunnen maken en er dus steeds overeenstemming is tusschen de visueel en accoustisch waargenomen richtingen.

De moeilijkheid is echter, de telefoons zoo goed aan de ooren te laten aansluiten, dat bij de groote geluidsintensiteiten, die de meeste slechthoorenden noodig hebben, geen zoodanige terugwerking van het geluid van de telefoons op de microfoons optreedt, dat genereeren het gevolg daarvan is.

Proeven met stereofoonplaten.

Voor het experimenteren met opstellingen voor stereofonische weergave, alsook algemeen voor het practisch gebruik hiervan, is het gewenscht om te beschikken over geregistreerde stereofonische muziek en spraak. Met het oog hierop zijn proeven gedaan over het vastleggen van stereofonisch geluid op gramfoonplaten. Bij dergelijke stereofoonplaten moeten de twee geluidsbijdragen, die de microfoons opvangen, elk in een afzonderlijk geluidsspoor op de plaat worden geregistreerd.

Men kan dit op verschillende manieren doen. Een methode zou bijv. zijn om de twee geluidssporen op beide zijden van een plaat aan te brengen en bij de weergave beide zijden tegelijk door twee geluidsonnemers af te tasten. De plaat zou hiervoor voldoende stijf moeten zijn, maar bovenal zou deze methode medebrengen,

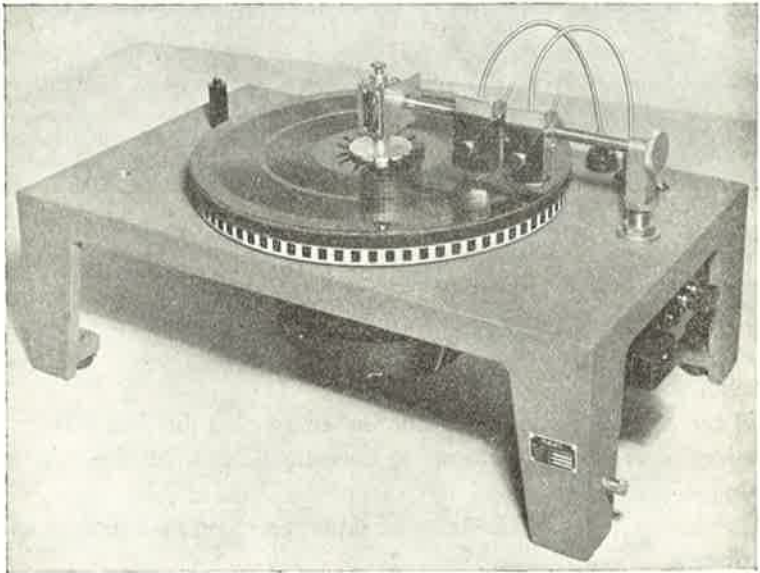


Fig. 46.

Toestel voor geluidsregistratie op platen, ingericht voor stereofonische opnamen. Op de transportas zijn twee geluidschrijvers gezet, die ieder uit één der beide microfoons worden gevoed en respectievelijk een geluidsspoor in de binnenste en buitenste zône van de plaat snijden.

dat geheel nieuwe gramfoonconstructies moeten worden ontwikkeld.

Een eenvoudiger procédé is het verdeelen van het plaatoppervlak in twee zônes, waarvan de binnenste het ééne, de buitenste het andere geluidsspoor bevat. Dergelijke platen kunnen met een eenvoudig toestel voor geluidsregistratie¹⁾ gemakkelijk worden verkregen door op de transportas twee geluidsschrijvers naast elkaar aan te brengen, die ieder uit één der microfoons worden gevoed. In fig. 46 is deze opstelling weergegeven.

Reeds eerder is uiteengezet, dat de richtingsgewaarwording haar grondslag vindt in kleine verschillen in de intensiteit en in de aankomsttijd der twee geluidsbijdragen, die onze beide ooren

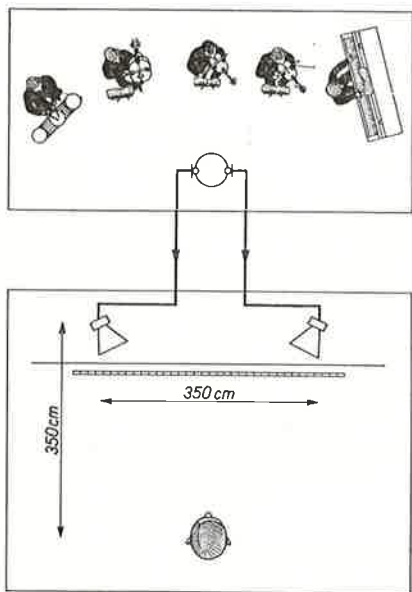


Fig. 47.

