



University of Groningen

Absolute metingen der geluidsintensiteit ter bepaling van het minimum audibile

Huizing, Hendrik Cornelis

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1932

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Huizing, H. C. (1932). Absolute metingen der geluidsintensiteit ter bepaling van het minimum audibile. [S.l.]: [S.n.].

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

1930

**ABSOLUTE METINGEN
DER GELUIDSINTENSITEIT
TER BEPALING VAN HET
MINIMUM AUDIBILE**

H. C. HUIZING

ABSOLUTE METINGEN
DER GELUIDSINTENSITEIT
TER BEPALING VAN HET
MINIMUM AUDIBILE

STELLINGEN.

I.

De methode, waarmee PASCHEN en PIRANI het rendement van een telefoon bepalen, is onbetrouwbaar.

Verhandl. D. Phys. Ges. Bd. 21 1919 p. 57.

II.

De door HIDDEMA en PRINS gevolgde methode voor de bepaling van de wederkerige inductie is voor het beoogde doel minder juist.

Hiddema: Dissertatie Groningen 1928 p. 32.

III.

De door Mej. OVERHOFF vermelde onregelmatigheden in fotografische opnamen van bewegende striae bij electrodenlooze ontlading, vinden hun oorzaak in de elektrische eigenschappen van de gebruikte apparatuur.

Overhoff: Dissertatie Amsterdam 1932 p. 55.

IV.

De door SELL opgenomen membraanresonantiekrommen geven waarschijnlijk een onjuist beeld.

Sell: Wissensch. Veröff. Siemenskonz. Bd. II 1922 p. 351.

V.

De aanname van KRANZ e. a. dat de trilplaatamplitude van een telefoon, indien men deze aan het oor legt, vrijwel dezelfde blijft, is onjuist.

Kranz: Phys. Rev. Vol. 21 1923 p. 573.

II

VI.

In een ontvangtoestel voor draadlooze telegrafie kan de geluidssterkte vergroot worden door betere keuze van de constanten der telefoon en de daarop parallel geschakelde condensator.

VII.

De onderste toongrens van ons gehoor ligt waarschijnlijk hooger dan men pleegt aan te geven.

VIII.

De internationale vaststelling van een practische geluidsmaat is voor de ontwikkeling der acoustiek van veel belang.

IX.

Bij de eindexamens aan de hogere burgerscholen verdient het aanbeveling bij de beoordeeling voor het geheele land geldende normen vast te stellen.

ABSOLUTE METINGEN
DER GELUIDSINTENSITEIT
TER BEPALING VAN HET
MINIMUM AUDIBILE

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN
DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE
AAN DE RIJKSUNIVERSITEIT TE GRONINGEN
OP GEZAG VAN DEN RECTOR-MAGNIFICUS
MR. H. VAN GOUDOEVER, HOOGLEERAAR IN
DE FACULTEIT DER RECHTSGELEERDHEID,
IN HET OPENBAAR TE VERDEDIGEN OP
DINSDAG 29 NOVEMBER 1932,
DES NAMIDDAGS OM 4 UUR

DOOR

HENDRIK CORNELIS HUIZING
GEBOREN TE ELBURG

BIJ J. B. WOLTERS' UITGEVERS-MAATSCHAPPIJ N.V.
GRONINGEN — DEN HAAG — BATAVIA — 1932

BOEKDRUKKERIJ VAN J. B. WOLTERS

11-10-1911

AAN MIJN OUDERS
AAN MIJN VROUW

Bij het verschijnen van dit proefschrift maak ik gaarne gebruik van de gelegenheid om U, Oud-Hoogleraren en Hoogleraren in de Natuurphilosophische en Medische Faculteiten, mijn dank te betuigen voor het onderwijs en de leiding, die ik van U mocht ontvangen.

Bijzondere dank breng ik U, Hooggeleerde ZERNIKE, Hooggeachte Promotor, die het mogelijk hebt gemaakt, dat ik mijn verdere studie kon wijden aan dat deel der physica, dat mijn speciale belangstelling droeg. De groote welwillendheid, waarmee gij steeds Uw kostbare tijd beschikbaar stelde, eischt mijn groote erkentelijkheid.

Dank zij Uw ruime zin voor wetenschappelijke arbeid, Hooggeleerde BENJAMINS, kon ik dit onderzoek in Uw laboratorium volbrengen. Dat ik daarbij Uw dagelijksche belangstelling mocht ontvangen en dat gij mij aan Uw afdeeling hebt willen verbinden, is mij een groote steun geweest.

Hooggeleerde COSTER, de fundamenteen van dit proefschrift heb ik voor een belangrijk deel bij U mogen leeren. Daarvoor ben ik U mijn dank verschuldigd.

Zeer geachte Mejuffrouw BENJAMINS, Zeergeleerde HUIZINGA en mede-assistenten, ik dank U voor Uw vriendschappelijke omgang en de belangstelling, waarmee gij mijn werk hebt gevolgd.

Tenslotte wil ik U, zeer gewaardeerde VOLCKMAN, mijn erkentelijkheid betuigen. Uw technische vaardigheid had ik niet kunnen missen.

INHOUD.

	Blz.
INLEIDING	I
HOOFDSTUK I. ALGEMEENE BESCHOUWINGEN.	
§ 1. Problemen der moderne acoustiek	3
§ 2. Energetische beschouwing van het geluid	6
§ 3. Absolute meetmethoden ter bepaling van de geluidsintensiteit	II
HOOFDSTUK II. APPARATUUR EN MEETMETHODEN.	
§ 1. Geluidsbron	14
§ 2. IJking van de toongenerator	16
§ 3. Toongever en controle der toonzuiverheid	18
§ 4. Amplitudemeting van de telefoontrilplaat (A)	22
§ 5. Amplitudemeting: Condensatormethode (B)	24
§ 6. Theorie van methode B.	28
§ 7. IJking	32
§ 8. Vormfactor. Gemeten waarde	33
§ 9. Berekening vormfactor	35
§ 10. Vergelijking methode A en B	36
§ 11. Meettelefoons. Vertrek	38
HOOFDSTUK III. ABSOLUTE BEPALING VAN DE GELUIDS- INTENSITEIT.	
§ 1. Straler en opvanger. Verloop van de druk- amplitude	40
§ 2. Stralingskrommen	41
§ 3. Meting van de amplitudeverhouding van straler en opvanger	43
§ 4. Berekening van de amplitudeverhouding van straler en opvanger	46
§ 5. Absolute bepaling van de geluidsintensiteit	48
HOOFDSTUK IV. BEPALING VAN HET MINIMUM AUDIBILE.	
§ 1. Chronologisch overzicht	50
§ 2. Eigen metingen van het minimum audible	57
§ 3. Conclusie	59
SUMMARY	62

INLEIDING.

De keuze van het onderwerp van dit proefschrift vond zijn aanleiding in het feit, dat de uit de literatuur bekende metingen van de minimum geluidsintensiteit, welke, bij verschillende toonhoogten, voor het menschelijk oor waarneembaar is, aanmerkelijk uiteenloopen.

De kennis van dit minimum audibile heeft in de eerste plaats physiologische beteekenis, terwijl het verloop over verschillende toonhoogten meer in het bijzonder een klinische waarde heeft.

De absolute bepaling van deze drempelwaarde is een zuiver physisch probleem en komt neer op het meten van zwakke geluidsintensiteiten, daar de gevoeligheid van ons gehoororgaan zeer groot is. Dit is bijv. de reden, waarom verschillende onderzoekers over een groot gebied moeten extrapoleeren.

De vele nieuwe hulpmiddelen der laatste jaren hebben het probleem opnieuw naar voren gebracht. Zoo wordt in dit proefschrift een methode ontwikkeld, waarmee het mogelijk is zeer kleine geluidsintensiteiten tot een grootteorde van 10^{-10} ergs per cm^2 per sec te meten.

In hoofdstuk I wordt een algemeene beschouwing gegeven over de ontwikkeling der acoustiek, verschillende formuleringen voor de energetische waarde van het geluid aangegeven, alsmede de formule voor het stralingsvermogen van een trillende plaat afgeleid. De voornaamste methoden voor de absolute bepaling der geluidsintensiteit worden vermeld.

Hoofdstuk II omvat de beschrijving der gebruikte toestellen en de inrichting der meetapparatuur, alsook de wijze, waarop de ijking plaats vond.

In hoofdstuk III worden de metingen vermeld betreffende de afhankelijkheid der geluidsintensiteit van de afstand en de richting. Tevens wordt de juistheid der gebruikte formules experimenteel geverifieerd.

De beschreven meetmethode wordt in hoofdstuk IV toegepast voor het bepalen van het minimum audible. De vroegere onderzoekingen daarover worden aangehaald en de eigen voorloopige resultaten vermeld. Daar de beteekenis van deze metingen meer op physiologisch terrein ligt, wordt er hier niet nader op in gegaan. Een meer uitgebreide reeks metingen zal daarom nog verricht worden.

Alle onderzoekingen werden verricht in het Otologisch Laboratorium in het Academisch Ziekenhuis te Groningen.

HOOFDSTUK I.

ALGEMEENE BESCHOUWINGEN.

§ 1. *Problemen der moderne acoustiek.*

De leer van het geluid is het laatste decennium in een nieuwe phase getreden. Sedert het niveau, door RAYLEIGH, HELMHOLTZ e. a. in de tweede helft der vorige eeuw bereikt, was een stilstand gekomen in de ontwikkeling, totdat tijdens en na de oorlog nieuwe vraagstukken, deels direct, deels indirect verband houdende met de geluidslcer, om een oplossing vroegen. Zodoende werd dit deel der physica, dat door het belang der atoomtheorieën en nieuwere spectroscopische onderzoekingen vrijwel geheel verwaarloosd was, in een nieuw licht gesteld.

De geluidsoverbrengring onder water, richtings- en afstands-bepaling van geluidsbronnen, opname en weergave van geluidstrillingen, reflectie en absorptie in verband met de acoustiek van zalen, gehoorigheid van gebouwen e. d. zijn problemen van deze tijd, die in het kader van het klassieke, meer mathematische onderzoek niet passen. Immers, de uitvinding en volmaking van nieuwe hulpmiddelen, meest van electriche aard, hebben het experimenteel onderzoek in geheel nieuwe banen geleid, welke dikwijls een outillage vragen, waaraan alleen door een modern industriellaboratorium zal kunnen worden voldaan. Waar vroeger van een enkelvoudig trillingssysteem sprake was, ontmoet men thans stelsels van meer gecompliceerde structuur, van gemengde aard: mechanisch-electrisch-acoustisch. De *electro-acoustiek*

is een op zich zelf staand geheel geworden met karakteristieke werkmethoden, waarin de aanmerkelijk verbeterde microfoon, de luidspreker en de triode in al zijn schakeeringen steeds weer de hoofdelementen zijn.

Het maken van enkelvoudige tonen van constante intensiteit, doch willekeurig in te stellen hoogte, welke in meerdere onderzoekingen een uitgangspunt vormen, is langs electriche weg mogelijk gebleken. Hierdoor is de physiologische acoustiek, waaraan een deel der verdere beschouwingen gewijd zal worden, weer meer op de voorgrond getreden. Het klinisch onderzoek van patiënten, waarbij men tot nu toe op stemvorken, fluiten, en het monochord aangewezen was, heeft in de audiometer een nieuw hulpmiddel gevonden, dat in Amerika en Duitschland reeds veelvuldig wordt toegepast. Het aangeven van de doofheidsgraad op physische basis, het vaststellen van de resultaten eener therapie, het opsporen in de spraakzone van eilanden in de gehoorfunctie geschiedt met een continu-variabele audiometertoon gemakkelijker dan met eenige andere geluidsbron. De grootere toonzuiverheid, die langs electriche weg verkregen kan worden, speciaal voor de lage tonen, werpt de vraag op of nieuwe metingen der onderste gehoorrens geen hogere waarden zullen geven dan men tot nu toe pleegt te vermelden.

Andere vraagstukken van psychologische aard, zooals het werk van KNUDSEN, VON BEKESY e. a. hebben de aandacht getrokken. Noemen wij verder het uitgebreide werk van FLETCHER over de analyse der spraakklanken, over het maskeeren van verschillende tonen onderling e. d., de onderzoekingen van STEINBERG over de invloed van vervorming op spraakklanken, die van WEGEL, LANE, MACKENZIE e. a.

Niet minder dan de subjectieve is ook de objectieve geluidsleer voorwaarts geschreden. De plaats, welke de

draadlooze omroep heden ten dage heeft ingenomen, is niet dan na veel experimenteeren, ook op acoustisch gebied, bereikt; immers begin en einde van deze reeks van energietransformaties zijn geluidstrillingen. De bouw van dempingsvrije ruimten en van het volkomen „zwarte lichaam”, in acoustische zin, heeft beteekenis gekregen. Het door W. C. SABINE aangevangen werk over de nagalm van zalen is weder opgevat en voortgezet. Klankkaatsers, zooals aangegeven door onze landgenoot FOKKER, kunnen het bespreken van een grooter auditorium mogelijk maken, geluidsschaduwen opheffen of waar noodig teweegbrengen.

Bij de moderne huizenbouw besteedt men speciale aandacht aan het minder doordringen van het geluid. Absorptieconstanten van allerlei materialen worden meer en meer gevraagd. Langs electroacoustische weg heeft TRENDELENBURG met behulp van de condensatormicrofoon uitgebreide onderzoekingen over de harttonen van de mensch verricht.

Bij al deze soorten metingen is men meer en meer behoefte gaan voelen aan een geluidseenheid. De invoering van een internationale geluidsmaat is thans even gevraagd als destijds de „kaars” als eenheid van lichtsterkte. Men dient bij het geluid echter onderscheid te maken tusschen physische en physiologische intensiteiten. In 1917 heeft STEFANINI¹⁾ reeds een goed reproduceerbare geluidsmaat voorgesteld in de vorm van twee botsende kogeltjes. Hij noemde deze de „phonie”. FLETCHER²⁾ voerde in 1923 op grond van zijn onderzoekingen over de gevoeligheid van het oor een effectieve luchtdrukvariatie van 1 dyne/cm² als physische maat in, terwijl BARKHAUSEN³⁾ in 1925 de „wien” als eenheid voorstelde. Door toepassing van de wet van WEBER-FECHNER kan men dan, door gebruik te maken van een

¹⁾ STEFANINI: Fonometro a sfera urtantisi, R. Acc. Lucca 1919.

