

HET RICHTINGSHOOREN IN DE RUIMTE

DOOR

J. L. VAN SOEST EN P. D. GROOT



Overgedrukt uit „Physica”, Nederlandsch Tijdschrift voor Natuurkunde,
:: 1931 11e Jaargang, No. 4, blz. 103–116 ::

TNO
32995

HET RICHTINGSHOOREN IN DE RUIMTE

door J. L. VAN SOEST en P. D. GROOT

Zusammenfassung.

Die vorliegende Abhandlung beschäftigt sich mit Versuchen über dem wirklich räumlichen Richtungshören; das feststellen der (zweidimensionalen) Schallrichtung scheint ermöglicht zu werden, weil das Gehör aus dem Schallfelde zwei physikalischen Gröszen erschlieszt, die zusammenhangen mit einem Zeitunterschied und einem Intensitätsverhältnis, von denen das letzte von der Schattenwirkung des Kopfes und der Richtwirkung der Ohrtrompeten hervorgerufen wird.

Bei Schallfeldsänderungen u. d. bleibt das Richtungsgefühl fast immer eindeutig bestehen, aber die Schallrichtung wird sehr leicht falsch bestimmt.

Diese Experimente fordern eine Erweiterung oder Abänderung der bis jetzt veröffentlichten stereoakustischen Theorien.

1. Inleiding.

Het is een bekend feit, dat de richting van waaruit een geluid ons bereikt, door het gehoororgaan kan worden bepaald en niet alleen geldt dit voor de horizontale, maar min of meer ook voor alle andere richtingen. De stereoacoustische theorieën¹⁾ geven van dit laatste geen verklaring; dientengevolge leek het ons gewenscht het werkelijk ruimtelijke richtingshooren aan een nader onderzoek te onderwerpen.

Voor het aangeven van een richting in de ruimte zijn twee coördinaten noodig; wij kiezen daarvoor de hoeken α en β , die de richting maakt resp. met het *mediane* vlak van het hoofd en met het *horizontale* vlak door de beide ooren (fig. 1). De waaier van richtingen met constante α ligt op een kegel, welks horizontale as de beide ooren verbindt en welks tophoek $\pi - 2\alpha$ groot is. De waaier van richtingen met constante β ligt evenzoo op een kegel, maar

1) Vgl. het overzicht door E. Meyer gegeven in Hndb. der Physik VIII, 538, van Geiger u. Scheel; J. L. v. Soest, Physica IX. 278, 1929.

met verticale as en met een tophoek $\pi - 2\beta$. Het mediane vlak komt overeen met $\alpha = 0$, het genoemde horizontale vlak met $\beta = 0$.

Van een denkbeeldig boloppervlak, met straal R om ons heen, komt ieder punt overeen met één bepaalde richting. Het vertikale vlak door de beide ooren verdeelt het in een voorste en een ach-

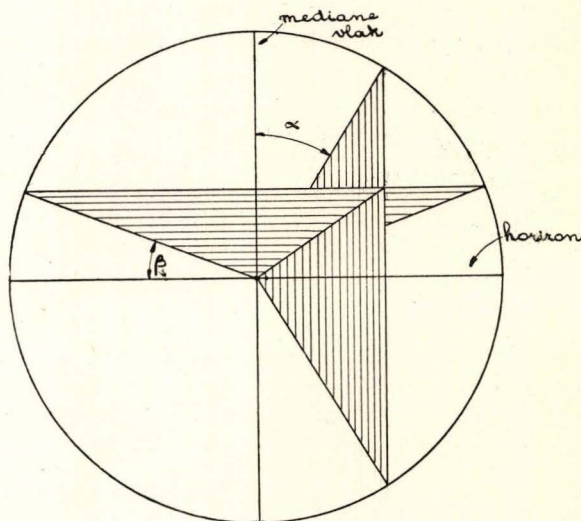


Fig. 1.

terste helft, waarvan alleen de eerste hier ter sprake komt; de punten ervan projecteeren wij op het verticale vlak, zoodat elk punt binnen den cirkel R overeenkomt met een bepaalde richting in voorwaartschen zin. De verticale lijnen in deze projectie zijn gekenmerkt door $\alpha = \text{constant}$, de horizontale door $\beta = \text{constant}$.