Schema van een stereofonische geluidsoverdracht. In de opnameruimte (boven) twee microfoons aan weerskanten van een bol („kunsthoofd”); twee kanalen naar de weergaveruimte (onder); hierin twee luidsprekers links en rechts vóór de toehoorder. Bij onze proeven waren meestal de aangegeven afstanden gekozen. Op de meetlat voor de luidsprekers kan het geluidsbeeld op enkele cm nauwkeurig worden gelocaliseerd.

¹⁾ K. de Boer en A. Th. van Urk. Philips Techn. Tijdschr. 4, 111, 1939.

treffen. Deze intensiteits- en tijdsverschillen moeten in de twee geluidssporen op de stereofoonplaat getrouw vastgelegd zijn en bij het afspelen evenzoo worden gereproduceerd. Nu treden bij het afspelen door verschillende oorzaken nog extra tijdsverschillen op tusschen de beide geluidsbijdragen, waardoor de door den luisteraar waargenomen plaats van de geluidsbron (het „geluidsbeeld”) een verschuiving ondergaat,

Het is wellicht niet oninteressant, de eigenaardige moeilijkheden, die hiermede verband houden, wat meer in detail te bespreken, vooral ook, omdat zij een goede illustratie vormen voor de bijzonderheden eener stereofonische weergave.

In fig. 47 zijn nog eens schematisch opname- en weergaveinstallatie aangegeven. De microfoons zijn diametraal in een klein kunsthoofd aangebracht, waarvan de diameter 8 cm bedraagt. De afstand der luidsprekers bedraagt 350 cm, terwijl de waarnemer zich midden voor de luidsprekers bevindt. De afstand van den waarnemer tot het midden van de verbindingslijn der luidsprekers bedraagt eveneens 350 cm.

Beweging van de aftastende naald.

Bij het registreeren wordt de geluidsschrijver door de transportas over de plaat voortbewogen langs een **rechte** lijn, die samenvalt met een straal van de plaat *). Bij de weergave daarentegen is de geluidsonnemer aan het uiteinde van een draaibare arm bevestigd en beschrijft dus op de plaat een **cirkelboog**. Dit is onvermijdelijk, wanneer men een voldoende levensduur van de plaat waarborgen wil. Immers, bij de weergave moeten de spiraalvormige groeven van het geluidsspoor zelf voor het radiaal verschuiven van de naaldpunt zorgen, en ter beperking van het slijten der groeven is het gewenscht, dat zij hiervoor slechts een uiterst geringe kracht op de naald behoeven uit te oefenen. Een rechtgeleiding van de naald, zij het door middel van een rail of door één der (uit de cinemata bekende) hiervoor dienende gewrichtsconstructies, zou echter — wanneer men de speling in

*) In werkelijkheid laat men om practische redenen de naaldpunt op een lijn bewegen, die eenige mm aan de plaatas voorbij loopt. De invloed hiervan op de resultaten der volgende beschouwingen is echter te verwaarlozen.

de stand van de geluidsonnemer in de vereischte mate wil beperken — steeds vrij groote wrijvingskrachten met zich medebrengen.

Doordat nu de naaldpunt bij de weergave een andere baan op de plaat beschrijft dan bij de opname, ontstaan er tijdsverschillen. De arm van de geluidsonnemer zij voor beide geluidssporen zoodanig opgesteld, dat aan het begin en aan het eind van het afspelen de naaldpunten juist op de rechte lijn van het opnemen komen te staan; zie fig. 48. Men ziet, dat tijdens het afspelen beide geluidsbijdragen een eerst geleidelijk toenemende, dan weer

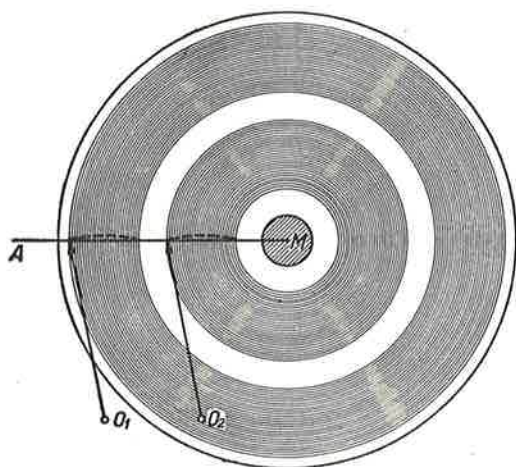


Fig. 48.