²⁾ FLETCHER: Bell Syst. Tech. J. Vol. 4 1923 en Journ. Franklin Inst. Vol. 196 1923.

³⁾ BARKHAUSEN: Zeitschr. f. Techn. Phys. Bd. 7 1926 p. 599.

logarithmische schaal, van physische op physiologische intensiteiten overgaan.

§ 2. *Energetische beschouwing van het geluid.*

Voor een vlakke geluidsgolf, welke zich in de x -richting beweegt en die afkomstig is van een geluidsbron, welke een enkelvoudige toon geeft, geldt voor de uitwijking ξ der luchtdeeltjes:

$$\xi = a \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \dots \dots \dots (1)$$

waarin c de voortplantingssnelheid, a de amplitude en $\omega = 2\pi n$, als n het trillingsgetal is.

Voor de snelheid der luchtdeeltjes vindt men dan:

$$\dot{\xi} = a\omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Verder volgt uit (1):

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{a\omega}{c} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Uit (2) en (3) volgt:

$$\dot{\xi} = -c \frac{\partial \xi}{\partial x} \dots \dots \dots (4)$$

Zij ρ de dichtheid der lucht bij een geluidsgolf, ρ_0 die van normale lucht, dan heeft men ingevoerd de condensatie s :

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\delta \rho}{\rho_0} \text{ of } \rho = \rho_0(1 + s) \dots \dots (5)$$

Eenzoo heeft men voor de relatieve volumenvariatie de dilatatie Δ :

$$\Delta = \frac{v - v_0}{v_0} = \frac{\delta v}{v_0} \text{ of } v = v_0(1 + \Delta) \dots \dots (6)$$

Daar $v \times \rho = 1$, volgt uit (5) en (6):

$$s = -\Delta \dots \dots \dots (7)$$

Beschouwt men nu een luchtlaag, begrensd door de

vlakken x en $x + \delta x$ loodrecht op de voortplantingsrichting, dan wordt deze lucht een oogenblik later begrensd door de vlakken $x + \xi$ en $x + \xi + \delta x + \delta \xi$. De dikte dezer laag is nu dus:

$$\delta x + \delta \xi = \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \delta x.$$

Het volumen is dus gewijzigd met een factor: $1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}$.

In verband met (6) en (7) volgt hieruit dus:

$$\Delta = \frac{\partial \xi}{\partial x} \text{ en } s = -\frac{\partial \xi}{\partial x} \dots \dots \dots (8)$$

Combinatie van (4) met (8) geeft nu:

$$\dot{\xi} = cs \dots \dots \dots (9)$$

Voor de maximum-waarde der condensatie vindt men dus:

$$\omega \cdot a = cs_{max} \quad s_{max} = \frac{\omega a}{c} \dots \dots \dots (10)$$

Om het verband tusschen druk en volumen te kennen, mogen we aannemen, dat bij deze zeer snelle drukwijzigingen geen warmteuitwisseling zal plaats vinden, zoodat we een adiabatische toestandsverandering hebben. Volgens POISSON geldt dan:

$$pv^\kappa = \text{const.}$$

of indien we de variatie in de luchtdruk door p voorstellen:

$$\frac{p_0 + p}{p_0} = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^\kappa$$

of na invoering van (5):

$$\frac{p_0 + p}{p_0} = (1 + s)^\kappa, \quad p = p_0 \kappa s \dots \dots \dots (11)$$

en met (9):

$$p = \frac{p_0 \kappa}{c} \dot{\xi} \dots \dots \dots (11')$$

De energie A , welke bij een geluidsgolf per seconde door

1 cm² loodrecht op de voortplantingsrichting gaat, kan men bijv. aangeven door de gemiddelde waarde van het product van druk en snelheid:

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T p \dot{\xi} dt \dots \dots \dots (12)$$

Voert men (11') in, dan komt:

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T p \dot{\xi} dt = \frac{p_0 \kappa}{cT} \int_0^T \dot{\xi}^2 dt$$

of

$$A = \frac{p_0 \kappa \omega^2 a^2}{cT} \int_0^T \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) dt.$$

Daar de waarde van de integraal $\frac{1}{2} T$ is, vinden we als eindresultaat:

$$A = \frac{p_0 \kappa}{2c} \omega^2 a^2 \dots \dots \dots (13)$$

Vullen wij in (13) de waarde van s_{max} volgens (10) in, dan vinden we:

$$A = \frac{1}{2} p_0 \kappa c s_{max}^2 \dots \dots \dots (13')$$

Vullen we in (13') de waarde van s volgens (11) in, dan ontstaat:

$$A = \frac{1}{2} \frac{c}{p_0 \kappa} p_{max}^2 = \frac{c}{p_0 \kappa} p_{eff}^2 \dots \dots \dots (13'')$$

Volgens (11) is: $p_0 \kappa = \frac{P}{s}$ terwijl, zooals bekend, voor de voortplantingssnelheid c geldt: $c = \sqrt{\frac{P}{\delta \varrho}}$ zoodat we voor $\frac{P}{s}$ kunnen zetten: $c^2 \varrho_0$. Voegen we dit in (13''), dan komt ook, als $p_{max} = P$

$$A = \frac{P^2}{2 c \varrho_0} \dots \dots \dots (13''')$$

De formules (13), (13'), (13'') en (13''') geven ons de waarde voor de energiestroom resp. uitgedrukt in de

amplitude, de maximum-condensatie en de effectieve en maximum drukwaarde.

Substitueeren we nu de constanten voor lucht in C.G.S.-eenheden bij kamertemperatuur: $\kappa = 1,4$; $p_0 = 76 \times 13,6 \times 981$; $c = 3,40 \times 10^4$ en $\omega^2 = (2\pi n)^2$, dan komt:

$$A = 824 n^2 a^2 \dots \dots \dots (14)$$

$$A = 2,4 \times 10^{10} s_{max}^2 \dots \dots \dots (14')$$

$$A = 0,024 p_{eff}^2 \dots \dots \dots (14'')$$

Verder volgt uit (14) en (14'') nog:

$$p_{eff} = 185 na \dots \dots \dots (15)$$

terwijl door substitutie in (11) van de getalwaarden voor p_0 en κ komt:

$$p_{eff} = 1,01 \times 10^8 s_{max} \dots \dots \dots (16)$$

Betreft het een bolvormige golf bijv. zooals afkomstig van een straler van de nulde orde, dan hebben we te doen met de algemeene vorm van de golfvergelijking:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \Delta \varphi.$$

Voor de snelheidspotential φ op afstand R van de straler geldt dan bij een harmonische beweging:

$$\varphi = \frac{C}{4\pi R} e^{ik(ct - R)}$$

waarin $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ en $C = \omega V$ als V de volumenamplitude, d. i. de maximum waarde van de volumenverandering van de ademende bol, is. Hieruit volgt voor de snelheid v der trillende luchtdeeltjes en voor de druk p resp.:

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial R} = - \left(\frac{1}{R} + ik \right) \frac{\omega V}{4\pi R} e^{ik(ct - R)} \dots \dots (17)$$

$$p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\rho \frac{ikc \omega V}{4\pi R} e^{ik(ct - R)} = -\rho \frac{i \omega^2 V}{4\pi R} e^{ik(ct - R)}$$

Hieruit volgt voor de drukamplitude P:

$$P = \frac{\rho \omega^2 V}{4\pi R} \dots \dots \dots (18)$$

Uit deze formules volgt, dat de snelheid op groote afstand met $\frac{1}{R}$ afneemt, echter met $\frac{1}{R^2}$ in de onmiddellijke nabijheid. Voor de druk is dit echter niet het geval, deze neemt ook in de nabijheid van de straler met $\frac{1}{R}$ af. Dit resultaat wordt ook in hoofdstuk III experimenteel gevonden.

Nemen we nu als voorbeeld van een straler van de nulde orde de trilplaat van een gewone telefoon, dan geldt dus voor de drukamplitude op afstand R formule (18). Substitueeren we deze waarde in formule (14''), dan vinden we voor de energiestroom A op afstand R:

$$A = 0,012 \frac{\rho^2 \omega^4 V^2}{16 \pi^2 R^2}$$

Voor de totale per sec. door de straler afgegeven energie E vinden we dan:

$$E = 0,012 \frac{\rho^2 \omega^4 V^2}{4\pi} \dots \dots \dots (19)$$

Hebben we nu een cirkelvormige plaat met straal r , dan kunnen we de volumenverplaatsing $V = \gamma \pi r^2 \xi$ stellen, als ξ de uitwijking in het centrum is en γ een factor, welke van de trillingsvorm afhangt. Dan komt:

$$E = 0,012 \gamma^2 \frac{\pi^3 \rho^2 c^2 r^4}{\lambda^2} \xi^2 \dots \dots \dots (19')$$

Tot hetzelfde resultaat kan men komen door uit te gaan van de door RAYLEIGH⁴⁾ gegeven formules voor een in een onbegrensde vlakke wand trillend zuigertje, zooals nader door HAHNEMANN en HECHT^{4')} voor platen van verschillende trillingsvorm geschied is. Ook WIEN^{4')} komt langs andere weg tot hetzelfde resultaat.

§ 3. *Absolute meetmethoden ter bepaling van de geluidsintensiteit.*

Een der oudste methoden voor de bepaling van de geluidsintensiteit is die met behulp van het spiegeltje van RAYLEIGH. Indien men een licht schijfje in een geluidsveld hangt, tracht dit zich met zijn vlak loodrecht op de stroomrichting te plaatsen. Het op het schijfje werkende koppel is evenredig met de tweede macht van de snelheidsamplitude der trillende luchtdeeltjes en is nader berekend door KÖNIG⁵⁾. Indien men dan de richtkracht van het ophangstelsel kent, is het mogelijk uit de optredende draaiingshoek de geluidsintensiteit te vinden. Dit instrument is door verschillende onderzoekers gebruikt o. a. door MEYER⁶⁾ voor het onder-

4) In RAYLEIGH's Theory of Sound II § 302 wordt voor de stralingsweerstand W van een cirkelvormig zuigertje met straal r , dat in een onbegrensde vlakke wand trilt gevonden:

$$W = \frac{\pi c \rho k^2 r^4}{2} = \frac{2 \pi^3 c \rho r^4}{\lambda^2}.$$

Geldt het de straling over de geheele ruimte, dus zonder vlakke wand, dan wordt:

$$W = \frac{\pi^3 c \rho r^4}{\lambda^2}.$$

Voor de per sec. aan de lucht afgegeven arbeid kan men schrijven:

$$E = \frac{1}{2} W \zeta^2 = \frac{\pi^3 c \rho r^4}{2 \lambda^2} \zeta^2.$$

Na invoering van de volumeverplaatsing V komen we dan tot hetzelfde resultaat.

4') Zie ook HAHNEMANN en HECHT; Phys. Zeitschr. Bd. 18 1917 p. 261 en WIEN; Pflüger's Arch. Bd. 97 1903 p. 1. In dezelfde vorm omgerekend wordt de getallenfactor 1,4 bij HAHNEMANN en HECHT, 1,35 bij WIEN en in ons geval 1,46.

5) KÖNIG; Wied. Ann. Bd. 43 1891 p. 43.

6) MEYER; El. Nachr. Techn. Bd. 3 1926 p. 290.

zoek van luidsprekers en door MALLETT en DUTTON ⁷⁾ voor de bepaling van het door een telefoon uitgestraalde geluid, terwijl BARNES en WEST ⁸⁾ in 1927 nog nader de werkingswijze hebben onderzocht. In vele gevallen is de gevoeligheid van het systeem echter te klein, terwijl bij het gebruik van een resonator metingen bij verschillende frequenties niet meer vergelijkbaar zijn.

Een andere methode, waarmee de drukamplitude bepaald wordt, is aangegeven door WIEN ⁹⁾. Een bolvormige resonator is afgesloten door een membraan, waarvan nu de amplitude gemeten wordt. De ijking is mogelijk door middel van een statische druk. Andere methoden waarbij de druk gemeten wordt, zijn aangegeven door DVORAK, BARUS e. a. ¹⁰⁾.

In 1923 heeft GERLACH ¹¹⁾ een nulmethode aangegeven, waarbij de druk, welke op een membraan wordt uitgeoefend door het te meten geluid, gecompenseerd wordt door meetbare electro-dynamische krachten, zoodanig dat de membraan in rust blijft. De aan te brengen compensatiekracht is een maat voor de geluidsintensiteit. Een andere compensatiemethode is die van KARCHER ¹²⁾.

Tenslotte wordt veel gebruik gemaakt van de door WENTE ¹³⁾ ontwikkelde condensatormicrofoon, welke de eigenschap heeft dat de frequentiekaracteristiek over een groot gebied recht is. De ijking van dit instrument kan bijv. plaats vinden met een thermofoon.

In de boven beschreven methoden wordt steeds een opvanger in het geluidsveld, waarvan men de intensiteit wil meten, gebracht. Een geheel andere weg is deze, dat men

⁷⁾ MALLETT en DUTTON: J. Inst. El. Eng. Vol. 63 1925 p. 502.

⁸⁾ BARNES en WEST: J. Inst. El. Eng. Vol. 65 1927 p. 871.

⁹⁾ WIEN: Wied. Ann. Bd. 36 1889 p. 834.

¹⁰⁾ Cf. Handb. d. Physik Bd. 8.

¹¹⁾ GERLACH: Wiss. Veröff. Siemens. Konz. Bd. 3 1923 p. 139.

¹²⁾ KARCHER: Sci. Pap. Bur. Stand. No. 473 1923.

¹³⁾ WENTE: Phys. Rev. Vol. 10 1917 p. 39 en Vol. 19 1922 p. 496.

de geluidsbron als uitgangspunt neemt, d. w. z. dat de uitgestraalde geluidsenergie gemeten wordt, terwijl men nagaat op welke wijze deze energie zich in de ruimte verdeelt.

Zoo hebben HAHNEMANN en HECHT ¹⁴⁾ het Wattverbruik van een gewone telefoon bepaald, indien deze geluid geeft en evenzoo, indien deze geen geluid geeft. Het verschil in het opgenomen aantal watts bepaalt de afgegeven geluidsenergie.

