

RICHTINGSHOOREN BIJ SINUSVORMIGE GELUIDSTRILLINGEN

door J. L. VAN SOEST

Zusammenfassung.

Ein Experiment wird mitgeteilt zur Untersuchung der Lokalisation reiner Töne. Es stellt sich ein kombinierter Phasen- und Intensitätseffekt heraus; das Ohr wirkt als eine Kombination eines Druck- und Energieempfängers.

Es wird erklärt wie ein leichtes Kopfbewegen:

- 1) über „vorwärts“ und „rückwärts“ in der Richtungsbestimmung entscheidet,
- 2) die Richtungsbestimmung höherer Töne in einer gewissen Masse ermöglicht,
- 3) auch im dreidimensionalen Raum zu einem angenäherten Richtungseindruck führen kann.

In een onlangs verschenen mededeeling ¹⁾ is aangetoond, hoe buitengewoon scherp het gehoororgaan bij acoustische impulsen tot een richtingsbepaling in staat is, ook zonder kunstgrepen. Bij sinusvormige geluidstrillingen is veelal eveneens een richtingsbepaling mogelijk, doch bij het kleiner worden der golflengten wordt dit moeilijk tot onmogelijk. Onlangs werd mij de gelegenheid geboden in het kort een reeks proeven mede te deelen ²⁾, die over deze zaak eenig nieuw licht werpen en die bij kunnen dragen tot het onderzoek naar de al- of niet-juistheid der verschillende stereo-acoustische theorieën.

Evenals in de vorige mededeeling, is de apparatuur uiterst simpel; maar aan den anderen kant zijn ook weer alle voorzorgen getroffen om ev. foutenbronnen te elimineeren. Een kaoutsjoukslang van 20 m. lengte, met een binnendiameter van 12 mm. wordt in een cirkelvorm op een geluiddempenden bodem gelegd en aan de beide

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

2) Nederlandsch Natuur- en Geneeskundig Congres te Rotterdam 1929.

einden met de ooren van den waarnemer verbonden. Een stemvork, die een grondtoon van 128 trillingen in de secunde bezit, wordt door een helper aangeslagen, waarbij de ev. aanwezige boventonen zorgvuldig gedempt worden; daarna wordt de stemvork met den steel ergens op de slang gedrukt; de trillingen planten zich naar beide zijden in de buisruimte naar de ooren van den waarnemer voort. Deze begint eerst te luisteren als de toon zich continu heeft ingesteld; hij ervaart dan een, zij het valsche, richtingsgewaarwording. Na eenige oefening blijkt het niet moeilijk daarvoor een psychisch „waardeeringscijfer” uit te spreken: 1, 2 of 3 naar mate van de duidelijkheid van rechtswaarneming, of met het — teeken van links-waarneming, en 0 voor middengewaarwording.

Op de slang is een schaalverdeling van halve decimeters aangebracht; de helper drukt den steel van de stemvork achtereenvolgens op alle strepen der schaal en doet dit in statistisch willekeurige volgorde en wel zoodanig, dat aan het eind der proefneming op elke streep acht maal is ingesteld. Voor elke waarneming bepaalt de waarnemer zijn waardeeringscijfer en aan het eind der proef is dus een gemiddeld cijfer ψ voor elk punt der schaal te berekenen. Legt men de schaalverdeling der slang langs de abscissenas en zet men de waarden ψ als ordinaten af, zoo kan men een „waardeeringskromme” trekken.

Doet men zoo'n proefneming, in plaats van met stemvorktrillin-

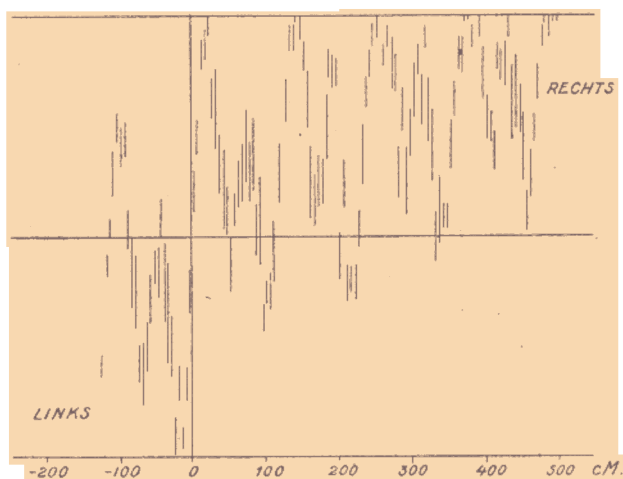


Fig. 1.