Stereofoonplaat, met geluidssporen in twee zônes. Bij het registreeren hebben de beide naaldpunten zich langs de rechte lijn AM bewogen, bij het weergeven beschrijven zij de beide cirkelbogen om de draaipunten O_1 en O_2 der opnemerarmen.

afnemende tijdsvertraging ondervinden. Dit zou nog geen verschuiving van het geluidsbeeld veroorzaken, wanneer de vertraging voor beide geluidsbijdragen steeds even groot was.

Dat is echter niet het geval: al is de afwijking van de naald op beide sporen dezelfde (fig. 49), tengevolge van de verschillende lineaire snelheid der plaat op verschillende afstanden van de as beantwoorden hieraan toch niet dezelfde tijdsverschillen.

Het ontstane onderlinge tijdsverschil der twee geluidsbijdragen kunnen we gemakkelijk berekenen.

We voeren het in fig. 49 aangegeven coördinatenstelsel x, y , in en noemen de middelste straal van de beide zônes L resp. l , de breedte der zônes $2d$, en de lengte der armen, waaraan de geluids-

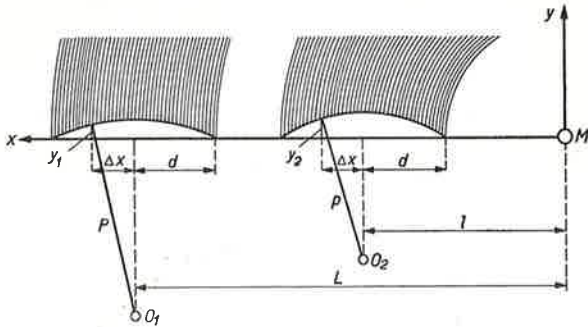


Fig. 49.

Meetkundige configuratie van de banen der naaldpunten bij opname en weergave, ter berekening van de optredende onderlinge tijdsverschillen der twee geluidsbijdragen.

opnemers zijn bevestigd, P resp. p . Tusschen de verschuiving Δx van de naald uit het midden der zône en haar afwijking y_1 resp. y_2 van de rechte opnamelijin bestaat dan het verband:

$$\begin{aligned} \Delta x^2 + (y_1 + \sqrt{P^2 - d^2})^2 &= P^2 \\ \Delta x^2 + (y_2 + \sqrt{p^2 - d^2})^2 &= p^2 \end{aligned}$$

Voor voldoende groote armlengten P en p kan men dit vereenvoudigen tot:

$$y_1 = \frac{d^2 - \Delta x^2}{2P}; \quad y_2 = \frac{d^2 - \Delta x^2}{2p} \dots \dots \dots (1)$$

Nu is de plaatsnelheid ter plaatse Δx :

$$\begin{aligned} \text{in de buitenste zône } v_1 &= 2\pi n (L + \Delta x), \\ \text{in de binnenste zône } v_2 &= 2\pi n (l + \Delta x), \quad \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

wanneer n het toerental der plaat per seconde beteekent. De vertraging van het geluid ter plaatse x is:

$$\Delta t_1 = \frac{y_1}{v_1} \text{ resp. } \Delta t_2 = \frac{y_2}{v_2} \dots \dots \dots (3)$$

dus het onderlinge tijdsverschil, na invullen van (1) en (2):

$$\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{d^2 - \Delta x^2}{4\pi n} \left\{ \frac{1}{P(L + \Delta x)} - \frac{1}{p(l + \Delta x)} \right\}$$

Deze uitdrukking heeft een maximum in de buurt van $\Delta x = 0$ (ongeveer in het midden der zōnes). Hiervoor is:

$$\Delta t_0 = \frac{d^2}{4\pi n} \left\{ \frac{1}{PL} - \frac{1}{pl} \right\} \dots (4)$$

Bij onze proeven hebben we steeds met de volgende practisch geschikte afmetingen gewerkt: $L = 12.45$ cm, $l = 7.35$ cm, $d = 1.85$ cm; n is normaal 78/60 omw/sec. Nemen we in eerste instantie voor P en p de gebruikelijke lengte van 20 cm, dan is:

$$\Delta t_0 = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ sec.}$$

Nu hebben we reeds eerder gezien, dat de hoekverschuivingen van het geluidsbeeld, die door diverse gelijktijdig optredende intensiteits- en tijdsverschillen veroorzaakt worden, additief zijn, en dat speciaal tusschen de tijdsverschillen en de hierdoor ver-

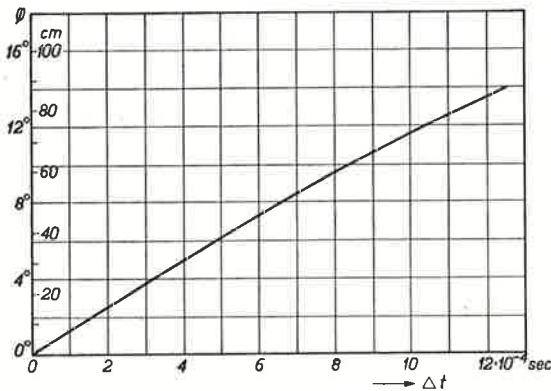


Fig. 50.