Evenzoo is de thermofoon een instrument, waarvan de uitgestraalde energie voor allerlei frequenties berekend kan worden met behulp van de door WENTE ¹⁵⁾ afgeleide formule.

In de volgende hoofdstukken wordt nu een methode beschreven, waarbij de door een telefoon uitgestraalde energie gevonden wordt door zijn trilplaatamplitude te meten en deze waarde te substitueeren in de in § 2 van dit hoofdstuk aangegeven formule (19). De wijze waarop deze straling zich in de ruimte verdeelt wordt experimenteel nagegaan. De drukamplitude op bepaalde afstand van de straler wordt daardoor gevonden. Dezelfde telefoon kan nu echter ook als ontvanger gebruikt worden, doordat er een condensatormicrofoon in aangebracht is. Deze reciprociteit maakt het mogelijk het geluid wederom ten deele op te vangen en nu de trilplaatamplitude van de ontvanger te meten. Hierdoor is het mogelijk de gebruikte formules experimenteel te verifiëren, hetgeen in hoofdstuk III geschied is.

¹⁴⁾ HAHNEMANN en HECHT: Ann. d. Phys. 4^e F. Bd. 60 1919 p. 454.

¹⁵⁾ WENTE: Phys. Rev. Vol. 19 1922 p. 336.

HOOFDSTUK II.

APPARATUUR EN MEETMETHODEN.

§ 1. *Geluidsbron.*

Voor onderzoekingen op acoustisch gebied is het van veel belang de beschikking te hebben over een geluidsbron, die constante en enkelvoudige tonen van willekeurig in te stellen hoogte kan voortbrengen. Dit constant zijn moet dan nog tweeledig worden opgevat, nl. constant van toonsterkte en constant van toonhoogte.

Onderwerpen wij nu verschillende geluidsbronnen aan deze eischen, dan blijkt hieraan dikwijls in meerdere of mindere mate niet te zijn voldaan. Orgelpijpen en fluiten bijv. geven betrekkelijk sterke boventonen. Stemvorken voldoen beter aan toonzuiverheid, echter vormt hier de afnemende amplitude, ook al geschiedt dit volgens een bekende wetmatigheid, een groot ongemak. Bovendien moet hier aandacht worden geschonken aan de mate en wijze van aanslaan en aan de klemming.

Een systeem van geheel andere aard wordt gevormd door een wisselstroombron, welke wordt aangesloten op een telefoon. Hier dient als eisch gesteld te worden, dat de stroombron sinusvormige spanningen levert, terwijl de weergever lineair moet werken. Deze methode werd reeds in 1903 door WIEN¹⁶⁾ toegepast. Als stroombron werd dan

¹⁶⁾ MAX WIEN: Archiv für die gesamte Physiologie Bd. 97 1903 p. I. Cf. Hoofdstuk IV.

gebruikt een wisselstroomdynamo met een groot aantal polen, waarbij de opgewekte frequentie door het toerental kon worden geregeld. In latere tijd diende hiervoor ook de VREELAND¹⁷⁾ oscillator.

Door de ontwikkeling der radiotechniek is deze elektrische methode thans meer naar voren getreden, daar wij in de vorm van de „toongenerator” een instrument hebben, dat in verbinding met een telefoon of soortgelijke weergever, belangrijke voordeelen biedt. De moeilijkheden, welke zich bij de constructie van een dergelijke sinusvormige wisselstroombron aanvankelijk voordeden, zijn thans langs verschillende wegen opgelost. In de literatuur treft men o. a. verhandelingen aan van GROENEVELD¹⁸⁾, GABRIEL¹⁹⁾, HUND²⁰⁾, SELL²¹⁾ en HUYDTS.

Door sommige fabrieken wordt een dergelijk apparaat, speciaal voor physiologisch onderzoek, in de vorm van de z.g. audiometer in de handel gebracht.²²⁾

In de te beschrijven meetmethode is gebruik gemaakt van de Philips-interferentietoongenerator, zooals deze ontworpen is door GROENEVELD¹⁸⁾. Als uitgangspunt dienen hier twee trillingsketens, welke door middel van teruggekoppelde trioden tot oscilleeren gebracht worden. De opgewekte trillingen worden daarna in een volgende elektrische kring tot interferentie gebracht. Na detectie, versterking en uitzeven der hoogfrequenttrillingen levert de outputzijde een wisselspanning, welke, ook voor de lage tonen, een goede sinusvorm vertoont. Dit geldt voor trillingen van

¹⁷⁾ VREELAND: Phys. Rev. Vol. 27 1908 p. 186.

¹⁸⁾ GROENEVELD: Physica 8e Jaarg. 1928 p. 157.

¹⁹⁾ GABRIEL: E. N. T. Bd. 4 1927 p. 509.

²⁰⁾ HUND: Scient. Pap. Bur. Stand. Vol. 22 1928 p. 631; Bur. Stand. Journ. Res. Vol. 2 1929 p. 355.

²¹⁾ SELL: Wissensch. Veröff. Siemens. Bd. 2 1922 p. 342.

²²⁾ FLETCHER: Western Electric Co Reprint B — 79 — I — Juli 1924.

ongeveer 25 tot 25000 per sec. Door middel van een fijnregelcondensator, die de capaciteit van één der oscillerende trillingsketens wijzigt, is deze toonfrequentie continu regelbaar. Door een bijzondere plaatvorm van deze condensator is een logaritmische frequentieschaal verkregen, zoodat draaien over een hoek van 16 graden steeds met een octaaf overeenstemt. De opgewekte wisselspanning blijft hierbij constant. Deze kan echter geregeld worden door middel van een potentiometer, terwijl de ingestelde spanning dan afgelezen kan worden op een triodevoltmeter.

Opgemerkt dient te worden, dat de aldus verkregen spanningen niet absoluut sinusvormig zijn. Een gering percentage boventonen blijft steeds aanwezig. In § 3 wordt de invloed daarvan, in verband met de weergever, nader beschouwd. Hierbij zij nog vermeld, dat voor de gloei-spanning der trioden, alsook voor hun anodespanning, accumulatoren werden gebruikt. Voltmeters hiervoor en smeltzekeringen waren in de schakeling opgenomen.

In den beginne deden zich met deze generator een tweetal onregelmatigheden voor, welke hun oorzaak vonden in de zeer sterke gloeistroom der oscillerende triodesystemen. Om deze reden werd het systeem eenigszins omgebouwd, terwijl tevens miniwattlampen werden ingevoerd.²³⁾ In deze vorm traden geen afwijkingen meer op en werkte het apparaat zeer stabiel.

§ 2. *Ijking van de toongenerator.*

Voor de ijking van de toongenerator werd de zwevingsmethode gebruikt. Als frequentienormaal diende hiervoor de stemvorkenreeks van VON BEZOLD. De toongenerator werd aangesloten op een telefoon en diens toonhoogte zoo geregeld, ten opzichte van die der stemvork, dat zwevingen

²³⁾ Dr. B. VAN DER POL breng ik dank voor zijn medewerking in dezen.

optraden. Ter controle werd tevens nog gebruik gemaakt van de frequentie 50 van het stadsnet en enkele boventonen hiervan. Daar de hoogste stemvork der VON BEZOLD-serie 1024 trillingen per seconde geeft, moest voor de ijking der hoogere tonen een andere weg worden ingeslagen, daar ook geen andere normaal ter beschikking stond. De gevolgde methode was nu dat één enkele genereerende triode gebruikt werd, waarvan de trillingsketen een zeer groote CL-waarde bezat, zoodat de opgewekte wisselstroom laagfrequent was en dus hoorbaar bij aansluiting op een telefoon. De toonhoogte van dit geluid werd nu ingesteld op 1024 met behulp der hoogste stemvork. Zooals bekend is het geluid van een dergelijk genereerend systeem zeer onzuiver, als men geen zeefkringen gebruikt en niet speciale voorzorgsmaatregelen neemt. Behalve toon 1024 werd aldus een aantal harmonischen (2048, 3072 enz.) in meer of minder sterke mate weergegeven. Door nu het geluid der zuivere toongenerator continu in hoogte te doen toenemen, was het mogelijk met een heele serie boventonen zwevingen waar te nemen. Dit gelukte tot en met 12288 trillingen per seconde (2048, 3072, 4096, 5120, 6144, 7168, 8192, 9216, 10240, 11264, 12288). De standen waarbij deze zwevingen telkens optraden werden genoteerd en alle waarnemingen graphisch uitgezet. Hierbij werd gebruik gemaakt van logaritmisch papier voor het uitzetten der frequentie. De ijkkromme is in fig. 1 weergegeven en toont een slechts weinig gekromd verloop.

Van de triodevoltmeter, waarmee de spanning gemeten werd, was de schaal geijkt in volts. De grootste aanwijzing bedroeg 6 volt.

Zoowel spanning als frequentie waren goed constant. Wat de frequentie betreft, dient vermeld, dat het eerste moment na het in werking stellen ten gevolge van temperatuureffecten een gering verloop optrad. Het verschijnsel was zwakker nadat de in § 1 vermelde wijziging had plaats

gevonden. Dit frequentieverloop kon eenvoudig met een stemvork geconstateerd worden, doch bovendien met de bij het toestel behorende triodevoltmeter. In deze was daartoe een verlagings-transformator aangebracht, waarop de 50-perioden wisselspanning van het stadsnet kon worden aangesloten. Indien nu ook de generatorfrequentie op ongeveer 50 werd ingesteld, wees de voltmeter zwevingen aan. Met

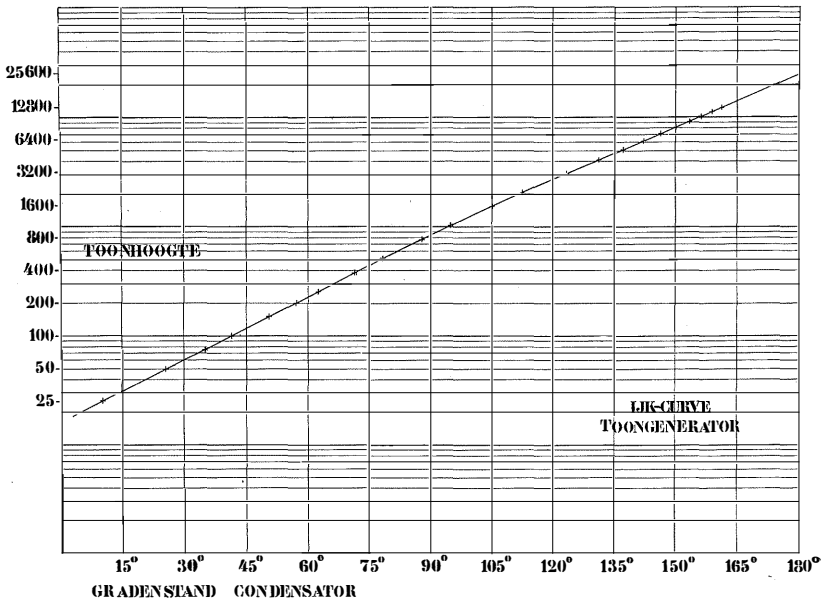


Fig. 1.

een extra fijnregelcondensator was het aldus mogelijk een vast punt van de schaal (nl. 25°) steeds te doen corresponderen met een trilling van 50 perioden per sec.

§ 3. Toongever en controle der toonzuiverheid.

Het geluid werd verkregen door de toongenerator aan te sluiten op een gewone telefoon met electromagnetisch systeem.

De toonzuiverheid vormt bij geluidsproeven, doch in

het bijzonder bij physiologisch-acoustisch werk, een belangrijk punt.

Uit de in hoofdstuk I vermelde formule (19) voor een trillende plaat blijkt, dat het uitgestraalde vermogen evenredig is met de vierde macht der frequentie. Hieruit volgt dus dat, indien de trillingsvorm niet enkelvoudig is, de aanwezige boventonen naar voren gehaald worden.

Dit bevoordeelen van boventonen kan ook optreden door resonantieeffecten van de telefoontrilplaat. De resonantie-kromme van een gewone telefoontrilplaat vertoont een vrij sterke piek. In een bepaald geval bijv. bleek het resonantie-punt bij 1020 trillingen per sec. te liggen, terwijl bij frequentie 510 de amplitude ongeveer tienmaal zoo klein was. Indien nu een wisselstroom van frequentie 510 door de telefoon-windingen gaat, waarin zwakke boventonen, onder welke de eerste boventoon, dan zal ook toonhoogte 1020 op de voorgrond treden.

Bedenken we nu nog dat ons oor gevoeliger is voor een toonhoogte 1020 dan voor 510 trillingen per sec. dan volgt daaruit dat in physiologische waarnemingen gemakkelijk fouten kunnen optreden door boventonen.

Tenslotte mogen ook de telefoonstroommen niet te sterk zijn, d. w. z. de variatie van de magnetische vloed moet relatief klein blijven en evenzoo de uitwijking klein ten opzichte van de luchtspleet. Is dit niet het geval, dan is aan de lineariteit niet meer voldaan en wordt ook het octaaf weergegeven.

Om deze redenen werd aan de toonzuiverheid bijzondere aandacht besteed. In het centrum van de telefoontrilplaat werd een klein stukje kurk bevestigd, waarop naar voren toe een stukje aluminiumfolie uitsteekt. Dit folie is van te voren, voor de stevigheid, op dun mica geplakt en komt door de opening in de telefoonschelp naar buiten. De bewegingen van het trilplaatmidden worden nu door dit folie meegemaakt.