gen, met periodieke impulsen, zoo verkrijgt men een kromme, die, buiten het midden van de slang (0-punt van de abscis), zeer snel tot de limietwaarde 3 der waardeering stijgt, + aan den rechterkant — aan den linkerkant. Dit is overeenkomstig met hetgeen men mag verwachten.

Bij de sinusvormige trillingen is het verschijnsel veel gecompliceerder en niet onmiddellijk te begrijpen; de kromme, die men dan verkrijgt, is uit de eerste figuur te herkennen. Het midden der lijntjes geeft het gemiddelde waardeeringcijfer aan, de halve lengte der lijntjes is de middelbare fout, die bij deze gemiddelden behoort. De regelmaat, die in de aldus geschetste functie aanwezig moet zijn, komt iets duidelijker uit in de eenigszins geschematiseerde tweede figuur.

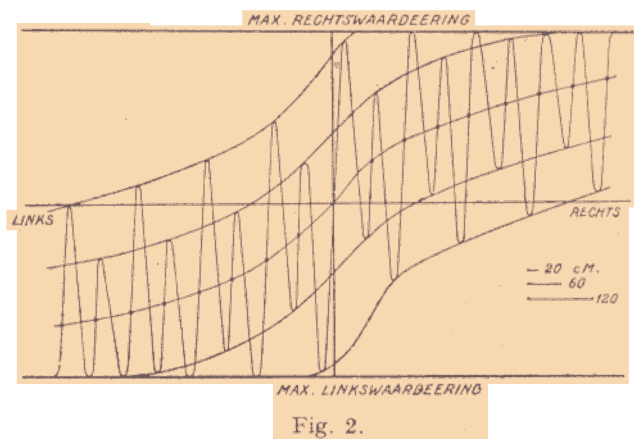


Fig. 2.

Daarin vallen de volgende bijzonderheden op:

- 1) de kromme vertoont primaire en secundaire maxima, en primaire en secundaire minima;
- 2) deze vier groepen van extreme waarden liggen op vier krommen, die men kan trekken en die een flauw hellend verloop hebben;
- 3) er laat zich voorts een „middenlijn” trekken, die een zelfde flauw hellend verloop heeft;
- 4) de abscisafstanden der primaire maxima verschillen 120 cm.; hetzelfde bedrag vindt men bij elk der drie andere groepen extreme punten terug;

- 5) de „middenpunten”, snijpunten van de middenlijn met de kromme, vormen twee reeksen; de eerste reeks ligt op de opgaande, de tweede op de neergaande stukken der kromme; de abscissen der eerste reeks middenpunten verschillen onderling 60 cm.

DISCUSSIE.

De golflengte van den grondtoon der stemvork bedraagt ongeveer 258 cm., de halve golflengte dus 129 cm., een getal, dat veel doet denken aan de boven in 4) genoemde waarde van 120 cm. en aan het dubbele van de in 5) genoemde waarde van 60 cm. De voortplantingssnelheid der trilling in de buis zal kleiner zijn dan die van de trilling in de vrije lucht en bovendien zal het neerdrukken van den stemvorksteel op den buiswand wellicht ook nog eenigen invloed op de frequentie van den stemvorktoon uitoefenen, zoodat wij mogen veronderstellen dat de golflengte der trilling in de buisruimte met 240 cm. overeenkomt. Niet alleen in de schematische figuur, maar ook in fig. 1, treden de getallen 120 en 60 met groote nauwkeurigheid op. Het is trouwens duidelijk dat, na een verplaatsing der stemvork over een halve golflengte (overeenkomende met een heele golflengte wegverschil links en rechts) bij den waarnemer een identieke richtingsgewaarwording opgewekt moet worden, omdat bij een sinusvormige trilling het gehoororgaan niet in staat kan zijn een golf van zijn congruente buurgolf te onderscheiden.