Willen de hersenen in staat zijn tot een richtingsbepaling te geraken, zoo moeten zij twee onafhankelijke coördinaten, zeg α en β , uit de door het gehoororgaan ontvangen physische gegevens kunnen afleiden. Men kan zeggen dat dit neerkomt op het oplossen van twee vergelijkingen met twee onbekenden. De twee benoodigde physische gegevens moeten afgeleid worden uit het verschil in toestand van het geluidsveld bij linker- en rechteroor. In natuurlijke omstandigheden zal dat verschil tamelijk klein zijn en dat maakt

het de hersenapparatuur gemakkelijk een tweetal waarden uit te zoeken, die dat verschil karakteriseeren en bepalen. Wij kiezen het voor de hand liggende tweetal: tijdsverschil en intensiteitsverhouding, nauwkeuriger:

1. aankomsttijdsverschil der geluidsverstoringen bij linker- en rechteroor, Δt
2. de psychische grootheid $\psi = \lg(I_1 : I_2)$, de logarithme van de verhouding der intensiteiten links en rechts.

Het invoeren van de logarithme is niet alleen in overeenstemming met de wet van Weber-Fechner, maar het vergemakkelijkt ook, en wel niet toevallig, de discussie der verschijnselen.

2. Vergelijkingen.

In de richting α, β bevindt zich een geluidsbron op afstand l , welke afstand groot is ten opzichte van den oorafstand a . Zijn l_1 en l_2 de weglengten van de geluidsbron tot de beide ooren, waarbij $\Delta l = l_1 - l_2$ en $2l = l_1 + l_2$; en is v de geluidssnelheid, zoo is:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{v} = \frac{a}{v} \sin \alpha. \quad (a)$$

Uit proeven¹⁾ is bekend, dat Δt waar te nemen is tot 10^{-5} of zelfs 10^{-6} sec. In de ruimte stelt $\Delta t = \text{constant}$ een hyperboloïde voor, die bij de gemaakte veronderstelling $a \ll l$ overgaat in haar asymptotenkegel $\alpha = \text{constant}$.

Als linker- en rechteroor twee puntvormige ontvangers in de vrije ruimten zouden zijn, was:

$$\frac{I_1}{I_2} = 1 - \frac{2 \Delta l}{l} = 1 - \frac{2a}{l} \sin \alpha.$$

Daar dit niet het geval is, stellen wij:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(1 - \frac{2a}{l} \sin \alpha\right) \frac{f(\alpha, \beta)}{f(-\alpha, \beta)},$$

waarbij f een ons onbekende functie van de richting is, die aanduidt dat het hoofd met oorschelpen en naar de trommelvliezen

1) J. L. v. Soest en P. D. Groot. Physica IX, 111, 1929.

voerende gehoorgangen een verstoring van het geluidsveld veroorzaakt. Uit $\psi = \lg (I_1 : I_2)$ volgt nu:

$$\psi = -2 \frac{a}{l} \sin a + \lg \frac{f(a, \beta)}{f(-a, \beta)} \quad (b)$$

In het gezochte tweetal vergelijkingen (a) en (b) treden echter niet twee, maar drie onbekenden op: a , β en l , zoodat de hersenen er geen richting uit kunnen bepalen. Nu is onze veronderstelling dat

$$2 \frac{a}{l} \sin a$$

zoo'n klein bedrag is dat het ten opzichte van de logarithmische term verwaarloosd mag worden; dan blijven er wél twee vergelijkingen met twee onbekenden over:

$$\frac{v}{a} \cdot \Delta t = \sin a \quad (1)$$

$$\psi = \lg f(a, \beta) - \lg f(-a, \beta) \quad (2)$$

Aangenomen nu dat de hersenen de functie f kennen, zal het dus mogelijk zijn tot een psychische richtingsbepaling te geraken. Hoe dat geschiedt is een zuiver physiologisch vraagstuk, dat een wonder lijkt. Maar dat een oplossing wordt verkregen, is zeker. De proeven, die wij hierna beschrijven, mogen dit toelichten en zij mogen tevens aantonen hoe de hersenen zich door beïnvloeding van het geluidsveld om den tuin laten leiden.