Laat men nu door het mica heen licht vallen op het folie, dan treedt dit anderzijds alleen uit door de uiterst kleine gaatjes. Valt nu dit licht op een bewegende fotografische plaat, dan wordt de trillingsvorm der telefoontrilplaat vastgelegd. In fig. 2 zijn eenige curven weergegeven. Zij zijn opgenomen met een vallende fotografische plaat, waarvan

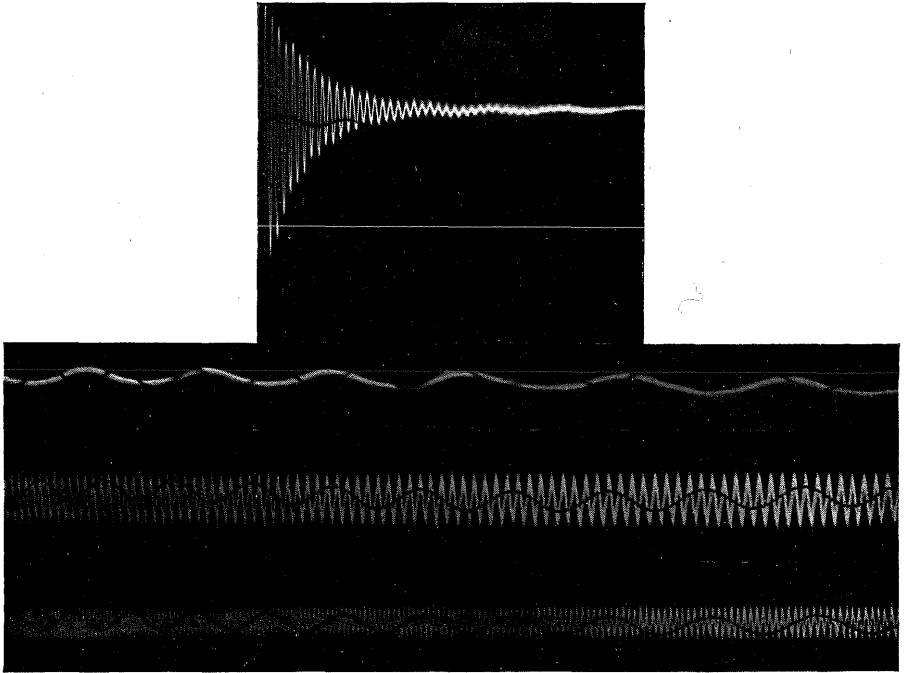


Fig. 2.

dus de beweging eenparig versneld was, zodat de trillingen steeds verder uiteenloopen. De lichtbundel werd onderschept door een uitstekend sprietje van een trillende stemvork (100 perioden per sec.), hetgeen als een schaduwlijntje door de curven loopt en als tijdnormaal dient.²⁴⁾

De bovenste curve geeft een vrije trilplaattrilling weer,

²⁴⁾ HUIZING: Arch. Néerl. de Phon. Exp. Tome V 1930 p. 129.

verkregen door een gelijkstroom door de telefoonwindingen plotseling te verbreken. De andere opnamen zijn van gedwongen trillingen tengevolge van een wisselstroom, afkomstig van de toongenerator (frequenties resp. 800, 65, 844 en 1690).

Voor het controleeren van een groot frequentiegebied is deze fotografische methode tijdroovend. Alsdan blijkt het praktischer het uittredende licht in een microscoop op te vangen en de bewegingsvorm nader te bestudeeren aan de hand van de lichtverdeeling. Het bleek nu dat steeds de voor een sinusvormige beweging karakteristieke lichtverdeeling optrad, behalve in een smalle frequentieband, waarvan het midden ongeveer overeenkwam met de helft van de grondtoon der trilplaat. Deze band strekte zich bijv. uit van frequentie 380 tot 480 bij een grondtoon van 880 trillingen per sec. In dit gebied werden dus geen zuivere tonen verkregen. Hier zou men dan een andere telefoon kunnen nemen met een iets verschoven grondtoon. Wenscht men echter aan dezelfde telefoon vast te houden, dan was genoemde frequentieband aanmerkelijk te versmallen door op de telefoonwindingen een kring aan te brengen bestaande uit een groote zelfinductie en groote capaciteit in serie.

Kiest men nu de waarde $\frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$ ongeveer gelijk aan de grondfrequentie der trilplaat en de demping voldoende klein, dan biedt men stroomtrillingen van die frequentie een gemakkelijke weg en de niet gewenschte boventoon wordt uitgezeefd. Aldus wordt het niet bruikbare gebied zeer klein.

Andere methoden om de trillingen van een telefoon-trilplaat te registreeren, vindt men in de literatuur van HARTMANN en KEMPF²⁵⁾ en van SIEGBAHN²⁶⁾.

²⁵⁾ HARTMANN und KEMPF: Ann. d. Ph. Bd. 8 1902 p. 482.

²⁶⁾ SIEGBAHN: Ann. d. Ph. Bd. 42 1913 p. 689.

§ 4. Amplitudemeting der telefoontrilplaat.

Bij de in het verdere gedeelte beschreven metingen wordt geregeld gebruik gemaakt van de amplitude der trilplaat. Het meten dezer amplitude vond met twee verschillende methoden plaats.

Optische methode (A). De in § 3 beschreven methode met behulp van het microscoop is door STRUYCKEN aangegeven

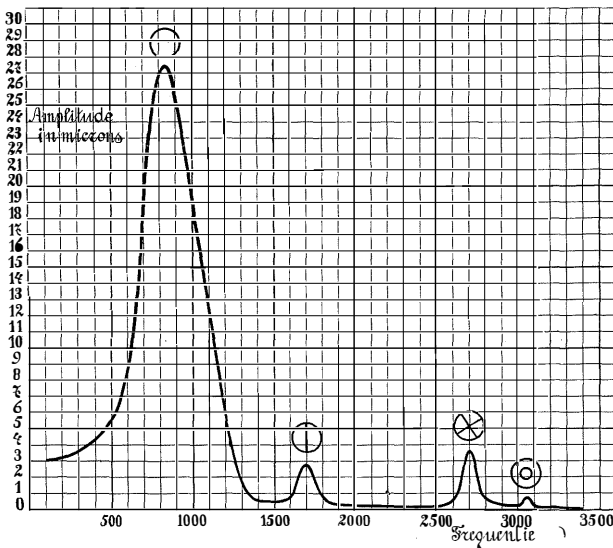


Fig. 3.

voor het zichtbaar maken van stemvorktrillingen. Zij leent zich ook uitstekend voor het meten van de amplitude eener telefoontrilplaat. ²⁴⁾ De afstand, waarover een lichtend puntje van het folie zich verbreedt, komt overeen met het dubbele der amplitude. Door met behulp van objectief- en oculair-micrometer de vergrooting te bepalen, is het mogelijk de amplitude in absolute maat te vinden. Uitwijkingen van de grootte-orde van 1μ kan men aldus nog eenvoudig meten. Het gebruik van zeer dun goudblad bleek voor de

sterkere vergrootingen practisch daar het een geringe verlichting van het gezichtsveld meebrengt, hetgeen voor het aflezen gewenscht is. De methode is bruikbaar voor allerlei frequenties. Echter kan men slechts de uitwijking van één bepaald punt der trilplaat meten. Fig. 3 geeft een voorbeeld

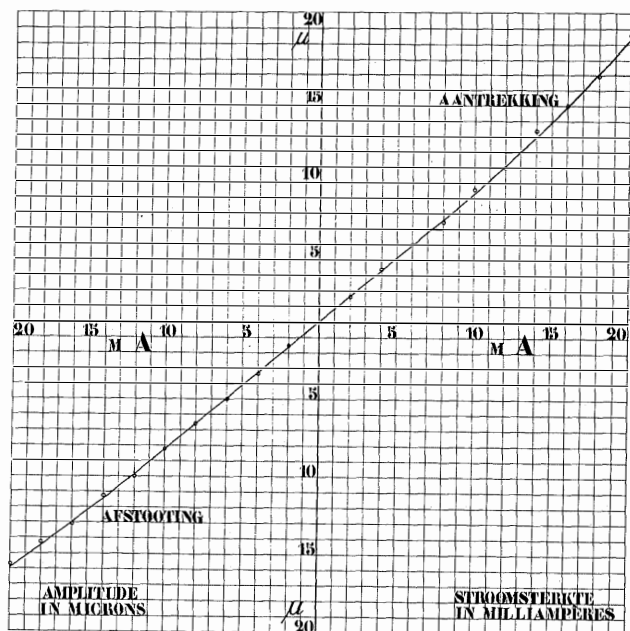


Fig. 4.

van een aldus verkregen resonantiekromme, waarbij het folie boven één der polen was bevestigd. Bij bevestiging in het centrum zouden nl. de beide eerste boventonen niet te voorschijn zijn gekomen, daar de knooplijnen juist door het centrum gaan. De curve geldt voor een stroomsterkte van 2,5 mA. Opgemerkt zij nog, dat de wijze van bevestiging van het folie even aandacht verdient, daar de mogelijkheid bestaat, dat het bij lage tonen mee gaat vibreeren. Men bemerkt dit door het optreden van Lissajous figuren.

Andere methoden voor het meten van trilplaatamplituden zijn beschreven door FRÖHLICH²⁷⁾, WIEN²⁸⁾, CROSS en HAYES²⁹⁾, RAYLEIGH³⁰⁾, SHAW³¹⁾, LICHTÉ³²⁾, KENNELLY³³⁾ 34), COHEN, ALDRIDGE en WEST³⁵⁾ en ANDREJEW³⁶⁾.

Met dezelfde methode werd nagegaan op welke wijze bij de gebruikte telefoons de uitwijking der trilplaat afhangt van de stroomsterkte. Uit fig. 4 blijkt dat tusschen uitwijking en stroomsterkte een lineaire samenhang bestaat, mits niet met te groote stroomsterkte wordt gewerkt.

§ 5. Amplitudemeting.

Condensator-methode (B). Een geheel andere methode, waarmee veel kleinere amplituden te meten zijn, terwijl de telefoon tevens aan het oor gedrukt kan worden, hetgeen voor physiologisch onderzoek van belang is, is de volgende.

In een gewone telefoon wordt behalve de trilplaat ($\pm 0,2$ mm dik) een stevige ronde koperen plaat van 2 mm dikte aangebracht. Deze plaat is geheel geperforeerd als een filter. Tusschen deze platen, welke elkaar precies bedekken, is voor isolatie een dunne micaring (0,18 mm dik) aan de rand aangebracht. Dit samenstel wordt met de gewone telefoonschelp afgesloten en voor stevige klemming met 5 schroeven vastgezet. Dit geheel wordt dan op de telefoondoos geschroefd. Men ziet dus van buiten af niet meer de trilplaat, maar de koperen plaat. Aan de trilplaat en evenzoo aan de filter zijn verbindingsdraden aangebracht. Het geheel

²⁷⁾ FRÖHLICH: Electr. Zeit. Bd. 10 1889 p. 65.

²⁸⁾ WIEN: Ann. d. Ph. Bd. 36 1889 p. 834.

²⁹⁾ CROSS en HAYES: Proc. Am. Ac. Arts and Sc. Vol. 25 1890 p. 233.

³⁰⁾ RAYLEIGH: Phil. Mag. Vol. 37 1894.

³¹⁾ SHAW: Proc. Royal Soc. London A. Vol. 76 1905.

³²⁾ LICHTÉ: Ann. d. Ph. Bd. 42 1913 p. 843.

³³⁾ KENNELLY en TAYLOR: Proc. Am. Phil. Soc. Vol. 54 1915 p. 96.

³⁴⁾ KENNELLY: Electrical Vibration Instruments — Mac. Millan, New York 1923.

³⁵⁾ COHEN, ALDRIDGE en WEST: Journ. Inst. El. Eng. Vol. 64 1926 p. 1023.

³⁶⁾ ANDREJEW: E. N. T. Bd. 8 1929 p. 488.

bestaat dus in de eerste plaats uit de gewone electromagnetische telefoon, terwijl bovendien de trilplaat met de vaste plaat een klein condensatortje vormt. Komt de trilplaat in trilling, dan verandert de capaciteit daarvan periodiek. Het betreft hier dus de combinatie van een gewone telefoon en een condensatormicrofoon. Doordat de vaste plaat van een zeer groot aantal perforaties is voorzien, ondervindt de lucht weinig weerstand bij het doorstromen.

Deze capaciteit C_0 is in de volgende meetschakeling ³⁷⁾ opgenomen (fig. 5). Tezamen met een spoeltje wordt een

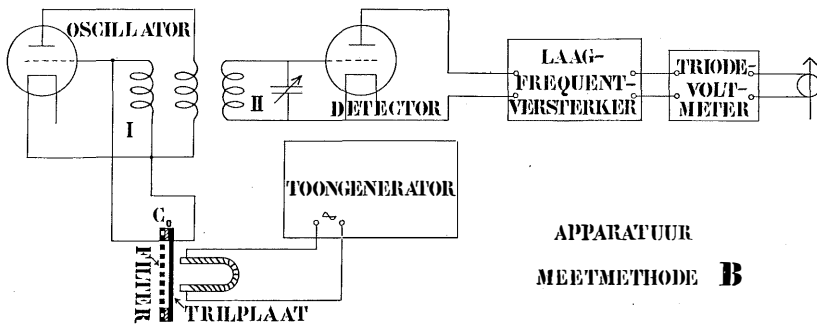


Fig. 5.

trillingsketen gevormd, welke door middel van een triode met terugkoppelspoel aan het genereeren wordt gebracht. Zooals bekend, wordt de frequentie der opgewekte wisselstroom in hoofdzaak bepaald door de CL-waarde der oscillatiekring. Verandert nu de capaciteit C_0 , dan zal de opgewekte hoge frequentie ook wijzigen. Verandert zij periodiek bijv. tengevolge van een laagfrequente wisselstroom door de telefoonwindingen, dan gaat de opgewekte hoge frequentie ook periodiek op en neer, en wel in hetzelfde rythme als de laagfrequente telefoonstroom. De hoogfrequente trilling wordt derhalve gemoduleerd.

Koppelt men nu met het boven genoemde generator-

³⁷⁾ Cf. RIEGGER: Wiss. Veröff. Siemens. Konz. Bd. III Heft 2 1924 p. 67.

systeem (I) een nieuwe trillingskring (II), welke een gering bedrag verstemd is ten opzichte van het eerste stelsel, en wel zoo dat men juist op het steilste gedeelte der resonantie-kromme werkt (bijv. punt P in fig. 6), dan zal in (II) een hoogfrequente spanning geïnduceerd worden, waarvan de amplitude op en neer gaat in dezelfde tred als de op de telefoon aangesloten wisselspanning. Plaatst men nu achter

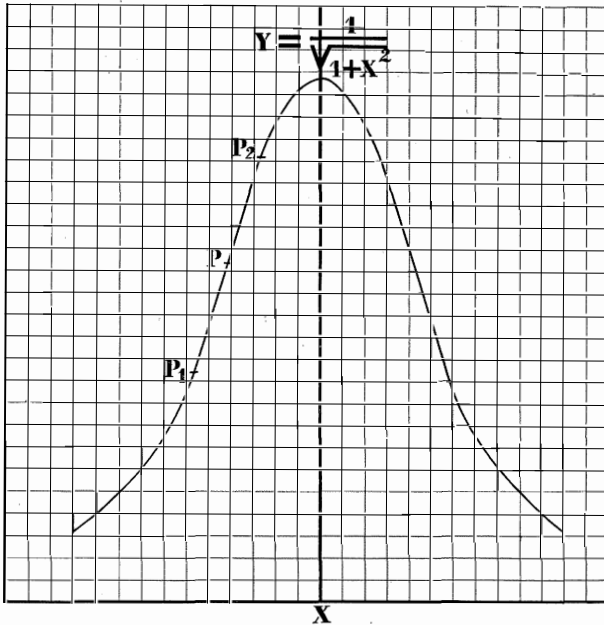


Fig. 6.

deze kring een detector, dan treedt in de plaatkring dezer lamp een laagfrequente wisselstroomcomponent op. Een telefoon in deze kring geplaatst zou dezelfde toonhoogte geven als de oorspronkelijke micro-telefoon.