Die periodiciteit van 120 cm. is dus te verwachten, maar uit de figuur blijkt dat zij niet volkomen is tengevolge van een optredend neveneffect, dat de flauwe helling der geteekende lijnen veroorzaken moet; dit moet een *intensiteitseffect* zijn. De slang zal een demping op de voortbewegende trillingen uitoefenen en het dempingsverschil tusschen rechts en links zal grooter zijn naar mate de stemvork verder uit het midden staat. Het is evident dat, als intensiteitsverschillen inderdaad het richtingshooren beïnvloeden, een grootere intensiteit aan het rechteroor de rechtsgewaarwording moet begunstigen; dit stemt overeen met hetgeen men uit de figuur kan aflezen.

Zou men dit intensiteitseffect — een gevolg van de inrichting van het experiment — achterwege kunnen laten, zoo mogen wij de kromme vereenvoudigd denken tot die in fig. 3, die thans volkomen periodiek is en die te verklaren moet zijn uit het eenige ander moge-

lijke effect, dat de richtingsgewaarwording kan bepalen: het *tijdsverschil*- of *faze-effect*.

In de onmiddellijke nabijheid van het midden der slang gedraagt de waardeeringsfunctie zich als bij periodieke impulsen: een snelle doorgang door „midden”gewaarwording en even daarbuiten een sterke links- of rechtswaardeering. Na 60 cm. herhaalt zich het zelfde verschijnsel in minder sterke mate; na 60 cm. weer, maar nu in de oude sterke mate, enz. Bij het neerdrücken van de stemvork ter plaatse van de primaire middenpunten (tusschen een primair

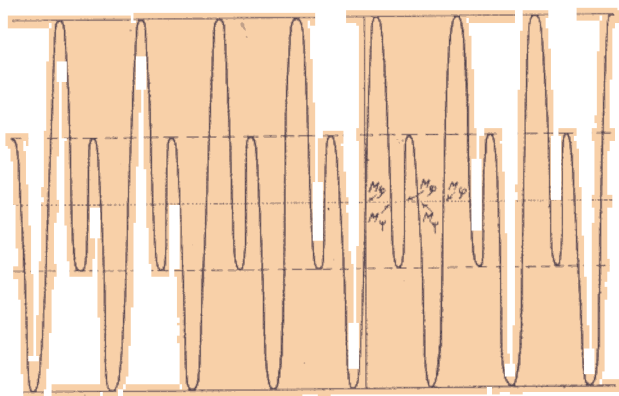


Fig. 3.

maximum en een primair minimum gelegen) zal het fazeverschil tusschen rechts en links 0 of een even aantal malen π groot zijn; van oogenblik tot oogenblik zijn dan de drukamplituden aan weerszijden gelijk. Bij plaatsing van de stemvork op de secundaire middenpunten (tusschen een secundair maximum en een secundair minimum gelegen) zal het fazeverschil tusschen rechts en links daarentegen een oneven aantal malen π zijn, zoodat de amplituden aan weerszijden van oogenblik tot oogenblik gelijk, doch tegengesteld van teeken zijn; hun kwadraten daarentegen (samenhangend met de intensiteit) zijn óók in teeken gelijk.

Het gehoororgaan zal in de beide ooren een physische grootheid ontvangen en verwerken, waarvan de psychische richtingsgewaarwording een uiteindelijk resultaat is. Vragen wij, hoe die grootheid er uit zal zien, dan kan het in ieder geval noch de drukamplitudo zelf noch alleen het kwadraat ervan zijn; in het eerste geval zou

men geen secundaire opgaande deelen der kromme kunnen verwachten; in het tweede geval zouden de primaire en secundaire deelen onderling en ook de extreme waarden onderling gelijk moeten zijn. Wij maken nu de eenvoudige veronderstelling, dat de gezochte physische grootheid als volgt niet lineair met de drukamplitudo samenhangt:

$$g = a + c \cdot a^2$$

Het optreden van de grootheid a^2 heeft een tweede harmonische in de functie tot gevolg.