De hoekverdraaiing φ (resp. verschuiving) van het geluidsbeeld, die veroorzaakt wordt door een tijdsverschil Δt .

oorzaakte draaiingen het in fig. 50 weergegeven verband bestaat. Wanneer het oorspronkelijke geluidsbeeld, in de in fig. 47 geschetste opstelling, zich precies in het midden van de meetlat bevond, beantwoordt volgens fig. 50 aan het berekende tijdsverschil Δt_0 een verschuiving van 46 cm. Bevat de gramfoonplaat bijv. een muziekstuk, uitgevoerd door een strijkje, dan zou men dus het middelste instrument halverwege de uitvoering bijna een halve meter van zijn beginplaats verschoven hooren. Dit is

natuurlijk zeer ongewenscht. Er is echter gebleken, dat een verschuiving van niet meer dan 20 cm wel toelaatbaar mag worden geacht, hetgeen een tijdsverschil van $2,4 \cdot 10^{-4}$ sec. beteekent.

Men zou het tijdsverschil Δt_0 tot deze grootte kunnen beperken door de (onderling gelijke) armen P en p voldoende lang te maken.

Immers, uit verg. (4) volgt, dat Δt_0 omgekeerd evenredig met deze lengte is. In ons geval zou $P = p = 48$ cm lang gemaakt moeten worden, zoodat een nogal onhandig groote constructie ontstaat. Een betere methode is het, de armen P en p van ongelijke lengte te kiezen en wel zoodanig, dat

$$PL = pl \dots \dots \dots (5)$$

Dan wordt volgens verg. (4) $\Delta t_0 = 0$. Het onderlinge tijdsverschil der twee geluidsbijdragen verdwijnt dus niet alleen aan be-



Fig. 51.

Opstelling voor het weergeven van stereofonoplaten. De arm van de buitenste geluidsopnemer is in een bepaalde verhouding (verg. 5) korter gekozen dan die van de binnenste.

gin en einde van het geluidsspoor, maar ook in het midden ervan. Het tijdsverschil, dat nog tusschentijds kan optreden, wordt zooals een nadere berekening leert, hoogstens $0,4 \cdot 10^{-4}$ sec. De hieraan beantwoordende maximale verschuiving van het geluidsbeeld bedraagt 4 cm, is dus geheel onschadelijk.

Voor de bovengenoemde afmetingen wordt (5):

$$P = 0.59 p.$$

Maakt men de arm P voor de buitenste zône 20 cm lang, dan moet die van de binnenste 34 cm lang worden. In fig. 51 is een foto van een dergelijke opstelling te zien.

De plaatsing der naaldpunten.

Een andere mogelijke oorzaak van extra tijdsverschillen tusschen de twee geluidsbijdragen zijn kleine fouten, die gemaakt worden bij het opzetten der beide naaldpunten, die op onderling overeenkomende plaatsen van de twee geluidssporen moeten worden gezet.

Om dit te kunnen doen, wordt aan begin en eind van de opname met elke schrijver een kleine radiale kras naast het geluidsspoor aangebracht.

Bij de weergave moet men door regelen van de lengte der opnemerarmen er voor zorgen, dat de naalden in deze krasjes komen te staan.

Stel nu, dat hierbij een afwijking $\pm \varepsilon$ optreedt (fig. 52). Deze zal dan tijdens het afspelen van de geheele plaat onveranderd aanwezig blijven.

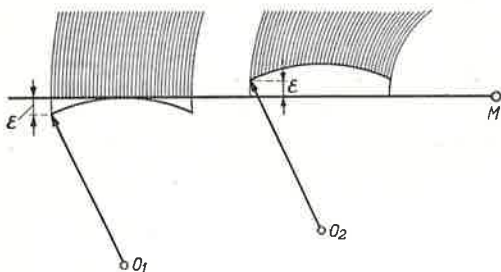


Fig. 52.

Bij het plaatsing der naaldpunten op onderling overeenkomende punten der twee geluidssporen kan een kleine fout ε binnensluipen.