Om nu zeer zwakke trillingen te kunnen meten, werd achter deze laatste lamp een laagfrequentversterker verbonden. Hiervoor werd een weerstandsversterker gebruikt;

zoals bekend heeft de frequentiekaracteristiek van een dergelijke versterker een horizontaal verloop binnen betrekkelijk wijde grenzen, zoodat metingen bij verschillende frequenties onderling vergelijkbaar zijn.³⁸⁾

Aan de outputzijde van deze versterker was het eigenlijke meetsysteem verbonden, bestaande uit een triodevoltmeter volgens een door HUYDTS³⁹⁾ aangegeven schakeling. Deze voltmeter bestaat uit een detector en daarachter een meetlamp met een zeer steile karakteristiek. Tusschen beide lampen is een filter voor wisselspanningen aangebracht. In de plaatkring dezer lamp was een microamperemeter opgenomen, waarop de aflezing plaats vond. De gevoeligheid van deze meter kon over een groot gebied geregeld worden.

Voor sterkere trillingen kon ook gebruik gemaakt worden van een milliamperemeter, welke in de plaatkring der laatste versterkertrap was opgenomen.

Verschillende gedeelten van deze meetinrichting waren in geaarde zinken bakken opgesteld om storende invloeden van buitenaf en ongewenschte terugkoppel-effecten te vermijden. Het condensatorsysteem der micro-telefoon was door middel van een loodkabel aan de hoogfrequentgenerator verbonden. Indien een gewone leiding gebruikt werd, ontstond storing van radioseinen. De micro-telefoon zelve was veerend opgehangen aan de zoldering. Bijzondere aandacht moest besteed worden aan de contacten; een minder goed contact in een batterij of lampvoetje gaf door de groote versterking ernstige storing en maakte het meten onmogelijk. In de laatste versterkertrap was het bekende geruisch van Brownsche stroomen en Schrot-effect reeds duidelijk hoorbaar, zoodat bij het gebruikte schema de grens der gevoeligheid nabij was.

³⁸⁾ Zie ook pag. 37.

³⁹⁾ Ir. VRIJDAGHS zeg ik dank voor zijn aanwijzingen bij de constructie van deze meter.

§ 6. *Theorie van methode B.*

Beschouwen wij deze methode nader en stellen de capaciteit van het microfoonsysteem in de rusttoestand C_0 , de gemiddelde afstand der platen d (onder invloed der magneetpolen is de trilplaat nl. niet vlak) en R de straal, dan is:

$$C_0 = \frac{R^2}{4d} \dots \dots \dots (1)$$

Gaat door de telefoonwindingen een wisselstroom van frequentie n , dan wijzigt d periodiek en wordt de capaciteit een functie van de tijd: C_t .

$$C_t = \frac{R^2}{4(d + a \sin \omega t)} \dots \dots \dots (2)$$

als a de gemiddelde amplitude over het trilplaatoppervlak is.

$$a = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} w(r, \varphi) dr d\varphi.$$

als $w(r, \varphi)$ de uitwijking van een willekeurig punt met poolcoördinaten r en φ is.

Uit (1) en (2) volgt:

$$C_t = C_0 \frac{d}{d + a \sin \omega t}.$$

De opgewekte hoogfrequente trilling heeft in rusttoestand van de microfoon bij benadering een frequentie ν_0 :

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_0 L_0}}$$

indien L_0 de ingeschakelde zelfinductie is.

Indien de telefoonwindingen bekrachtigd zijn:

$$\begin{aligned} \nu_t &= \frac{1}{2\pi \sqrt{C_t L_0}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_0 \frac{d}{d + a \sin \omega t} L_0}} = \\ &= \nu_0 \frac{1}{\sqrt{\frac{d}{d + a \sin \omega t}}}. \end{aligned}$$

$$r_t = r_o \left(I + \frac{a}{d} \sin \omega t \right)^{\frac{1}{2}} \text{ of } r_t = r_o \left(I + \frac{a}{2d} \sin \omega t \right).$$

De door de hoogfrequentkring (I) opgewekte stroomtrilling $I = I_{max} \sin \omega_o t$ gaat dus bij modulatie ten gevolge van de microtelefoontrilling over in:

$$I = I_{max} \sin \omega_o t = I_{max} \sin \omega_o \left(I + \frac{a}{2d} \sin \omega t \right) t.$$

Beschouwen we nu de overdracht op kring (II) welke ongeveer in afstemming is met (I). Zoöals bekend kan men de resonantiekromme van een electriche kring theoretisch voorstellen door de vorm $y = \frac{I}{\sqrt{I + x^2}}$ (fig. 6). Werken we

nu op dat punt der resonantiekromme, waarin $\frac{dy}{dx}$ maximaal is, dan zullen in kring (II) maximale amplitudewijzigingen optreden, tengevolge der frequentiemodulatie. Een tweede factor echter, waarmee rekening gehouden moet worden, is de ruimte, waarover deze optimum waarde van $\frac{dy}{dx}$ behouden blijft, naar gelang van de grootte der te meten trilplaat-amplitude.

De conclusie is dus dat een scherpe resonantiekromme de voorkeur verdient, terwijl het werkpunt P liefst het midden is van een recht stuk $P_1 P_2$.

Indien de keuze der grootheden hiernaar ingesteld is, zal de in kring (II) optredende amplitudenverandering groot zijn en lineair samenhangen met de te meten trilplaatamplitude. De in kring (II) geïnduceerde spanning E_{II} wordt dan:

$$E_{II} = c \sin \omega_o \left(I + \frac{a}{2d} \sin \omega t \right) t,$$

waarin c bepaald wordt door de primaire stroom en de helling van $P_1 P_2$.

$$E_{II} = c \sin \omega_o t + c \sin \omega_o \left(\frac{a}{2d} \sin \omega t \right) t. \quad \dots \dots (3)$$

Daar $n \ll \nu$ zal, indien $\sin \omega t$ ongeveer ± 1 is (in maximum uitgeweken stand der trilplaat) ν zich instellen op de hoogste, resp. laagste waarde: $\nu_0 \pm \frac{a}{2d}$, d. w. z. dat de in (II) geïnduceerde spanning zich zal instellen op zijn uiterste waarden $c \pm c_1 a$.

Bekijken we nu de detectie. Normaal verkrijgt men

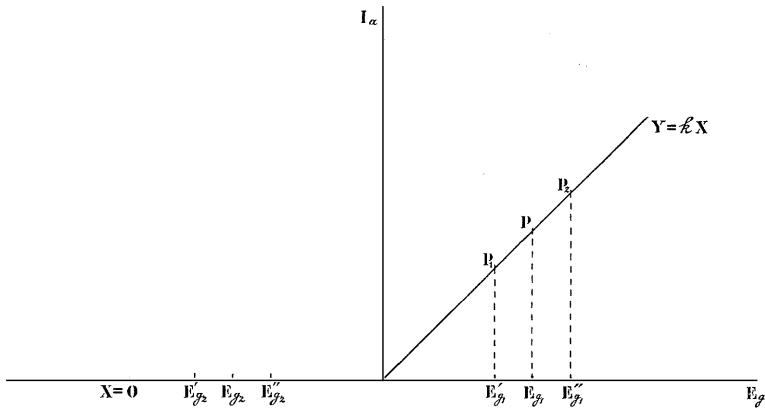


Fig. 7.

detectie door in een gekromd gedeelte der karakteristiek te werken. De detectie is dan bij kleine amplitude evenredig met het kwadraat der amplitude.

In ons geval is het mogelijk, door gebruik te maken van de term $c \sin \omega_0 t$ uit (3), een lineaire detectie te verkrijgen. Stellen wij ons eenvoudigheidshalve voor, dat de karakteristiek bestaat uit twee elkaar in de oorsprong snijdende rechten (fig. 7): $x = 0$ en $y = kx$, dan is de plaatstroom I_a nul voor $x \leq 0$.

De term $c \sin \omega_0 t$ doet nu de roosterspanning E_g schommelen tusschen E_{g_1} en E_{g_2} . Indien nu modulatie optreedt, varieert E_{g_1} tusschen E'_{g_1} en E''_{g_1} en E_{g_2} tusschen E'_{g_2} en

E''_{g_2} . De gedetecteerde stroom hangt nu lineair samen met de modulatie diepte. De plaatstroom verkrijgt de vorm van fig. 8. Het gelijkrichteffect wordt:

$$k \frac{I}{2\pi} \int_0^{\pi} \left\{ (c + c_1 a) \sin \omega_0 t - (c - c_1 a) \sin \omega_0 t \right\} dt = \frac{2kac_1}{\pi},$$

dus lineair in a . Om nu te komen tot een zoo groot mogelijk meetbereik, is het zaak, de stationaire waarde van c zoo te kiezen, dat het punt P (fig. 7) halverwege het rechter deel der karakteristiek ligt. In de apparatuur is c op verschillende wijzen in te stellen bijv. door wijziging van de koppe-

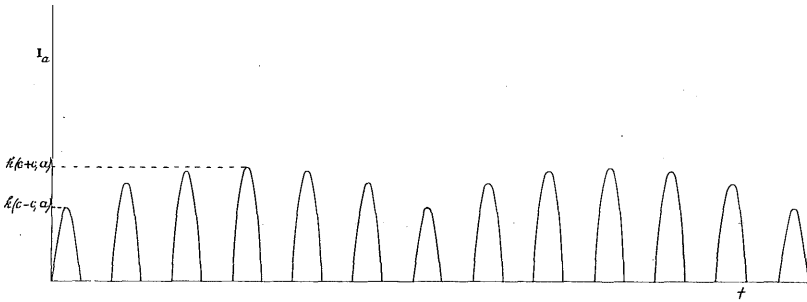


Fig. 8.

lingsgraad tusschen het generatorsysteem en kring (II) (fig. 5).

Voor de juiste instelling van dit meetsysteem moest dus punt P van fig. 6 gezocht worden, hetgeen mogelijk was door aan kring (II) de triodevoltmeter te schakelen en de resonantiekromme op te nemen. Ter controle dat tevens in het punt P van fig. 7 werd gewerkt, m. a. w. dat het systeem lineair werkte, werd nagegaan of de meteraanwijzing evenredig was met de amplitude der telefoontrilplaat, indien de wisselstroomamplitude door de telefoonwindingen gewijzigd werd. Volgens de resultaten met methode A is immers de trilplaatamplitude over een ruim gebied lineair afhankelijk van de stroomsterkte (fig. 4).

§ 7. *Ijking.*

De op deze wijze nog meetbare amplituden kunnen veel kleiner zijn dan bij methode A. De orde van grootte daarvan bedroeg ongeveer $0,001 \mu$. Deze waarde steunt op de met methode A verrichte absolute meting. Hiertoe werd de amplitude in het centrum voor verschillende frequenties op 1μ ingesteld en de daarvoor benodigde wisselspanning gemeten. Het goudfolie was bij deze meting door een gaatje van het filter in het trilplaatcentrum bevestigd, zoodanig dat het vrij bewegen kon. In tabel I zijn de wisselspanningen voor een der gebruikte telefoons aangegeven.

Tabel I.

Toonhoogte	Volts wisselspanning voor 1μ centrumamplitude
96	0,77
128	0,80
192	0,92
256	0,96
384	1,12
512	0,62
768	0,47
1024	0,58
1536	1,50
2048	1,68

Schakelt men nu deze telefoon in het meetsysteem B met dezelfde wisselspanning aan de klemmen, dan correspondeert de verkregen meteruitslag ook met een amplitude van 1μ in het centrum.

Deze absolute waarde werd nog op de volgende wijze gecontroleerd. Werde de telefoon in systeem B geschakeld, eerst zonder en daarna met 6 volt gelijkspanning, dan gaf

de triodevoltmeter, welke hiertoe direct aan kring (II) verbonden was, een andere waarde voor de hoogfrequente inductiespanning. Werd nu de telefoon vervangen door een geijkte condensator ⁴⁰⁾, en deze zoo ingesteld dat de triodevoltmeter respectievelijk dezelfde aanwijzingen gaf, dan correspondeert het verschil dezer capaciteitswaarden met de capaciteitsveranderingen van C_0 , ten gevolge van de 6 volt gelijkspanning. Daar de afmetingen van het systeem, dus C_0 , bekend waren, was de amplitude hieruit te berekenen. De uitkomst was 18μ . Volgens methode A werd 20μ gevonden. Daar de methode niet nauwkeurig was, diende zij slechts als ruwe controle.

§ 8. *Vormfactor. Gemeten waarde.*

Zooals reeds werd opgemerkt, kunnen met methode B veel kleinere amplituden gemeten worden dan met methode A. Een ander belangrijk verschil is het feit, dat met methode A de amplitude in één punt gemeten wordt, en wel voor de ijking in het centrum der trilplaat. Bij methode B echter gaat het om de capaciteitswijzigingen m. a. w. wordt de gemiddelde amplitude van het trillende gedeelte gemeten. Deze gemiddelde amplitude is het nu juist, welke voor het aanstooten der lucht, dus voor de geluidsstraling, van belang is. Daar de ijking voor het centrum heeft plaats gevonden, dienen we dus na te gaan, welke de verhouding is tusschen de gemiddelde amplitude en die in het centrum, de z.g. vormfactor.