Hiermede is nog niet verklaard waarom de functie ook neergaande stukken vertoont; bij het experiment zelf wekken deze den indruk een discontinuïteit in zich te bergen; men voelt in deze waarnemin-

MIDDELBARE FOUT ALS FUNCTIE DER PLAATS

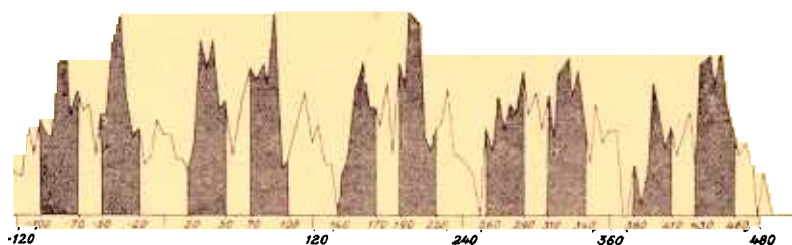


Fig. 4

gen een onzekerheid of tweeslachtigheid, die in fig. 4 tot uiting wordt gebracht. Langs de abscissenas is weer de schaalverdeling der slang gelegd, maar thans zijn als ordinaten de middelbare fouten van de waarnemingen afgezet, en wel in wit voor de opgaande, in zwart voor de neergaande stukken der kromme. Ook nu valt een zekere periodiciteit op, waarbij het vooral van belang is, dat de grootste fouten steeds in het zwarte gebied schijnen voor te komen, d.w.z. bij de neergaande stukken der kromme. Het gemiddelde der middelbare fouten in deze stukken bedraagt 0,37 tegen 0,19 en 0,29 respectievelijk voor de primaire en secundaire deelen van het witte gebied (d.w.z. de opgaande stukken der kromme). De grootste fouten worden gemiddeld dus inderdaad in de neergaande gedeelten der kromme gemaakt.

Men krijgt wel het gevoel, dat het geluidsbeeld in dergelijke geval-

len niet enkelvoudig is, maar dat er zich twee tegelijk bevinden, die men echter psychisch niet herkennen kan of erkennen wil en die men dan tot één gemiddelde samenvoegt. Zouden deze beide tegelijk aanwezige geluidsbeelden bij een bepaalde waarneming symmetrisch in het achterhoofd komen te liggen, zoo zou dus hun resultante een „midden” gewaarwording moeten veroorzaken, waardoor, tusschen elke twee physisch aanvaardbare middelpunten M_ϕ der kromme, nog een psychisch M_ψ komt te liggen, zooals fig. 3 dat aangeeft.

De proefnemingen vereischen zeer veel inspanning; te merkwaardiger lijkt het daarom dat men door psychische waarneming een dergelijke functie kan opmaken met betrekkelijk zoo geringe middelbare fouten. De proeven werden door mij verricht met de nauwgezette hulp van den amanuensis C. M. A. I n s j e, die zelf ook een kleinere serie waarnemingen verrichtte met geheel overeenkomstig resultaat.

OPMERKING I.

Tot nu toe hielden wij in onze functie een lengtemaat als abscis; het fazeffect komt beter tot zijn recht, indien men de lengtemaat (die het halve wegverschil tusschen links en rechts vertegenwoordigt) vervangt door het tijdsverschil tusschen links en rechts, door de abscissen met $1/2v$ te vermenigvuldigen, waarbij v de geluidssnelheid in de buisruimte is. De periodieke stukken zijn dan juist den trillingstijd T lang. Door de abscissen vervolgens te vermenigvuldigen met $2\pi/T$, zou men deze dan nog in hoekmaat kunnen aflezen, waarbij de periode in de kromme 2π bedraagt.

In het eerste geval geven wij ψ als een functie van een tijdsverschil t , in het tweede als een functie van een hoekverschil $2\pi t/T$. Wij kunnen ook zeggen: wij geven ψ als een functie van het fazeverschil, in het eerste geval uitgedrukt in seconden, in het tweede geval in radialen. Het blijkt dat beide een rol spelen in de stereoacoustische theorieën.