3. Inrichting der proeven.

De proeven werden, met het oog op volstrekte acoustische rust, uitsluitend des nachts in een stille omgeving genomen. De proefkamer was, ter vermijding van nagalm, rondom bekleed met jute, dat voorzien was van een laag poetskatoen.

De waarnemer zat *met het hoofd geheel stil* in het middelpunt van een denkbeeldigen bol van omstreeks 3 m straal; 25 punten, liggend op dit boloppervlak, waren geconstrueerd en wel zóó, dat het middelste punt recht voorwaarts lag; de overige punten waren op a , resp. β 0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ daaromheen gerangschikt, vgl.

fig. 2. Een geluidgever, die periodisch korte geluidsimpulsen voortbracht, kon beurtelings in deze punten worden opgehangen.

De proef was nu als volgt: terwijl de geluidgever in actie was, bepaalde de waarnemer met gesloten oogen de richting, van waaruit hij het geluid meende te hooren komen, door er met den rechterwijsvinger heen te wijzen en daarna met geopende oogen de waargenomen richting en de ware met elkaar te vergelijken; de afwijkingen in α en β werden in graden nauwkeurig geschat en voor het betrokken punt genoteerd. Door statistisch vele waarnemingen te

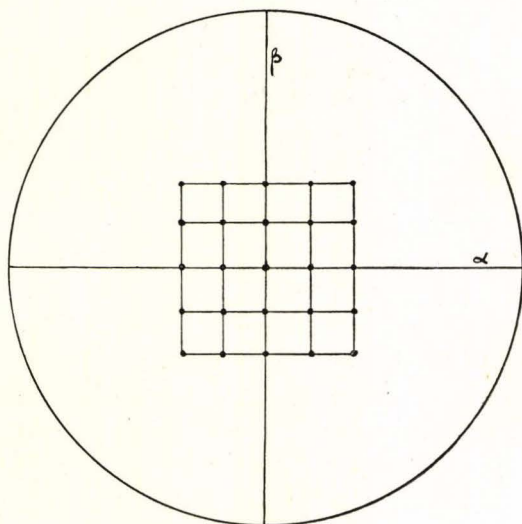


Fig. 2.

verrichten konden de systematische afwijkingen worden bepaald bij de verschillende proeven, die hierna ter sprake komen. Het zij ons vergund vooraf twee opmerkingen te maken.

Men zou kunnen meenen dat het met den vinger (lijn rechteroog — top rechterwijsvinger) aanduiden van de richting, die men acoustisch waarneemt, op zich zelf zeer onnauwkeurig is. Dit is onjuist; wij hebben daaromtrent een onderzoek ingesteld door b.v. te richten, niet acoustisch, maar na optische herinnering; de fouten, die men dan maakt, zijn binnen één graad nauwkeurig, zoo

spoedig men zich even aan een dergelijke wijze van waarnemen heeft gewend.

Men kan aanvoeren dat het zonder bijzondere hulpmiddelen niet zeker is dat het hoofd stil genoeg gehouden wordt; wijlen Prof. Dr. H. Zwaardemaker Czn. maakte ons hierop attent. Te dien einde hebben wij dan ook van tandklemmen gebruik gemaakt, maar het eenige verschil met de proeven zonder tandklem was dat er in de waarnemingen plaatselijke wijzigingen optraden, die terug zijn te voeren tot verstoringen van het geluidsveld door aanwezigheid van de tandklem, reden waarom de hierna