Het tijdsverschil tusschen de twee geluidsbijdragen is volgens verg. (3), wanneer we het ongunstigste geval veronderstellen, dat $y_1 = \varepsilon$ en $y_2 = -\varepsilon$:

$$\Delta t = \varepsilon \left\{ \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right\}$$

Dus, na invullen van verg. (2):

$$\Delta t = \frac{\varepsilon}{2\pi n} \left(\frac{1}{L + \Delta x} + \frac{1}{l + \Delta x} \right).$$

Men ziet gemakkelijk in, dat deze uitdrukking tijdens het afspeelen van de plaat (waarbij Δx van $+d$ over nul tot $-d$ varieert) geen maximum doorloopt, maar gestadig toeneemt van een beginwaarde Δt_a tot een eindwaarde Δt_e .

We kunnen het tijdsverschil samengesteld denken uit een constant deel Δt_a en een van nul tot $\Delta t_{\max} = \Delta t_e - \Delta t_a$ toenemend deel.

Nu kan de hoekverschuiving van het geluidsbeeld door het constante deel Δt_a (het tijdsverschil aan het begin van de plaat) buiten beschouwing worden gelaten. Deze kan n.l., dank zij de reeds genoemde addiviteit, eenvoudig gecompenseerd worden door met behulp van de volumeregelaars der beide versterkers een zoodanig (constant) intensiteitsverschil tusschen de twee geluidsbijdragen aan te brengen, dat juist een tegengesteld gelijke verschuiving van het geluidsbeeld wordt bewerkstelligd. Rest dus het gestadig van nul toenemende gedeelte van het tijdsverschil, dat een tijdens het afspeelen geleidelijk grooter wordende verschuiving van het geluidsbeeld medebrengt. Aan het einde van de plaat is dit tijdsverschil geworden:

$$\Delta t_{\max} = \frac{\varepsilon}{2\pi n} \left[\left(\frac{1}{L-d} + \frac{1}{l-d} \right) - \left(\frac{1}{L+d} + \frac{1}{l+d} \right) \right].$$

Invullen van de hierboven aangegeven getalwaarden voor n , L , l , d levert:

$$\Delta t_{\max} = 0.012 \cdot \varepsilon.$$

Eischen we nu weer, dat de uiteindelijke verschuiving van het geluidsbeeld hoogstens 20 cm mag bedragen, d.w.z. $\Delta t_{\max} \leq 2.4 \cdot 10^{-4}$ sec., dan volgt hieruit voor ε de waarde 0.2 mm. Dit

is dus de maximale fout, die bij het opzetten van elke naaldpunt mag worden gemaakt.

Excentriciteit van de gramofoonas.

Wanneer het gat in het midden van de gramfoonplaat wat ruim is ten opzichte van de as van de draaitafel, kan de plaat bij het opleggen eenigszins excentrisch komen te staan. Bij de gewone weergave heeft dit geen ander gevolg dan een geringe, in het algemeen niet hinderlijke, zweving der tonen. In het geval van een stereofonische weergave echter treedt hierbij een nieuw effect op, n.l. een oscilleeren van het geluidsbeeld met de frequentie n (toerental der plaat). Dit is als volgt in te zien. In fig. 53 is de plaat, die excentrisch op de as is gezet, in twee extreme standen geteekend.

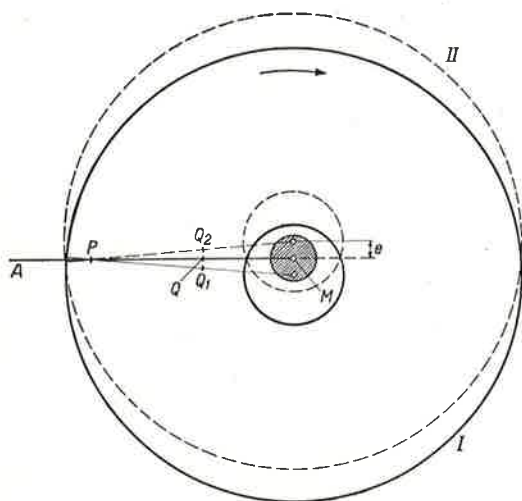


Fig. 53.

De as van de draaitafel ligt met een excentriciteit e in het gat van de gramfoonplaat. De naaldpunten veronderstellen we eenvoudigheidshalve bij opname en weergave langs de lijn AM te bewegen. Op een gegeven oogenblik staan zij bijv. in P en Q . Bij stand I der plaat zou de binnenste geluidsoptreffer feitelijk in Q_1 moeten staan, bij stand II der plaat in Q_2 . Het geluid der binnenste zône komt dus bij de weergave periodiek iets achter resp. vóór ten opzichte van dat der buitenste zône.