Men zou kunnen meenen dat $\dot{\psi} = \dot{\psi}(2\pi t/T)$ van de gebruikte frequentie onafhankelijk is; dit is echter slechts het geval voor de plaats der middenpunten (fig. 3). Aan den anderen kant blijkt het na proefneming dat bij $\psi = \psi(t)$ de eerste afgeleide $d\psi/dt$ in de omgeving der middenpunten *invariabel* is, welke trillingsfrequentie men ook bezigt, of zelfs bij gebruik van impulsen of geruisch. Dat zulks met

vrij groote nauwkeurigheid geldig is, is voor het menschelijk gehoor-
orgaan van groot nut, daar anders het geluidsbeeld van een vaste
geluidsbron zich, bij toonvariatie, in het hoofd heen en weer zou be-
wegen.

OPMERKING II.

Wij moeten er ons natuurlijk terdege rekenschap van geven, dat
onze proefneming niet volkomen in overeenstemming kan zijn met
hetgeen zonder hulpmiddelen in de vrije natuur kan worden waar-
genomen. Onze oorafstand heeft een constante grootte, zeg 20 cm.,
en het fazeverschil kan dus nooit $20/v$ seconden of $40\pi/Tv$ radialen
overschrijden. In onze proef kon dat onbeperkt zijn; in de vrije na-
tuur zijn wij slechts in staat een klein bandje van de kromme waar te
nemen en wel van 10 cm. links van het ware middenpunt tot 10 cm.
rechts daarvan. Men ziet dat deze band bij de in fig. 1 en 2 gebruikte
frequentie nog geheel in het opgaande stuk der kromme valt, zoodat
de rest dezer kromme bij natuurlijke waarneming voor ons verbor-
gen moet blijven, maar hetgeen ook tot gevolg heeft, dat wij bij een
dergelijken toon met even groote nauwkeurigheid kunnen richten
als bij een impuls of bij geruisch. Neemt men echter een hooger
toon waar, dan kan het gebeuren dat binnen dien afstand van
 2×10 cm. reeds een labiel (neergaand) stuk komt te liggen; bij nog
hooger toon kan het eerst opvolgende opgaande stuk der kromme
een rol gaan spelen, enz. Indien het hoofd geen schaduw voor zeer
hooge tonen veroorzaakte, zou men van de kromme (vgl. fig. 3) on-
geveer 10 perioden, dus nog twintig opgaande stukken kunnen
waarnemen. Door de zeer snelle opeenvolging dezer stukken blijven
hun lengten echter maar heel klein, zoodat er dan nauwelijks van
rechts- of linkswaardeering meer sprake is. En bovendien, al was dit
nog wel het geval, zoo zou men uit de plaats van het geluidsbeeld
toch niet meer tot een richtingsbepaling kunnen geraken, omdat
deze op verre na niet meer eenduidig is. Het is trouwens een bekend
feit — en het is vroeger reeds herhaaldelijk experimenteel aange-
toond — dat het zuiver richten bij hooge tonen voor ons vrijwel on-
mogelijk is.

DE STEREOACOUSTISCHE THEORIEËN.

Vroeger meende men dat de schaduwwerking van het hoofd de
physische oorzaak van het acoustisch richtingseffect was. R a y-

leigh¹⁾ wees er op dat dit alleen het geval zou kunnen zijn bij hooge tonen, wier golflengte niet groot was ten opzichte van de afmetingen van het hoofd. Hij zocht de oorzaak veel eer in de tusschen rechts en links optredende fazeverschillen; maar zij, die op dit denkbeeld voortbouwden, sloegen den verkeerden weg in en drukten het fazeverschil in *hoekmaat* uit, en wel zóó, dat de ervaren richtingshoek gelijk werd aan den fazehoek.

Het eerst wezen v. Hornbostel en Wertheimer²⁾ op de fouten dezer theorie en tevens verkondigden zij een tijdstheorie, die het richtingseffect bij impulsen uit aankomsttijdsverschillen en bij sinusvormige tonen uit fazeverschillen, in *tijdsmaat* uitgedrukt, verklaarde.