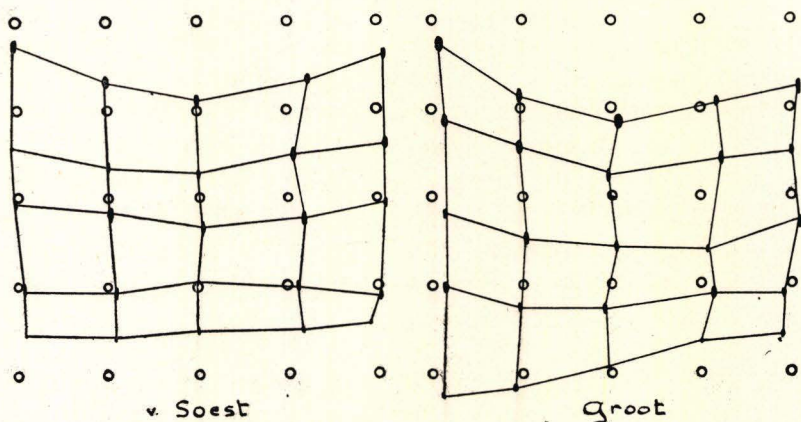


Fig. 3.

te beschrijven proeven dan ook verder zonder tandklem zijn uitgevoerd.

4. De eerste proef.

Op de wijze, zooals hiervoor beschreven, werden door ons elk 30 waarnemingen op elk van de 25 punten verricht. Voor het dertigtal werden de gemiddelde afwijkingen in α en β bepaald, benevens de middelbare fouten van die gemiddelden. De uitkomsten zijn neergelegd in fig. 3; als cirkeltjes zijn de ware richtingen der 25 punten aangegeven, als gevulde ellipsjes de gemiddeld waargenomen richtingen, waarbij de halve assen tevens de grootten der middelbare fouten aangeven.

Men ziet dat er systematische afwijkingen optreden, dat deze verwaarloosbaar gering zijn voor wat de α betreft, maar in het

algemeen groot voor wat de β betreft. Ook de middelbare fouten zijn voor de β grooter dan voor de α , hetgeen zeggen wil dat het bepalen van α uit de Δt -vergelijking de hersenen blijkbaar minder moeite vergt, dan dat van β uit de ψ -vergelijking.

De systematische afwijkingen zijn het duidelijkste te overzien in de waarnemingen van v. Soest: bij $\beta = -10^\circ$ zijn ze vrijwel nul; bij $\beta = 0^\circ$ en hoger is β te laag waargenomen en des te sterker naarmate β grooter is; omgekeerd is $\beta = -20^\circ$ te hoog waargenomen. Bij de waarnemingen van Groot treft men iets dergelijks aan, gestoord door een onsymmetrie, een gevolg van een onsymmetrisch gehoororgaan.

De systematische afwijkingen in β verklaren wij uit de betrekkelijke nabijheid van de geluidsbron (2,90 m), die veroorzaakt dat in verg. *b* de factor $2a/l \sin \alpha$ niet verwaarloosd had mogen worden. De hersenapparatuur kan hiermede natuurlijk geen rekening houden en concludeert tot een verkeerde waarde van β . Daar Δl en ψ steeds van teeken verschillen (geluidsbron aan linkerkzijde $\Delta l = -$, $\psi = +$; aan rechterzijde $\Delta l = +$, $\psi = -$) kan men concluderen dat de fout gekozen β zóó is, dat zij bij een grootere absolute waarde van ψ behoort.

Als wij nu de voorstelling te hulp roepen en aannemen dat in fig. 4 de ψ -lijnen verlopen, zooals is aangegeven, terwijl de Δt -lijnen natuurlijk verticaal zijn, zoo kunnen wij aan de hand van deze figuur gemakkelijk zien, wat het effect van een te nabij gelegen geluidsbron is. Er is aangenomen dat ψ van een bijzondere richting links tot een bijzondere richting rechts van $+\Psi$ tot $-\Psi$ verandert. Een te korte afstand van de geluidsbron veroorzaakt bij deze voorstelling een verkeerde schatting, die (langs de Δt -lijn) gericht is naar een ψ -lijn met grootere absolute waarde, dus in de richting naar de stippellijn, die $+\Psi$ en $-\Psi$ verbindt, juist zooals in onze proef is waargenomen. In stede van de richtingen *a*, *b*, *c*, *d* zou men dan acoustisch b.v. de richtingen 1, 2, 3, 4 bepalen.