Deze verhouding werd *experimenteel* bepaald door gebruik te maken van het stethoscoop-principe in aansluiting op een condensatormicrofoon. Bij een soortgelijke telefoon (I), werd de trilplaat op de telefoondoos geschroefd zonder

⁴⁰⁾ Prof. COSTER ben ik dank verschuldigd voor het beschikbaar stellen van deze condensator.

ebonieten schelp en tevens zonder koperen filter. De eene zijde der trilplaat bevond zich dus geheel vrij in de lucht. De bevestiging was zooveel mogelijk als te voren, nl. met 5 schroeven langs de rand. Onmiddellijk vóór de trilplaat was de eene opening van een nauw-uitlopend glazen buisje gebracht, terwijl de andere opening via een gummislangetje naar een micro-telefoon (II) leidde, waaraan het meet-systeem B was verbonden. Het gummislangetje eindigde in

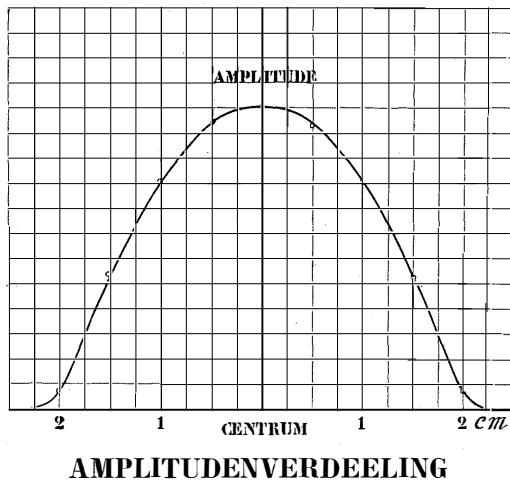


Fig. 9.

een ebonieten stopje, dat precies in de schelpopening van de micro-telefoon paste. Zet men nu telefoon (I) in werking, dan zullen de door de trilplaat in het buisje veroorzaakte drukvariaties op (II) worden overgebracht. (II) doet dus dienst als opvanger en krijgt een zekere amplitude, welke evenredig is met de drukamplitude voor de trilplaat en welke volgens methode B gemeten werd. Het glazen buisje werd nu met behulp van een heugelstatief langs het trilplaatoppervlak bewogen en het drukverloop gemeten. Dit drukverloop was

langs alle middellijnen practisch gelijk, zoodat de uitkomsten voor één bepaalde richting voor het geheele oppervlak golden. Opdat de afstand tusschen trilplaat en glazen buisje steeds dezelfde was, werd het buisje eerst met een stelschroef juist in aanraking gebracht met de trillende plaat, hetgeen gemakkelijk aan het geluid te constateeren is, en vervolgens één slag teruggedraaid. De trilplaatuitwijking was hierbij te verwaarloozen ten opzichte van de afstand tot het buisje. Fig. 9 geeft het resultaat weer van een meting bij de grondtoon der trilplaat (ongeveer 1000 perioden per sec.).

Deze uitkomsten zijn in goede overeenstemming met de resultaten van ANDREJEW³⁶⁾, die langs andere weg soortgelijke waarnemingen deed. Bovendien blijkt uit diens metingen dat deze amplitudeverdeling bewaard blijft indien een schelp wordt aangebracht. Om deze reden mogen we het resultaat van fig. 10 ook toepassen op onze andere telefoon met schelp en filter. De uit fig. 9 volgende gemiddelde amplitude bedraagt 31 % van de amplitude in het centrum.

§ 9. Berekening vormfactor.

Deze verhouding kan ook langs *theoretische* weg afgeleid worden door uit te gaan van de differentiaalvergelijking van een trillende ronde plaat, welke volgens RAYLEIGH I § 218 luidt:

$$\Delta^2 w - k^4 w = 0.$$

Indien de rand geklemd wordt, zooals in ons geval, zijn de randvoorwaarden:

$$w = 0 \text{ en } \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \text{ voor } r = R.$$

De oplossing luidt:

$$w(r, \varphi) = A \cos(n\varphi - a) \{J_n(kr) + \lambda J_n(ikr)\} \cos(pt - \varepsilon).$$

Nemen wij nu A als eenheid en beschouwen we de trillings-

vorm zonder knooplijnen ($n = 0$), dan geldt voor de gemiddelde amplitude:

$$\begin{aligned} w_{gem} &= \frac{I}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r \{J_0(kr) + \lambda J_0(ikr)\} dr = \\ &= \frac{2}{R^2} \left[\frac{r}{k} \{J_1(kr) - i\lambda J_1(ikr)\} \right]_0^R \end{aligned}$$

De waarden voor k en λ volgen uit de randvoorwaarden; men vindt $k = \frac{3,19}{R}, \frac{6,30}{R}$ enz. en $\lambda = 0,056; -0,0024$ enz. Substitueeren we de eerste nulpunten, dan vinden we de gemiddelde amplitude voor de grondtoon:

$$w_{gem} = 0,311.$$

De gemiddelde amplitude bedraagt derhalve bij de grondtoon ongeveer het *derde* deel van de amplitude in het centrum. Deze berekende waarde is in goede overeenstemming met de gemeten waarde.

De tweede waarde van λ en k geldt voor het optreden van één knoopcirkel. Bij deze boventoon wordt de plaat verdeeld in twee gedeelten met tegengestelde phase nl. een ring en een cirkel. De scheiding tusschen deze bevindt zich bij $r = 0,38R$.⁴¹⁾ In dit geval vindt men na substitutie in de voorgaande formule voor de gemiddelde amplitude over het geheele trilplaatoppervlak:

$$w_{gem} = 0,131.$$

Bij de boventoon met één knoopcirkel bedraagt de gemiddelde amplitude derhalve ongeveer het *achtste* deel van die in het centrum.

§ 10. *Vergelijking methode A en B.*

Uit het voorgaande blijkt dat methode A en B niet alleen in *quantitatief*, doch ook in *qualitatief* opzicht verschillen.

⁴¹⁾ Cf. Handbuch der Physik Bd. 8 p. 237.

Beschouwen we nl. de geluidsenergie, welke een telefoon afgeeft, dan gaat het natuurlijk om de gemiddelde amplitude; we hebben te maken met het verplaatste luchtvolume. Daarom juist heeft methode B ook speciaal waarde voor frequenties gelegen boven de grondtoon. Indien bepaalde trilplaatgedeelten met tegengestelde phase trillen, wordt de afgegeven geluidsenergie minder, doch evenzoo de capaciteitswijziging. De resultaten volgens methode B hebben energetische waarde.

Methode A gebruiken wij derhalve voor de ijking en gaan dan over op methode B door het in rekening brengen van de vormfactor, welke dus nog afhangt van de trillingsvorm. Op deze wijze is de *werkzame* amplitude in absolute maat bekend.

Verder kan men door vergelijking van methode A en methode B gegevens krijgen omtrent de frequentiearakteristiek van het meetsysteem. Een resonantiekromme volgens A en een volgens B moeten geheel samen vallen, indien de versterking gelijk is voor alle frequenties, d. w. z. zoolang de trillingsvorm der grondtoon bestaan blijft. Bij een telefoon met grondtoon 1000 vielen deze resonantiekrommen vrijwel samen van 150 tot 1500 trillingen per sec. Buiten dit gebied was de aanwijzing volgens B minder. Hieruit valt te constateeren, dat beneden 150 trillingen per sec. de versterkingsgraad daalt, zoodat hier voor absolute amplitudeijking een correctiefactor noodig is, welks waarde hier dan ook uit volgt. Boven de frequentie 1500 duidt de daling op het optreden van een andere trillingsvorm, waardoor de vormfactor ongunstiger wordt. In elk geval volgt hieruit, dat tot 1500 trillingen per sec. de trillingsvorm der grondtoon bewaard blijft, hetgeen ook in overeenstemming is met de eerstvolgende boventoon, welke bij ongeveer 2000 trillingen per sec. valt.

Een niet onbelangrijk voordeel van methode B is tenslotte

de mogelijkheid amplituden te kunnen meten, terwijl de telefoon aan het oor gedrukt wordt. De grootere demping die dan op de trilplaat werkt, kan gemeten worden en in rekening gebracht. In de literatuur komt men gevallen tegen, waarbij dit niet onbelangrijke verschil verwaarloosd wordt.

§ 11. *Meettelefoons. Vertrek.*

Bij de in de volgende hoofdstukken te beschrijven metingen is gebruik gemaakt van een tweetal meettelefoons volgens de in § 4 beschreven constructie. Het waren gewone kop-telefoons, waarin het genoemde condensatorsysteem werd aangebracht. De diameters van trilplaat en filter bedroegen 5,5 cm; de breedte der micaring 1 cm. Er bleef dus een trilplaat-oppervlak met een straal van 2,25 cm over. De dikte der trilplaat was 0,2 mm en van het filter 2 mm. De dikte der micaring 0,18 mm, dus groot ten opzichte van de te meten amplituden. De schelpopening, waardoor de aanstooting der lucht plaats vindt, was 1,1 cm in diameter.

De telefoons waren zooveel mogelijk gelijk gebouwd, zoodat de capaciteit van de condensatorsystemen dezelfde was. Kleine afwijkingen daarvan zijn bij te regelen door wijziging der magneetsterkte, waardoor de aangetrokken stand der trilplaat iets gewijzigd wordt. Hierbij moet tevens bedacht worden, dat de magneetsterkte ook invloed heeft op de demping, alsook op het resonantiepunt der trilplaat. Verschillen in de demping blijken uit de resonantiekrommen, welke gemakkelijk met methode B op te nemen zijn. Zoo moest bij de eene telefoon 28 en bij de andere 93 trillingen verstemd worden om van het $\frac{7}{10}$ deel der resonantieamplitude links op dezelfde waarde rechts van het resonantiepunt te komen. De grondtonen der gebruikte telefoons waren resp. 955 en 930 trillingen per sec. Zooals ook andere onderzoekers vermelden, treden in deze resonantiefrequenties steeds kleine variaties op door temperatureffecten.

In tabel II is een voorbeeld gegeven van de wijze waarop de grondtoon afhangt van de aan de klemmen aangelegde magnetiseeringsspanning.

Tabel II.

Volts gelijkspanning aan de klemmen	Eigen-frequentie trilplaat
0	901
4	890
8	882

Tenslotte stond ter beschikking een zeer klein telefoontje, dat een diameter had van 2 cm. Het kon juist in de oorschelp gebracht worden en voor meer physiologisch werk dienst doen. De trilplaat had een diameter van 1,8 cm en een dikte van 0,08 mm. De micaring was hier 2 mm breed en de schelpopening 6 mm in diameter. De grondtoon was 2625 trillingen per sec.

Wat het vertrek betreft dient vermeld, dat bij de voorbereidende metingen bleek, dat door reflectie aan de wanden allerlei storende effecten optraden. Om deze reden werd de zoldering vanuit het midden straalsgewijze met geplooid gordijnstof behangen. Evenzoo werden de wanden voorzien van ruim hangende gordijnen. De meettelefoon was in het midden veerend aan de zoldering opgehangen en op een afstand van ruim een meter rondom door geplooid gordijnstof omgeven; binnen deze ruimte bevond zich alleen de meettelefoon; de verdere apparatuur was daarbuiten opgesteld. Op de vloer lag een dubbel geslagen tapijt. Door deze maatregelen werd het vertrek behoorlijk gedempt. De afmetingen waren 6 bij 5 bij 3,5 m.

HOOFDSTUK III.

ABSOLUTE BEPALING VAN DE GELUIDSINTENSITEIT.

§ 1. *Straler en opvanger. Verloop van de drukamplitude.*

De in het vorige hoofdstuk beschreven meettelefoon kan in de eerste plaats direct dienst doen als straler. De voor de trilplaat aanwezige lucht vormt een zekere demping, indien de plaat trilt. Deze nuttige dempingsterm of stralingsweerstand is een maat voor de uitgestraalde geluidsenergie. Indien we nu langs de in hoofdstuk II aangegeven weg de amplitude der trilplaat in absolute waarde meten, is het mogelijk met behulp van formule (19) de per sec. afgegeven geluidsenergie te vinden.

Plaatsen wij omgekeerd genoemde telefoon in een geluidsveld, dan zullen de optredende drukvariaties de trilplaat in beweging brengen en een zekere amplitude geven. Ook deze amplitude kunnen we meten, indien het geluid voldoende sterk is. Het systeem werkt nu als opvanger. De gemeten amplitude is een maat voor de in het geluidsveld ter plaatse heerschende drukamplitude.

Nemen we nu twee gelijke meettelefoons als beschreven in § 5 van het vorige hoofdstuk, dan kunnen we naar keuze de één als straler en de ander als opvanger gebruiken; zij vormen een reciprook systeem. Met een dergelijk systeem werd nagegaan op welke wijze de drukamplitude met de afstand tot de straler afneemt. Hiertoe werden straler en opvanger evenwijdig aan elkaar geplaatst, met de openingen naar elkaar toegekeerd en op een afstand van 5 cm. Door

nu deze afstand te vergrooten en de amplitude van de opvanger te meten, vinden we het verloop der drukamplitude. In tabel III zijn deze waarden aangegeven, waarbij de amplitude op de afstand van 5 cm als eenheid is genomen,

Tabel III.

Afstand in cm	Drukamplitude	Product
5	1,00	500
10	0,51	510
15	0,31	465
20	0,25	500
25	0,19	475
30	0,15	450

terwijl de golflengte 35 cm, dus groot ten opzichte van de afmetingen van de straler was. Uit deze tabel zien we dat de drukamplitude evenredig met de afstand afneemt, hetgeen in overeenstemming is met de in hoofdstuk I gegeven theorie. Voor de snelheidsamplitude der luchtdeeltjes zou men een ander resultaat moeten vinden ⁴²⁾.