Mijn waarnemingen zijn in hoofdzaak in overeenstemming met hun theorie; in verschillende details móet ik echter van hen afwijken. Doordat zij bij hun proeven hoogere tonen gebruikt hebben, zijn verschillende finesses, die bij de hier bovenbeschreven meting te voorschijn kwamen, niet door hen waargenomen; in het bijzonder hebben zij het optreden van een tweede harmonische in de richtingswaardeering niet opgemerkt. Bij hen treedt bovendien een constante $k = 21$ cm. zeer op den voorgrond. Dit weglengteverschil geeft volgens hen de maximale zijdelingsche waardeering; zij wijzen er op dat dit bedrag niets te maken heeft met den acoustischen oorafstand; gedeeltelijk kan ik het hiermee eens zijn; maar aan den anderen kant is het een geluk, dat deze beide grootheden gelijk of nagenoeg gelijk zijn, want anders zouden wij als een gevoelig meetinstrument zijn, dat met een verkeerde schaalverdeeling is behept.

In opmerking II heb ik aangegeven dat de functie voor de richtingswaardeering slechts natuurlijke beteekenis kan hebben in een band, die den oorafstand breed is. Ook v. Hornbostel en Wertheimer hebben bij hun proeven, die met hoofdtelefonen werden verricht, daarmee te maken gekregen. Ook zij reppen van het labiele karakter van hun richtingsbepaling, dáár waar twee geluidsbeelden verwacht zouden kunnen worden, doch ook zij bespeuren nooit anders dan één beeld, dat daarvan de resultante schijnt te zijn. Hoewel dan de vorm van mijn waardeeringskromme in verschillende details afwijkt van hun waarnemingen, zoo is er dus in het faze-effect toch ook zóó belangrijke overeenstemming, dat gezegd

1) Rayleigh Phil. Mag. 13 (1907) 412.

2) v. Hornbostel u. Wertheimer. Sitz. Ber. der preusz. Ak. der Wiss. 1920.

mag worden dat mijn waarnemingen hun theorie hieromtrent bevestigen. Onjuist is het echter als zij de intensiteitsverschillen aan rechter- en linkeroor geheel buiten beschouwing laten. Bij mijn proefneming traden groote intensiteitsverschillen op en deze bleken het richtingseffect sterk te beïnvloeden; bij natuurlijke waarneming zal het intensiteitseffect een veel kleiner rol spelen. Volgens H e c h t ¹⁾ geeft een intensiteitsverschil van 10 %, bij een toon met een frequentie 1000, een zijdelingsche richtingsgewaarwording van 3°, wat ook bereikt wordt door het faze-effect bij 1 cm. wegverschil; afgezien van schaduwwerkingen treden bij natuurlijke waarneming dergelijke intensiteitsverschillen nauwelijks op. En in zooverre kan men dus toegeven dat het intensiteitseffect bij natuurlijke waarneming klein is en voor groote afstanden van de geluidsbron te verwaarloozen valt. Onjuist is hun theorie, waar zij een tijdsverschil van $3 \cdot 10^{-5}$ sec. als drempelwaarde voor richtingsgewaarwording noemen ²⁾.

Door H a r t l e y en F r y ³⁾ is een nieuwe theorie opgebouwd, die óók de intensiteitsverschillen in aanmerking neemt en van de onderstelling uitgaat, dat faze en intensiteit onverbrekkelijk samen de primaire oorzaak zijn van het richtingshooren; dit komt overeen met wat uit mijn waarnemingen kan worden afgeleid. Terwijl de andere theorieën zich geheel op fysisch standpunt plaatsen en van daaruit een „verklaring” trachten te geven, verplaatsen de beschouwingen van H a r t l e y en F r y de moeilijkheid bij een verklaring der verschijnselen geheel naar den psychischen kant: „oefening en gewoonte” bij waarneming, iets wat zoo maar niet aanvaardbaar lijkt.