In de uitkomsten van deze eerste proef moet ons één ding nog speciaal opvallen, n.l. dat er in het mediane vlak $\alpha = 0$ nog een richtingsbepaling mogelijk is; uit verg. 2 toch zou volgen:

$$\psi = \lg f(+0, \beta) - \lg f(-0, \beta) \equiv 0,$$

zoodat β onopgelost zou blijven. Er zijn twee mogelijkheden om aan deze moeilijkheid te ontkomen.

De eerste is dat het mediane vlak slechts bij benadering een symmetrievlak is, dus dat de functie links en de functie rechts niet elkanders spiegelbeeld zijn.

De tweede is dat $f(+0, \beta) \neq f(-0, \beta)$, hetgeen misschien physiologisch te rechtvaardigen zou kunnen zijn, daar het de psychische discontinuïteit rechts-links beteekent. Wij danken deze opmerking aan Prof. Jhr. Dr. G. J. Elias, dien wij ook zeer verplicht zijn voor zijn belangstelling in de proeven.

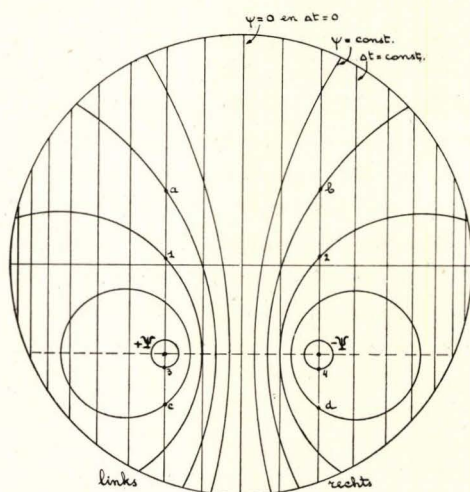


Fig. 4.

Er doet zich bij deze functie f verder nog de vraag voor of de vorm van het hoofd en de plaatsing der gehoorgangen de beslissende rol bij de vervorming van het geluidsveld spelen, of dat een reflectie tegen den bodem in het spel kan zijn. Te dien einde hebben wij, op dezelfde plaats, het hoofd van den waarnemer 50° voorover gericht en voor elk punt nog eens 10 waarnemingen bepaald. Is reflectie tegen den bodem van beslissenden invloed, zoo had in groote trekken hetzelfde resultaat te voorschijn moeten komen als bij de voorgaande proef. Er trad echter een verdere versterking van het effect op van te lage schatting van β , zoodat bij $\beta = 20^\circ + 50^\circ = 70^\circ$ voor Groot een afwijking van gemiddeld 13° , voor v. Soest van gemiddeld 18° werd waargenomen. Onze

conclusie is dat de functie f bepaald wordt door den vorm van het hoofd, en dat bij onze proef reflectie tegen den bodem geen of slechts een secundaire rol gespeeld heeft.

5. *Doofheidsproef.*

Het is nu van belang na te gaan hoe de invloed is van een of andere opzettelijke verandering in den toestand; wat zal er b.v. geschieden als men de intensiteit ter plaatse van het linkeroor kunstmatig verzwakt? De hersenen zullen dan wel de goede Δt -lijn vinden, maar een verkeerde ψ -lijn, met een waarde van ψ , die (algebraïsch) kleiner is dan in het normale geval; de richtingsbepaling is dan goed in α , maar fout in β . Heeft men de intensiteit te veel verzwakt, dan kan er om tweeërlei redenen iets onnatuurlijks ontstaan; in de eerste plaats kan het zijn dat de waargenomen Δt -lijn en ψ -lijn elkander niet meer snijden, maar in de tweede plaats zal het kunnen gebeuren dat ψ in absolute waarde grooter wordt dan het natuurlijke maximum Ψ .

De proef, die wij gedaan hebben, was zóó extreem, dat wij het linkeroor volkomen doof hadden gemaakt, zoodat Δt in het geheel niet meer werd waargenomen en dat ψ tot $-\infty$ naderde, doordat de intensiteit links de nulwaarde bereikte.

Bij de proef kregen wij voortdurend een duidelijk richtingsgevoel, wáár de geluidsbron zich ook bevond, en steeds weer viel onze bepaling ongeveer samen met de richting, waarin ψ zoo groot mogelijk negatief wordt waargenomen ($-\Psi$).