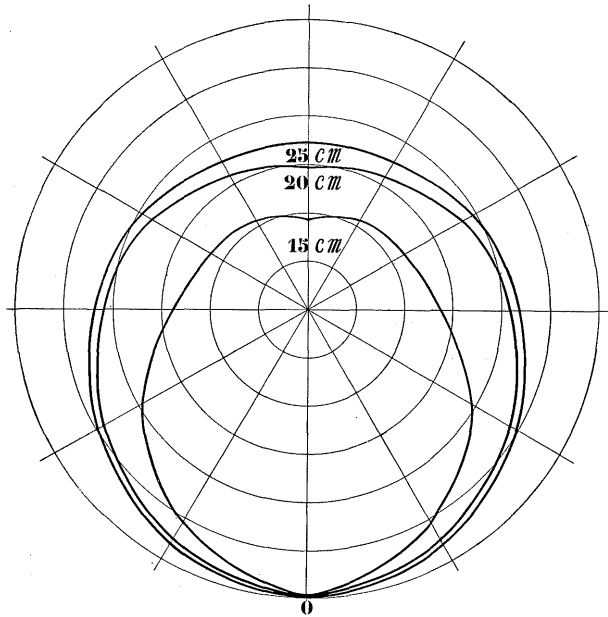
§ 2. *Stralingskrommen.*

Om de invloed van de stralings- en opvangrichting na te gaan werden straler en opvanger op bepaalde afstand geplaatst, bijv. 20 cm, met naar elkaar toegekeerde openingen. De straler werd nu rondgedraaid om de opvanger heen en de amplitude van de laatste gemeten. De optredende verschillen wijzen op een richtingseffect van de opvanger.

⁴²⁾ Cf. formule (17) en (18).

Tabel IV.

Graden	Afstand		
	15 cm	20 cm	25 cm
0°	1,000	1,000	1,000
30°	0,933	0,967	0,975
60°	0,826	0,906	0,913
90°	0,681	0,845	0,850
120°	0,629	0,792	0,812
150°	0,599	0,731	0,778
180°	0,563	0,704	0,760



STRALINGSCURVEN

Fig. 10.

Vrijwel hetzelfde verloop treedt op, indien de opvanger om de straler heen gedraaid wordt. In tabel IV zijn de

uitkomsten weergegeven voor afstanden van 15, 20 en 25 cm voor een toonhoogte van 1000 trillingen per sec. De getallen geven de amplitudeverhoudingen ten opzichte van de nulrichting. Uit deze getallen blijkt duidelijk, dat de schaduwwerking op grotere afstand verdwijnt. Gaan we over op de intensiteit, dan moeten deze getallen gequadrateerd worden. Fig. 10 geeft de stralingskrommen voor de genoemde afstanden. Dezelfde resultaten treden ook op bij metingen langs andere meridiaandoorsneden van het oppervlak, dat in de ruimte de uitstraling bepaalt. De in tabel IV gegeven waarden zijn dan ook gemiddelden van verschillende waarnemingen. Uit tabel IV volgt dan voor de afstand van 20 cm een over het ruimteoppervlak gemiddelde energie van 0,711 maal die in voorwaartsche richting. Hieruit volgt, dat de naar voren toe uitgestraalde energiestroom per cm^2 1,40 maal de gemiddeld per cm^2 uitgestraalde energiestroom bedraagt.

§ 3. *Meting van de amplitudeverhouding van straler en opvanger.*

Om de juistheid van de voor de absolute bepalingen te gebruiken formules op de proef te stellen, werd met deze apparatuur de verhouding van de amplituden van straler en opvanger gemeten en met de berekende waarde vergeleken.

Twee gelijke meettelefoons als beschreven in § 11 van het vorige hoofdstuk werden op eenige afstand van elkaar geplaatst. De eene diende als straler, de ander als opvanger. De straler was aan de toongenerator verbonden en dus aangesloten op een zekere wisselspanning E ; hierdoor kreeg de straler een zekere amplitude ξ_s , terwijl de ontvanger, waaraan het meetsysteem verbonden was, ten gevolge van het uitgestraalde geluid een amplitude ξ_o kreeg. Daar ξ_s en ξ_o een factor 100 tot 1000 uit elkaar liggen (cf. tabel

V), stelt een directe meting een te groote eisch aan het lineariteitsgebied van het meetsysteem. Bovendien zouden straler en opvanger beurtelings aan het meetsysteem verbonden moeten worden, waarbij aan de gevoeligheid geheel verschillende eischen gesteld zouden worden. Om deze reden werd gemeten door tusschenkomst van een wisselspanning aan de klemmen van de telefoonwindingen resp. van straler en ontvanger, daarbij gebruik makend van het feit, dat de trilplaatamplitude binnen grenzen lineair afhangt van de aangelegde spanning (cf. fig. 4).

Het meetsysteem wordt aan de opvanger verbonden en de meteruitslag ten gevolge van het opvallende geluid, veroorzaakt door een spanning E aan de straler, waargenomen. Nu wordt de wisselspanning overgeschakeld op de ontvanger en de spanning tot een waarde e afgezwakt, waarbij de meteruitslag dezelfde is (gelijke amplitude). Nu worden de meetcapaciteiten van opvanger en straler parallel geschakeld in het meetsysteem en de meetapparatuur opnieuw ingesteld. Daarna wordt aan de straler een wisselspanning van $0,1 \times E$ en vervolgens aan de opvanger een wisselspanning $10 \times e$ aangelegd en de meteraanwijzingen genoteerd. De verhouding hiervan was nu één honderdste deel van de gezochte amplitudeverhouding. Hierbij zij opgemerkt, dat de capaciteiten der beide meettelefoons practisch gelijk waren door de gelijke constructie, zoodat gelijke capaciteitswijzigingen door dezelfde amplituden veroorzaakt zijn. Het gebruik van de factoren $0,1$ en 10 stelt een veel geringere eisch aan de lengte van het lineariteitsgebied van het meetsysteem.

In tabel V zijn de uitkomsten weergegeven voor een afstand van 20 cm tusschen straler en opvanger. De minimumwaarde werd gevonden bij een frequentie van 930 trillingen per sec, hetgeen juist het resonantiepunt van de trilplaat van de opvanger is.

Ter controle werden ook straler en opvanger omgewisseld. Dit leidde echter niet tot dezelfde resultaten. Zoo werd nu als minimumwaarde 60 gevonden bij een frequentie 950, zijnde het resonantiepoint van het nieuwe opvangsysteem. De oorzaak van dit belangrijke verschil bleek gezocht te moeten worden in een zeer ongelijke demping der beide

Tabel V.

Frequentie	Amplitudeverhouding $\frac{\xi_s}{\xi_0}$
650	1420
800	820
930	245
1050	720
1350	950

trilplaatsystemen, hetgeen vooral veroorzaakt werd door een verschil in magneetsterkte. De amplitude, welke de opvanger krijgt, is omgekeerd evenredig met de demping van diens trilplaat, zooals uit de in § 4 gegeven berekening volgt. Derhalve neemt de gemeten amplitudeverhouding $\frac{\xi_s}{\xi_0}$ evenredig toe met de demping van de ontvangertrilplaat.

Om deze reden werd de demping nader onderzocht. Op twee verschillende wijzen werd een resonantiekromme bepaald. Ten eerste door met methode B de trilplaatamplitude te bepalen voor verschillende frequenties in de omgeving van het resonantiepoint, terwijl de stroomsterkte constant gehouden werd. Om nu van het $\frac{7}{10}$ deel der resonantieamplitude op dezelfde waarde aan de andere zijde van het

resonantiepoint te komen, moest bij de eene opvanger 93 en bij de andere 28 trillingen verstemd worden. Hieruit volgt $\delta_1 = 0,050$ en $\delta_2 = 0,014$ (cf. § 4). Hetzelfde resultaat werd verkregen uit amplitudemetingen bij opvallend geluid van verschillende toonhoogte, doch constant gehouden intensiteit. Deze intensiteit werd constant gehouden door de amplitude van de straler constant te houden.

§ 4. *Berekening van de amplitudeverhouding van straler en opvanger.*

Volgens formule (18) in hoofdstuk I geldt voor de drukamplitude P op afstand R van een straler van de nulde orde:

$$P = \rho \frac{\omega^2 V}{4 \pi R}$$

Passen we dit toe op onze trillende telefoonplaat en stellen V gelijk de maximum volumeverplaatsing bij de eenheid van uitwijking in het centrum, dan geldt voor P op een afstand R naar voren toe:

$$P = f \rho \frac{\omega^2 V}{4 \pi R} \xi_s$$

als ξ_s de amplitude in het centrum en f de in § 2 bepaalde richtingsfactor is.

Bevindt zich nu op afstand R naar voren toe een systeem met dezelfde eigenschappen, dat als ontvanger dienst doet, dan geldt voor de op deze trilplaat werkende kracht K :

$$K = fVP$$

waarin f weer de richtingsfactor en V de volumeverplaatsing is.

Na substitutie van de voor P gevonden waarde komt:

$$K = f^2 \rho \frac{\omega^2 V^2}{4 \pi R} \xi_s$$

De beweging van een dergelijke trilplaat kan opgevat worden als een systeem met één vrijheidsgraad, zoodat voor de uitwijking ξ de volgende bewegingsvergelijking geldt:

$$M \frac{d^2 \xi}{dt^2} + 2 \delta M \omega_0 \frac{d\xi}{dt} + M \omega_0^2 \xi = K \cos \omega t$$

waarin M de effectieve trilplaatmassa, δ de dempingsfactor en $\omega_0 = 2\pi \times$ de eigenfrequentie n_0 van de trilplaat is.

Gaan we nu over op het resonantiegeval $\omega = \omega_0$, dan vallen de eerste en derde term van het linkerlid tegen elkaar weg, zoodat voor de amplitude in het centrum van de ontvanger ξ_0 geldt:

$$\xi_0 = \frac{K}{2 \delta M \omega_0^2} = \frac{f^2 \rho \omega_0^2 V^2}{2 \delta M \omega_0^2 4 \pi R} \xi_s.$$

Hieruit vindt men voor de amplitudeverhouding van straler en opvanger in het resonantiegeval na substitutie van $V = \gamma \pi r^2$, waarin γ de vormfactor⁴³⁾ en r de straal, zowel voor opvanger als voor straler:

$$\frac{\xi_s}{\xi_0} (\text{res.}) = \frac{8 R M \delta}{\pi f^2 \gamma^2 \rho r^4} \dots \dots \dots (20)$$

Buiten het resonantiepunt van de ontvanger hebben we de algemeene oplossing van de gegeven differentiaalvergelijking noodig en vinden we als eindresultaat:

$$\frac{\xi_s}{\xi_0} = \frac{4 R M \sqrt{(n_0^2 - n^2)^2 + 4 \delta^2 n^2 n_0^2}}{\pi f^2 \gamma^2 \rho r^4 n^2}.$$

Nemen we nu voor de berekening het resonantiegeval, dan hebben we de volgende waarden in te vullen:

⁴³⁾ Cf. hoofdstuk II, § 8 en § 9.

$$\begin{aligned}
 R &= 20 \text{ cm} & r &= 2,25 \text{ cm} \\
 \gamma &= 0,311 & M &= 0,182^{44}) \times 2,34 \text{ g.} \\
 \delta_1 &= \frac{93}{2 \times 930} = 0,050 & \delta_2 &= \frac{28}{2 \times 950} = 0,014 \\
 f &= 1,40 & \rho &= 0,00120 \text{ g/cm}^3.
 \end{aligned}$$

Men vindt dan voor de amplitudeverhouding resp. 261 en 73.

Berekend: 261 en 73.

Gemeten: 245 en 60.

De graad van nauwkeurigheid van dit soort metingen in aanmerking nemend, is de overeenstemming bevredigend. Wat de mogelijke fouten betreft, valt op te merken, dat deze zoowel aan de straler-, als aan de opvangerkant kunnen liggen. Verschillende grootheden komen daardoor quadratisch in de eindformule voor. De factoren M en δ komen echter alleen aan de opvangzijde voor, waardoor de onnauwkeurigheid aan die kant groter is. Dit beteekent dus, dat de absolute intensiteitsbepaling met de straler als uitgangspunt zooals dat hierna is geschied, nauwkeuriger is.

§ 5. Absolute bepaling der geluidsintensiteit.

Uit de vorige beschouwingen volgt de mogelijkheid om de geluidsintensiteit in een bepaald punt in absolute maat aan te geven. Op een afstand R van de straler geldt immers:

$$P = f \rho \frac{\omega^2 V}{4 \pi R} \xi_s.$$

⁴⁴⁾ De werkelijke massa bedroeg 2,34 g. Om de effectieve massa M voor dit geval te vinden, kan men stellen:

$$\frac{M \dot{\xi}^2}{2} = \pi d \rho \int_0^R r \dot{\xi}^2 dr$$

waarin d de dikte en r de straal van de trilplaat is. Door de Besselsche functie $\xi = J_0(kr) + \lambda J_0(ikr)$ in te voeren, vindt men na berekening voor de grondtoon $M = 0,182 \pi r^2 \rho d$.

Stellen we weer $V = \gamma\pi r^2$ en $\omega = 2\pi n$, dan komt:

$$P = \frac{\pi^2 f_0 \gamma r^2}{R} n^2 \xi_s \dots \dots \dots (21)$$

Met formule (21) kan men P berekenen. Verder kan men dan met de in hoofdstuk I vermelde formules andere grootheden, zooals de energiestroom, de amplitude der luchtdeeltjes, vinden.

Formule (21) is in hoofdstuk IV toegepast voor het bepalen van het minimum audible; vullen we de betreffende waarden in, dan wordt (21), indien we de afstand $R = 20$ cm nemen:

$$P = 0,0013 n^2 \xi_s \dots \dots \dots (22)$$

Door nu bij een bepaalde frequentie n de stralercentrum-amplitude ξ_s (of na omrekening de gemiddelde amplitude, zooals methode B levert), waarbij de grens van hoorbaarheid bereikt wordt, te meten, vindt men de minimum hoorbare drukamplitude.

HOOFDSTUK IV.

DE BEPALING VAN HET MINIMUM AUDIBILE.