Naar mijn meening is het beeld, dat wij ons van het richtingswaarnemen moeten maken, als volgt. De twee ooren, de ontvangers van ons gehoororgaan, werken noch zuiver als druk-, noch zuiver als energie-ontvangers; zij verwerken een grootheid, die niet-lineair met de drukamplitudo samenhangt. Deze grootheid, die, tengevolge van een onsymmetrischen stand van de geluidsbron ten opzichte van het hoofd, op elk oogenblik voor de beide ooren in grootte verschillen kan, wordt in het physiologische stelsel van ons gehoororgaan verwerkt, waarna de aan den linkerkant en aan den rechterkant ver-

1) H. H e c h t. Die Naturwissenschaften **10** (1922) 107.

2) P. D. Groot en J. L. v. Soest, l.c.

3) H a r t l e y, Phys. Rev. **13** (1919) 373; H a r t l e y and F r y, dito **18** (1921) 431; F r y, Phys. Ztschr. **23** (1922) 276.

werkte grootheden psychisch worden vergeleken. Tengevolge daarvan ontstaat een geluidsbeeld, dat voor den richtingsindruk bepalend is. Het lijkt zeer aannemelijk dat in het physiologische proces vermoedheidsverschijnselen een wellicht zeer belangrijke rol spelen.

Gaarne zou ik nog het volgende willen opmerken. In het platte vlak moet men volgens de fazetheorie in staat zijn de plaats van een geluidsbron in zooverre te bepalen dat men een hyperbool kan aangeven, waarop de bron zich moet bevinden. Op eenigen afstand der ooren, kan de hyperbool, die in de ooren de brandpunten heeft, door de twee asymptoten vervangen worden; het gehoororgaan is dus volgens de fazetheorie in staat *twee* mogelijke richtingen te bepalen, de eene evenveel in *voorwaartsche*, als de andere in *achterwaartsche richting*. Men heeft in de oorschelpen of in de schedelbeenderen wel de oorzaak gezocht, dat men, bij natuurlijke waarneming, vaak in staat is uit deze twee richtingen nog de juiste te kiezen. Echter kan men ook het volgende aanvoeren. Houdt men het hoofd zeer strak in één bepaalde richting, zoo gelukt het meestal niet om de keus: vooruit of achteruit te doen; maar heeft men het hoofd bewegelijk, zoo gelukt dit wel. Bij beweging van het hoofd blijft de eene asymptoot in dezelfde richting, terwijl de andere een waaier doorloopt; psychisch kiest men dan onmiddellijk de eerste, tevens juiste richting. Zelfs door een heel kleine draaiing van het hoofd kan men dit resultaat bereiken. Naar mijn meening is deze verklaring eenvoudiger én juistere dan die, waarbij oorschelpen of schedelbeenderen te pas moeten komen.

Hieraan sluit zich een opmerking van Prof. Dr. A. D. F o k k e r aan: „waarom kan men ook in de (3-dimensionale) ruimte acoustisch een richting bepalen?” Naar mijn meening kan deze vraag op de volgende wijze beantwoord worden. Ziju er bij het richtingshooren drie vrijheidsgraden, zoo moet men volgens de fazetheorie in staat zijn bij een geluidsbron de bijbehorende hyperboloïde, resp. asymptotenkegel, te bepalen. Door beweging van het hoofd verkrijgt men dan een bundel kegels, die één gemeenschappelijke richtlijn moeten bezitten, en deze richtlijn geeft ons de goede richting. Intusschen spreekt het van zelf dat het bepalen van zoo'n richting niet fouteloos geschiedt en dat de fout grooter wordt naarmate de kegel wijder is, zoodat het richtingsbepalen van hooggeplaatste geluidsbronnen veel moeilijker wordt dan van laaggeplaatste.

Zoo zal vermoedelijk ook een lichte hoofdbeweging ons veelal in staat stellen nog een richtingsbepaling te doen bij hooge tonen, waar de fazeverschiltheorie niet één, maar meer hyperbolen als mogelijke plaats der geluidsbron aangeeft.

Over deze drie, door lichte hoofdbewegingen te verklaren, effecten zullen nog nadere metingen worden verricht.

Het is mij een behoefte hier mijn hartelijken dank te betuigen aan Prof. Jhr. Dr. G. J. E l i a s voor zijn belangstelling in de bovenbeschreven proeven.

Den Haag, April 1929.