Fig. 5 geeft boven de gemiddelde verplaatsingen aan in den vorm van pijlen en onder nog eens de bijbehorende middelbare fouten per zestal waarnemingen, als halve assen van ellipsen uitgezet.

6. *Vervorming geluidsveld.*

Men kan min of meer radicaal het geluidsveld vervormen en daarmee de functie f en het verloop der ψ -lijnen wijzigen; de hersenen raken dan het spoor bijster.

Wij hebben proeven genomen, waarbij platte koperen kleppen met een gat vlak tegen de ooren werden aangebracht. De α werd wederom nauwkeurig bepaald, maar de bepaling van β was zeer onregelmatig. Nu eens nam men β ongeveer goed waar, dan weer trad er in β een volkomen inversie op, zoodat men beneden den horizon waarnam, wat er ver boven lag. Soms kreeg men meer een

gewaarwording uit twee richtingen of concludeerde men er blijkbaar één gemiddelde richting uit. De functie f schijnt daarbij zoodanig gewijzigd te zijn, dat in uitgesproken voorwaartsche richting tusschen een Δt -lijn en een in verloop gewijzigde ψ -lijn twee snijpunten optreden.

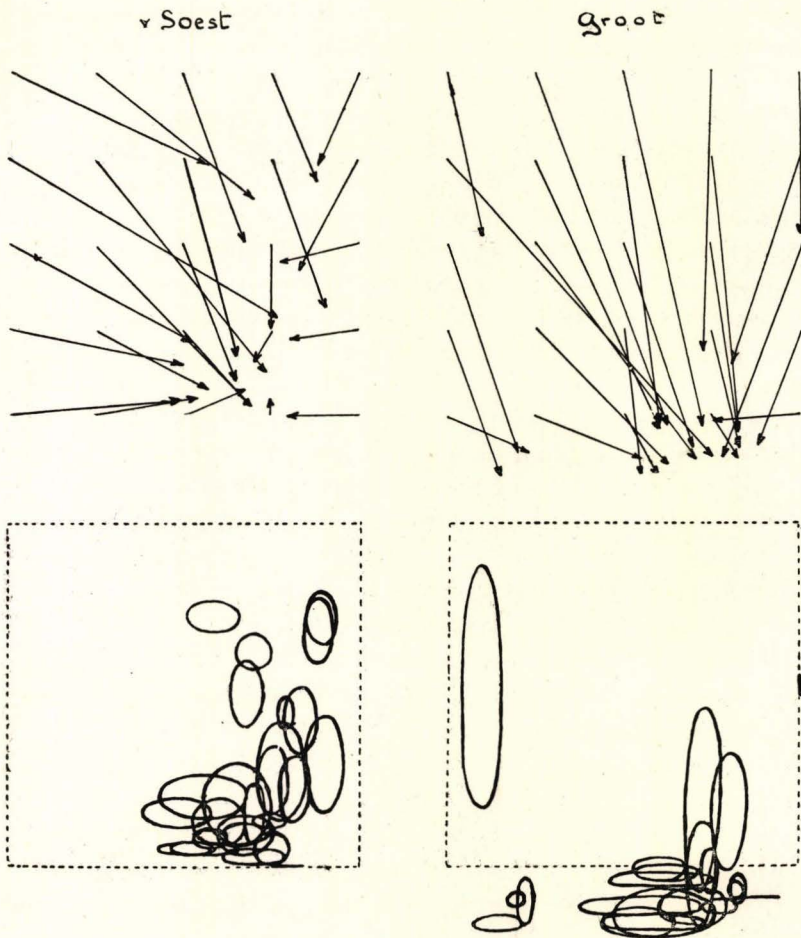


Fig. 5.

De hersenen, in de war gebracht, besluiten de eene keer tot het eene of tot het andere of tot beide, al of niet tot een gemiddelde versmolten.

De resultaten van deze proef zijn moeilijk grafisch af te beelden; het zij ons vergund te volstaan met het volgende.