We kunnen in het midden laten, of het hierbij om het opnemen dan wel weergeven gaat, en willen slechts eenvoudigheidshalve veronderstellen, dat bij één der beide handelingen de plaat precies centrisch zal liggen, en dat de naaldpunten zoowel bij het opnemen als het weergeven precies langs de radiale lijn AM loopen. Stel nu, dat de plaat in stand I is en dat de buitenste geluidsopnemer zich in punt P bevindt. Het hiermede corresponderende punt in de binnenzône der plaat is Q_1 ; de hierbij behorende naaldpunt bevindt zich echter in Q, de geluidsbijdrage van de binnenzône is dus iets *achter*. Na een halve omwenteling is de plaat in stand II, en wanneer nu de buitenste geluidsopnemer in P staat, zou de binnenste zich in Q_2 moeten bevinden, terwijl hij toch in werkelijkheid in Q staat; nu is de geluidsbijdrage der binnenzône dus *vóór*. Het resultaat is een periodiek van teeken wisselend tijdsverschil tusschen de twee geluidsbijdragen, dus een oscilleeren van het geluidsbeeld om een middelste stand.

De ervaring leert, dat een dergelijk oscilleeren, mits de frequentie grooter dan 1 per/sec is, wordt geïnterpreteerd als een onscherpte van het geluidsbeeld. Dit heeft als het ware een breedte, ongeveer gelijk aan de dubbele amplitude van de heen en weer gaande beweging. Het effect is niet hinderlijk, wanneer deze amplitude niet grooter is dan ongeveer 5 cm, dus het maximale tijdsverschil $\Delta t < 0,6 \cdot 10^{-4}$ sec. Hieruit kan de toelaatbare excentriciteit van de as gemakkelijk berekend worden. Uit fig. 53 volgt, dat de amplitude der afwijking in een plaats tusschen de twee naaldpunten bedraagt:

$$\frac{1}{2} Q_1 Q_2 = \frac{L-1}{L+\Delta x} \cdot e.$$

waarbij e de excentriciteit (afstand der middelpunten van as en plaat) beteekent en de overige benamingen dezelfde zijn als hierboven. Het tijdsverschil is volgens verg. (3) en (2):

$$\Delta t = \frac{1}{2} \frac{Q_1 Q_2}{v_2} = \frac{(L-1) e}{2 \pi n (L+\Delta x) (1+\Delta x)}.$$

Δt bereikt zijn grootste waarde bij $\Delta x = -d$ (aan het eind der plaat).

Met de gebruikte getalwaarden vindt men:

$$\Delta t_{\max} = 0.0107 \cdot e.$$

dus de toelaatbare excentriciteit:

$$e = \frac{0,6 \cdot 10^{-4}}{0,0107} = 0.006 \text{ cm.}$$

Daar de excentriciteit hoogstens gelijk aan het halve verschil der diameters van de as en van het gat in de plaat kan zijn, wordt de onscherpte van het geluidsbeeld met zekerheid binnen de gewenschte grenzen gehouden, wanneer men de tolerantie voor de diameter van het gat op 0.1 mm stelt. Door een geschikte constructie van de as der draaitafel is het ook mogelijk, de excentriciteit en daarmee het oscilleeren van het geluidsbeeld geheel te onderdrukken.

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

ZUSAMMENFASSUNG.

Im täglichen Leben spielt die Richtungsempfindung beim Hören eine wichtige Rolle. Bei der normalen elektroakustischen Klangübertragung geht diese Empfindung verloren, was als fühlbarer Mangel anzusehen ist, da der wiedergegebene Klang infolgedessen stets etwas Unnatürliches behält.

Eine räumliche Klangwiedergabe ist in der folgenden einfacher Weise zu verwirklichen. Im Aufnahmerraum wird ein „Ersatzkopf“ aufgestellt, in welchem an Stellen der Ohren zwei Mikrophone angebracht sind. Jedes Mikrophon speist über einen eigenen Verstärker und eine eigene Übertragungsleitung (Kanal) eine der beiden Muscheln eines Kopfhörers, den der Zuhörer benutzt. Dieser hat dann dieselben Klangeindrücke, als wenn er selbst sich im Aufnahmerraum an der Stelle des Ersatzkopfes befände.