In fig. 6 zijn de vaste punten afgezet en voor ieder vast punt zijn de hoogste en laagste waargenomen richtingen opgeteekend en door een lijn verbonden. De overige verticaal waargenomen richtingen vallen dus, bij verwaarloozing van de kleine horizontale afwijkingen, op deze lijn. Deze hoogste en laagste richtingen, behorende bij de vijf punten der eerste verticale kolom, zijn dus door de eerste vijf verticale lijnen weergegeven; de eerste lijn van deze

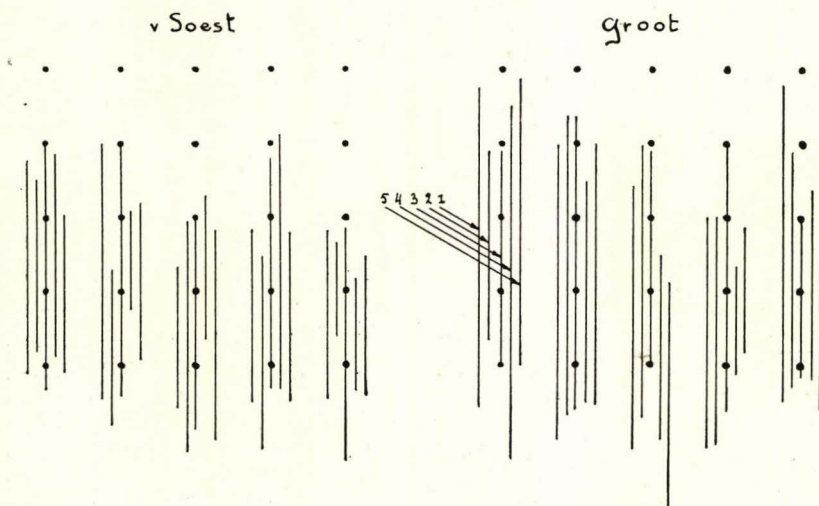


Fig. 6.

groep behoort bij het bovenste punt, de tweede bij het daaronder liggende punt, enz.

7. Overzicht.

Dit zijn de voornaamste proeven, die wij omtrent dit onderwerp hebben verricht; wij hadden ze heel gaarne verder uitgebreid, maar de waarnemingen vergen veel tijd, en deze was voor ons beperkt.

Echter meenen wij wel dat zij voldoende zijn om de beschouwingen te steunen en te rechtvaardigen, die in deze mededeeling voorkomen. Naar onze meening is een acoustische richtingsbepaling in de ruimte mogelijk, doordat het gehoororgaan zoowel een intensiteitsverhouding als een tijdsverschil op de een of andere wijze naar het hersenapparaat weet over te brengen, waaruit dit tot

een ruimtelijke richting (met 2 coördinaten) weet te besluiten. De proeven toonen aan dat een te nabij gelegen geluidsbron, maar ook kunstmatige verstoringen van het geluidsveld de richtingsbepaling in de war kunnen sturen, in het bijzonder voor wat de bepaling van de coördinaat β betreft.

Bij de proeven hebben wij het hoofd stil gehouden; onze beschouwingen hebben ook op een stil gehouden hoofd betrekking. In normale omstandigheden zal het hoofd daarentegen gaarne bewegingen uitvoeren, die de richtingsbepaling vergemakkelijken en die ook aanleiding zijn, dat bij niet eenduidige oplossingen, zooals wij die b.v. hierboven in § 6 hebben leeren kennen, de juiste richting uitgekozen wordt ¹⁾.

8. *Stereoacoustische litteratuur.*

Men vindt van vele *proeven* melding gemaakt ²⁾, waarbij echter vrijwel steeds gebruik gemaakt is van kunstmatige hulpmiddelen, als telefoons en aan de ooren bevestigde buizen. Op allerlei manieren heeft men aangetoond dat zoowel een tijdsverschil als een intensiteitsverhouding een stereoacoustisch effect teweeg kunnen brengen, meestal in den vorm van een geluidsbeeld in het achterhoofd. Het natuurlijke gaat bij dergelijke proeven al heel spoedig verloren, niet alleen omdat intensiteitsverhouding of tijdsverschil bovennatuurlijk groot gemaakt kunnen worden, maar vooral omdat er een onnatuurlijk verband te voorschijn kan komen tusschen de beide grootheden, onnatuurlijk omdat er geen ruimtelijke richting is, die dát verband kan geven.

Proeven zonder dergelijke hulpmiddelen vindt men sporadisch vermeld, maar beschrijvingen blijven daarbij achterwege.

Berekeningen zijn uitgevoerd over de schaduwwerking van het hoofd. Daarbij wordt een geluidsbron van zuiveren toon verondersteld, een bolvormig en star hoofd met puntvormige ooren aan het

1) v. Soest l.c. 271.

2) E. M. v. Hornbostel u. M. Wertheimer, Berliner Ber. **20** (1920) 388; W. Kunze, Phys. Z. XXII (1921) 649; H. Hecht, Naturwiss. **10** (1922) 107. J. L. v. Soest en P. D. Groot l.c.; J. L. v. Soest l.c.; G. v. Békésy, Phys. Z. XXXI (1930) 824 en 857, Ann. d. Ph. VII (1930) 329.

oppervlak ¹⁾. Deze berekeningen benaderen de werkelijkheid zeer onvolkomen.

Verschillende *theorieën* zijn er omtrent de stereo-acoustische verschijnselen verkondigd. De oudste is die, welke de intensiteitsverhouding als oorzaak van de richtingsgewaarwording aanneemt. Rayleigh ²⁾ is de eerste, die ook het fazeverschil bij sinusvormige geluidstrillingen als mogelijke oorzaak noemt; v. Hornbostel en Wertheimer ³⁾ leggen den nadruk op tijdsverschillen: bij impulsen aankomsttijdsverschillen, bij zuivere tonen fazeverschillen in tijdmaat uitgedrukt.

Hartley en Fry ⁴⁾ wijzen op het onverbrekelijke verband tusschen fazeverschil en intensiteitsverhouding, wanneer de toon van de geluidsbron en haar plaats zijn gegeven; zij steunen hun theorie op de hierboven genoemde berekeningen.

Zij wijzen er ook op dat voor een *plaatsbepaling* in de ruimte drie coördinaten noodig zijn, b.v. twee richtingscoördinaten en een afstand. Bij een geluidsbron van zuiveren toon ontvangt het gehoororgaan slechts twee voor de bepaling nuttige gegevens: intensiteitsverhouding en fazeverschil. Om aan deze moeilijkheid te ontkomen, slaan zij den o.i. verkeerden weg in en laten de hersenapparatuur de afstand en de horizontale richting oplossen en de tweede richting verwaarlozen, zoodat zij niet tot een werkelijk ruimtelijk richtingshooren komen.

Zij wijzen er verder op dat de schaduwwerking voor elke frequentie anders is en dat dus $I_1 : I_2$ daarbij verandert. Zij veronderstellen dat een meertonig geluid, óók een impuls, door het gehoororgaan in Fouriercomponenten wordt ontleed, waarbij uit elke component een richtingsbepaling volgt, waarna de hersenen uit al die bepalingen tot de waargenomen richting besluiten. Zij spreken dan ook steeds van fazeverschillen en verwerpen het „aankomsttijdsverschil”, zooals v. Hornbostel en Wertheimer dat hebben aangegeven en zooals wij dat ook gebruiken.

Dit verschil lijkt ons echter voor de physische discussie een

1) Rayleigh, Phil. Mag. XIII (1907) 214; Stewart, Phys. Rev. 33 (1911) 467; Hartley and Fry, Phys. Rev. 18 (1921) 431. 2) l.c. 3) l.c.

4) Phys. Rev. 13 (1919) 319 en 373 (ten 2en male), 18 (1921) 431; Bell Syst. Techn. J. I (1922) 33; Phys. Z. XXIII (1922) 273.

kwestie van woorden. Voor het physiologische onderzoek is het natuurlijk van belang.

Te onderzoeken wat zich in het gehoororgaan en in de hersenen zelf afspeelt ligt buiten het bereik van den physicus; dezen past het slechts bewondering te hebben voor de inrichting van het levende organisme, die hem tot bescheidenheid brengt als hij zijn eigen instrumenten daarmee waagt te vergelijken.