Für eine ganze Schar von Zuhörern kann man zwei Lautsprecher zu beiden Seiten des Saales aufstellen. Im Gegensatz zur obigen Anordnung erhält nun jedes Ohr nicht ausschliesslich den Schall von *einem* der beiden Mikrophone, sondern es empfängt über die beiden Lautsprecher Schallbeiträge von *beiden* Mikrophenen zugleich. Dennoch ist auf diesem Wege eine gute Raumwirkung erzielbar.

Eigene Versuche haben ergeben, dass die wahrgenommene Richtung des Schalles sowohl durch das Stärkenverhältnis wie durch den Zeitunterschied der von den beiden Lautsprechern herrührenden Schallbeiträge bestimmt wird.

Treten beide Ursachen zugleich auf (praktisch ist dies immer der Fall), so ist die entstehende Richtungsempfindung aus den Empfindungen, welche die beiden Effekte einzeln hervorrufen, abzuleiten. Die beiden Effekte summieren sich dabei in bestimmter Weise. Die Versuche haben weiterhin gezeigt, dass beim Abhören von Sprachklängen aus Richtungen, die nur kleine Winkel mit der Symmetrieebene des Kopfes bilden, das Richtungshören zu 90% den Stärkenunterschieden, zu 10% den Zeitunterschieden zuzuschreiben ist.

Die hier kurz erwähnten Ergebnisse gestatten die Berechnung der Abbildung, die mit einfachen Anordnungen zur räumlichen Klangübertragung erzielt wird, d.h. man kann für jeden Platz im Saal die Richtung, in welcher ein dort befindlicher Zuhörer die Stimme eines unter beliebigem Winkel zum Ersatzkopf aufgestellten Sprechers hört, rechnerisch ermitteln. Eine nähere Untersuchung der Abbildung führte zu dem Schluss, dass mit einem kleinen Ersatzkopf von 8 cm Durchmesser in sehr vielen Fällen ausgezeichnete Ergebnisse zu erzielen sind.

Eigenartige Schwierigkeiten können auftreten, wenn man räumlichen Schall aufzeichnen will. An Hand eines Beispiels (Tonaufzeichnung auf Schallplatten) wird gezeigt, wie man diese Schwierigkeiten überwinden kann.

Abgesehen von der Möglichkeit des Richtungshörens, welche die räumliche Klangwiedergabe von der üblichen einohrigen Wiedergabe unterscheidet, gibt erstere den wiedergegebenen Klängen eine weit grössere Natürlichkeit, die man auch ohne jede Raumwirkung bereits als Fortschritt in der Wiedergabegüte empfindet.

Auch Schwerhörigengeräte können durch die Benutzung einer räumlichen Klangwiedergabe erheblich verbessert werden.

Zum Schluss ist noch festzustellen, dass die allgemeine Einführung der räumlichen Klangwiedergabe nicht mehr von der Lösung technischer Probleme abhängt. Nur wirtschaftliche Faktoren spielen hierbei eine Rolle.

SUMMARY.

In the ordinary electrical methods of sound reproduction the perception of direction, which is an essential part of hearing, is lost. This loss is very important, since the reproduced sound always comes from the same direction and is therefore unnatural.

A stereophonic reproduction of sound can be realized in a simple manner as follows. In the studio an artificial head is used, in which two microphones replace the ears. Each microphone feeds its own telephone on one of the ears of the listener via a separate amplifier and transmission line (channel). In this manner the listener gets the same sound impression as if he were in the studio himself in the same place as the artificial head.

When many persons are listening at the same time it is advisable to place two loudspeakers some distance apart on one side of the hall. This method differs from the first, in which telephones were used, in this respect, that not every ear receives sound from one microphone but from both microphones at the same time, via the two loudspeakers. Nevertheless it is possible in this manner to get a good stereophonic effect.

Our own experiments showed, that in general the observed direction of the incoming sound is determined by the ratio of intensities as well as by the difference in time of the sounds coming from both loudspeakers.

When both factors occur at the same time (which is practically always the case), it is possible to derive the observed direction of the sound from the determinations of direction obtained from both the ratio of intensities and the difference of time separately. It is necessary to combine these two data in a special manner. Moreover it follows from our experiments, that *while listening to speech* from directions not much deviating from the median plane, the perception of direction is caused for 90 % by ratios of intensities and 10 % by time differences.

With the rules summarized above it is now possible to calculate a picture representing the results obtained with simple stereophonic

sound reproduction systems. This brings about the possibility to calculate the direction from which a listener seated anywhere in the hall will perceive the sound from a speaker standing anywhere with respect to the artificial head. From a more detailed investigation of the picture it appeared, that in a great many cases excellent results are obtained with a small artificial head of only 8 cm diameter.

Peculiar difficulties arise with the *recording* of stereophonic sound. In order to illustrate, how these problems can be solved, recording on gramophone discs is treated more fully.

Apart from the fact that the stereophonic reproduction of sound distinguishes itself from the usual monaural reproduction by the possibility of the perception of direction, it moreover gives to the sound a much greater naturalness which is experienced as an improvement of quality apart from any binaural effect.

Further, the appliances for persons with defect hearing can be improved considerably by using stereophonic sound reproduction.

In conclusion it may be said, that the universal introduction of stereophonic sound reproduction does not depend upon technical problems still to be solved, but only on economical factors.

STELLINGEN.

I.

Wanneer men nagalmtijden bepaalt volgens de methode van E. MEYER en V. JORDAN, zal in het algemeen een te groote uitkomst worden verkregen.

E. Meyer en V. Jordan *Electr. Nachr. Techn.* 12, 213, 1935.
R. Vermeulen *Philips Techn. Tijdschr.* 2, 269, 1937.

II.

Aan de door F. MASSA voorgestelde definitie betreffende het rendement van microfoons kan in het algemeen weinig waarde worden toegekend.

F. Massa *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 11, 222, 1939.

III.

De door C. ZWIKKER gepubliceerde dampspanningslijn van Hf geeft lagere waarden dan experimenteel worden gevonden.

C. Zwikker *Physica* 8, 241, 1928.
J. H. de Boer en J. D. Fast *ZS. f. anorg. Chem.* 187, 177, 1930.

IV.

De door DORGELO, ALTING en BOERS gegeven uitbreiding van de theorie van SCHOTTKY over de positieve zuil behoeft een aanvulling voor de door UYTERHOEVEN en VERBURG onderzochte gevallen, waarbij enkele promilles van een gas met kleine ionisatiespanning werden toegevoegd aan een gas met groote ionisatiespanning.

H. B. Dorgelo, H. Alting en C. J. Boers *Physica* 2, 959, 1935.
W. Uyterhoeven en C. Verburg *C.R. Acad. Sci. Paris* 202, 1498, 1936.
W. Uyterhoeven — *Elektrische Gasentladungslampen.*

V.

Veelal wordt nog aangenomen, dat de van de frequentieafhankelijke miswijzing van weekijzerinstrumenten gedeeltelijk door hysteresis-verliezen wordt veroorzaakt. Er moet hier echter onderscheid worden gemaakt tusschen Ampère- en Voltmeters.

Kohlrausch Lehrbuch der Praktischen Physik 648, 1930.
Grimsehls Lehrbuch der Physik, Band II, Teil I, 448, 1932.
Berliner und Scheel Physikalisches Handwörterbuch 1374, 1932.
Jaeger Elektrische Messtechnik 226, 1922.

VI.

De door VON GÖLER en G. SACHS gegeven interpretatie van de textuur van sterk uitgewalst koper en nikkelijzerband als een z.g. (112) + (111) mengtextuur is aanvechtbaar.

Frhrn. von Göler und G. Sachs ZS. f. Phys. 41, 889, 1927.
Frhrn. von Göler und G. Sachs ZS. f. Phys. 56, 485, 1929.

VII.

De verklaring, die W. BAUKLOH en W. KNAPP geven voor het optreden van de z.g. „ferritische Randschichten” bij het ontkolen van ijzer is weinig waarschijnlijk.

W. Baukloh en W. Knapp. Arch. Eisenhüttenw. 12, 405, 1939.

VIII.

Het is wenschelijk, de Nederlandsche Octrooiwet te wijzigen in die zin, dat een octrooi voor een werkwijze tevens uitsluitende rechten zal omvatten ten aanzien van het product dier werkwijze, ongeacht of dit product al dan niet een stof is in de zin van de vigeerende Octrooiwet.

IX.

De formule, die W. E. BENHAM afleidt voor de schijnbare impedantie tusschen de deflectieplaten van een kathodestraalbuis is voor lage frequenties zeker onjuist.

W. E. Benham Wireless Eng. 16, 598, 1939.

X.

De bepaling van de relatieve gevoeligheid van electro-acoustische apparaten kan snel en nauwkeurig geschieden door gebruik te maken van stereofonie.

XI.

Het is noodzakelijk het groefprofiel van gramfoonplaten te normaliseeren.

XII.

Ten onrechte beweert R. W. POHL dat ter bereiking van een niet reflectearend oppervlak, het noodzakelijk is, dit oppervlak te bedekken met een $\frac{1}{4} \lambda$ dikke laag van continu veranderlijke brekingsindex.

R. W. Pohl Optik 133, 1940.