§ I. *Chronologisch overzicht.*

Onderzoekingen over de drempelwaarde van de geluidsintensiteit zijn door de volgende onderzoekers verricht:

- I. 1870 TOEPLER en BOLTZMANN: *Ann. d. Ph. u. Ch.* Bd. 21, p. 321.
- II. 1877 RAYLEIGH: *Proc. R. Soc.* Vol. 26, p. 248.
- III. 1883 WEAD: *Am. Journ. Sc.* Vol. 26, p. 177.
- IV. 1888 WIEN: *Dissertation Berlin* — Über die Messung der Tonstärke.
- V. 1894 RAYLEIGH: *Phil. Mag.* Vol. 38, p. 365; p. 285; p. 295.
- VI. 1902 ZWAARDEMAKER en QUIX: *Arch. Anat. u. Physiol. Abt. Suppl.* p. 367; id. 1904 en 1905.
- VII. 1903 WIEN: *Pflügers Arch.* Bd. 97, p. 1.
- VIII. 1904 WEBSTER: *Ludwig Boltzmanns Festschrift; Barth, Leipzig*, p. 866.
- IX. 1905 QUIX en MINKEMA: *Arch. Anat. u. Physiol. physiol. Abt. Suppl.* p. 305; MINKEMA: *Dissertatie Utrecht*, 1905.
- X. 1907 ABRAHAM: *C. R.* Tome 144, p. 1099.
- XI. 1907 RAYLEIGH: *Phil. Mag.* Vol. 14, p. 596.
- XII. 1919 HAHNEMANN en HECHT: *Ann. d. Ph.* Bd. 60, p. 454; id. 1920 en 1921.
- XIII. 1921 KRANZ: *Phys. Rev.* Vol. 17, p. 384 en Vol. 21, p. 573, 1923.

- XIV. 1922 MINTON en WILSON: Phys. Rev. Vol. 19, p. 80; Journ. Laryng. Otol. Vol. 38, p. 405; Proc. Nat. Ac. Sc. Vol. 9, p. 269, 1923.
- XV. 1922 LANE: Phys. Rev. Vol. 19, p. 492.
- XVI. 1922 FLETCHER en WEGEL: Phys. Rev. Vol. 19, p. 553; FLETCHER: Speech and Hearing 1929, New-York, van Nostrand Comp.
- XVII. 1923 SWAN: Proc. Nat. Ac. Am. Vol. 58, p. 425.
- XVIII. 1930 MEYER: Zeitschr. f. Hals-, Nasen- u. Ohren-Heilk. Bd. 27, p. 418.
- XIX. 1931 WAETZMANN en HEISIG: Ann. d. Ph. Bd. 9, p. 921.

In I wordt een optische interferentiemethode voor het analyseeren van luchttrillingen beschreven. Hiermee wordt de amplitude der trillende lucht bepaald aan het open einde van een orgelpijp en daarna de afstand waarop het geluid onhoorbaar wordt. Door berekening vindt men dan de minimum intensiteit (toonhoogte 181).

In II wordt een fluitje aangeblazen met een druk van 9,5 cm water. Het geluid werd onhoorbaar op 820 m. De opgenomen hoeveelheid lucht was 196 cm³ per sec. Hieruit werd de arbeid gevonden en tevens het gezochte minimum onder de aanname dat alle arbeid in geluid werd omgezet (toonhoogte 2730).

In III wordt door amplitudemeting de door een stemvork aan de lucht afgegeven energie bepaald. Tevens meet men de amplitude, waarbij het geluid op 100 m afstand onhoorbaar wordt (octaven 128—1024 trillingen per sec.).

In IV wordt een telefoon gebruikt, gevoed door de pulseerende stroom van een electricch gedreven stemvork. De geluidsintensiteit wordt bepaald met de in hoofdstuk I (pag. 12) beschreven membraanresonator (toonhoogte 213 en 426).

In V wordt deels dezelfde methode gebruikt als in III, deels met een telefoon gewerkt waarvan de trilplaatuitwijking voor gelijkstroom gemeten is; de wisselstroom, waarbij juist niets meer te hooren was, wordt gemeten; hieruit volgt de minimum trilplaatamplitude, waaruit weer de condensatie berekend wordt (toonhoogte 256, 384 en 582).

VI omvat metingen over het geheele hoorbare gebied. In principe wordt als in III gewerkt. Absolute waarden worden verkregen door de uitkomst van I voor toonhoogte 181 in te voeren.

Door WIEN (VII) wordt een telefoon gebruikt, die met wisselstroom gevoed wordt, terwijl speciale aandacht aan de toonzuiverheid wordt geschonken. De telefoonstroom, waarbij op 30 cm afstand geen geluidsgewaarwording meer optreedt, wordt bepaald. De trilplaatuitwijking was langs optische weg voor verschillende stroomsterkten gemeten. Door berekening wordt dan de gevraagde intensiteit gevonden. Opgemerkt zij, dat hierbij de telefoontrilplaat niet boven zijn grondtoon gebruikt kan worden. Voor de hooge tonen worden dan speciale telefoons gebruikt (resonantiepunten 1100, 2900, 5500, 12000 trillingen per seconde).

In VIII wordt een membraanresonator door een electricch gedreven stemvork in trilling gebracht, en de aan de lucht afgegeven energie berekend. Uit de afstand, waarop het geluid verdwijnt, vindt men het minimum audibile (toonhoogte 256).

IX vermeldt soortgelijke metingen als VI. Absolute waarden worden hier verkregen, door gebruik te maken van rendementsmetingen van fluiten door WEBSTER.

In X wordt een telefoon aan de eene zijde van een buis bevestigd; aan de andere zijde houdt men het oor. De minimum stroomsterkte en de daarbij behorende trilplaatuitwijking levert het verplaatste luchtvolumen bij het

gevraagde minimum. Hieruit volgt dan de drukamplitude (toonhoogte 250 en 500).

RAYLEIGH (XI) geeft nog enkele metingen naar aanleiding van de groote afwijkingen met WIEN (VII).

XII omvat een methode om het rendement van een telefoon te bepalen. Het opgenomen aantal watts bepaald bij vastgehouden trilplaat en bij normaal bewegende trilplaat. Uit dit verschil vindt men de trilplaatenergie. Door na te gaan welk deel in geluid wordt omgezet en door de minimum stroomsterkte, waarbij de gehoorgrens bereikt wordt, te bepalen, is het gevraagde minimum te vinden (toonhoogte 1000).

KRANZ (XIII) gebruikt een thermofoon, welke tegen het oor wordt gehouden. Door de gemeten minimum stroom en de verdere constanten te substitueeren in de door WENTE ⁴⁵⁾ afgeleide thermofoonformule, vindt hij de drukwijziging in absolute waarde.

Een andere methode is het meten van de trilplaatuitwijking bij verschillende stroomen. Dit geschiedde tot 6μ . Door extrapolatie wordt de amplitude bij het minimum audibile gevonden. Hieruit volgt de in de gehoorgang optredende volumenvariatie en met behulp van de wet van Poisson de bijbehorende drukvariatie (octaven 128—4096 trillingen per sec.).

In XIV wordt ook een telefoon gebruikt en de minimum stroom bepaald. Gebruik makend van de onderzoeken van KENNELLY ³⁴⁾ worden verschillende elektrische en mechanische telefoonconstanten gemeten en daaruit de geluidsenergie voor allerlei toonhoogten berekend.

XV geldt speciaal de hooge tonen. Als geluidsbron dient de door HEWLETT ⁴⁶⁾ aangegeven toongenerator, waarvan de afgegeven geluidsenergie berekend kan worden.

⁴⁵⁾ WENTE: Phys. Rev. Vol. 19 1922 p. 336.

⁴⁶⁾ HEWLETT: Phys. Rev. Vol. 19 1922 p. 52.

FLETCHER en WEGEL (XVI) maakten gebruik van een condensatormicrofoon. Het geluid was afkomstig van een telefoon T_1 , welke aangesloten was op een genereerende triode. Op geringe afstand van deze telefoon werd nu eerst het oor gehouden en daarna op dezelfde plaats de condensatormicrofoon, welke verbonden was met een versterkeraggregaat, dat weer in een telefoon T_2 eindigde. Nu werd tegen deze telefoon het oor gedrukt en met een potentiometer de versterking zoo groot gemaakt, dat de geluidssterkte dezelfde was als in de eerste stand van het oor. Dit geschiedde voor alle frequenties. Hierdoor was het mogelijk de versterker zoo in te stellen, dat de geluidsintensiteit voor de condensatormicrofoon dezelfde was als die aan de outputzijde der versterker voor telefoon T_2 . Daar de condensatormicrofoon van te voren geijkt was met een thermofoon, was de geluidsintensiteit in absolute waarde te vinden door meting van de aan de klemmen der condensatormicrofoon optredende wisselspanning.

Om nu een meting te verrichten, werd op een bekende geluidssterkte ingesteld, terwijl de versterking op de te voren bepaalde waarde was gebracht. Door nu deze versterking een afleesbaar aantal malen af te zwakken, totdat de gehoorrens bereikt was, kon de aan het oor afgegeven energie berekend worden. De metingen werden gedaan aan 11 personen met toonhoogten van 130 tot 2000 in een „sound-proof” vertrek.

Volgens een tweede methode worden bepalingen met een klein thermotelefoontje gedaan, dat in de uitwendige gehoorgang gebracht werd om de minimumstroomsterkte te bepalen, waarbij nog geluid waargenomen werd. Tevoren was deze thermofoon geijkt met een condensatormicrofoon, waarmee deze verbonden was via een luchtruimte, waarvan het volumen gelijk was aan dat van de gehoorgang. Aldus werd van vijf personen de drempelwaarde bepaald met de

geijkte thermofoon en vervolgens met een gewone telefoon. Deze laatste kon daardoor geijkt worden. Met deze telefoon werden nu een 72-tal normale ooren onderzocht voor tonen, varierende tusschen 500 en 3000 trillingen per sec. (octaven 64—2048 trillingen per sec.).

In XVII wordt gebruik gemaakt van de formule van SABINE ⁴⁷⁾ voor de nagalmtijd van een vertrek. Door de aanvangsintensiteit van een bepaald geluid en de nagalmtijd te meten, valt de minimum hoorbare energie te berekenen.

MEYER (XVIII) verrichtte metingen met een interferentie-toongenerator en een telefoon of luidspreker als geluidsbron. Het geluid kon logaritmisch afgezwakt worden, terwijl aan de toonzuiverheid speciale aandacht besteed werd. Om tot absolute waarden te geraken werd door middel van een geijkte condensatormicrofoon de drukamplitude in dynes/cm² op 50 cm afstand van de luidspreker gemeten voor verschillende frequenties. Op dezelfde plaats werd ook de proefpersoon geplaatst en dan de stroomsterkte verzwakt tot het geluid verdween. Ook werd voor de metingen een telefoon gebruikt, waarvan de drukamplitude bij verschillende frequenties bij 1 mA stroomsterkte bepaald werd, terwijl aan deze telefoon een kunstmatig oor was geplaatst van dezelfde afmetingen als de menselijke gehoorgang, doch met harde wanden. De uitkomsten met de luidspreker en die met de telefoon gaven onderling geen systematische verschillen (octaven 100—12800 trillingen per sec.).

WAETZMANN en HEISIG (XIX) gebruiken een serie telefoons, waarvan zij het rendement in het resonantiepoint bepalen volgens de door HAHNEMANN en HECHT (XII) aangegeven methode; echter voor veel kleinere stroomsterkten om extrapolatie te voorkomen. Het aantal watts,

⁴⁷⁾ W. C. SABINE: Collected papers on acoustics — Cambridge Harvard University 1923.

Tabel VI.

MINIMUM HOORBARE INTENSITEIT IN 10^{-8} ERGS
PER CM² PER SEC.

Toon- hoogte	WIEN (VII)	KRANZ (VIII)	FLETCHER en WEGEL (XVI)	MEYER (XVIII)	WAETZMANN en HEISIG (XIX)
50	32000				
64			54000		
100	140			778	
128		1000	1882		
200	1,2			60	
256		2,5	86,4		
340					10
400	0,016			2,4	
512		0,17	9,6		
725					0,5
800	0,00080			0,6	
860					0,3
1024		0,2	2,4		0,2
1330					0,1
1600	0,00025			0,087	
2048		0,13	1,9		0,2
2750			1,5		
3200	0,00025			0,069	1
4096		0,25			
4350					5
6400	0,00080			0,024	
12800	0,0090			2,4	

dat bij de minimum hoorbare intensiteit wordt opgenomen, wordt gemeten en met behulp van het rendement de drempelwaarde bepaald. De methode wordt toegepast voor metingen met de telefoon aan het oor, alsook in het vrije stralingsveld.

Verder zijn door verschillende onderzoekers⁴⁸⁾ vergelijkende metingen gedaan, waarop we hier niet nader willen ingaan.

Tenslotte zijn in tabel VI de minimum-energiewaarden volgens de voornaamste onderzoekingen weergegeven. Hieruit zien we belangrijke verschillen in de resultaten. Het grootst zijn deze tusschen de metingen van WIEN en die van de Amerikaansche onderzoekers KRANZ en FLETCHER—WEGEL. De uitkomsten van MEYER en die van WAETZMANN en HEISIG liggen hier tusschen in en wel dichter bij de laatst genoemden. Ook in het relatieve verloop vindt men belangrijke verschillen.

§ 2. *Eigen metingen.*

Met behulp van formule (22) in hoofdstuk III:

$$P = 0,0013 n^2 \xi_s$$

kunnen we de waarneembare minimum drukamplitude vinden, door bij verschillende frequenties de bijbehorende centrumamplitude der telefoontrilplaat ξ_s te meten. Deze formule gold voor een afstand van 20 cm. Op deze afstand bevond zich het oor van de proefpersoon. Deze had een normaal gehoor en was 20 jaar oud. De metingen vonden plaats in het in hoofdstuk II beschreven vertrek en wel 's morgens vroeg. Daar het gebouw midden op het groote ziekenhuisterrein, vrij van elke verkeersweg, ligt, was de omgeving uiterst stil. Het minimum werd ingesteld door middel van een potentiometer, waarop de toevoer-

⁴⁸⁾ Bijv. LANGENBECK: Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. Bd. 226 1930 p. 11.
JANOVSKY: El Nachr. Techn. Bd. 6 1929 p. 425.

Tabel VII.

Toonhoogte	Minimum-waarde van ξ_s in microns
96	8,2
128	2,1
192	0,55
256	0,25
384	0,055
512	0,026
768	0,0043
1024	0,0032
1536	0,0025
2048	0,0017

draden van de telefoon waren aangesloten; tijdens dit instellen werd de stroom zoo nu en dan voor controle onderbroken. In tabel VII zijn voor toonhoogten tusschen 96 en 2048 trillingen per sec. de minimumwaarden van ξ_s aangegeven; deze waarden zijn gemiddelden uit enkele waarnemingen.

De hieruit volgende waarden voor de energiestroom in het vrije stralingsveld, waarbij dus afgezien wordt van storingen ten gevolge van reflectie door de schedel⁴⁹⁾ e. d., zijn opgenomen in tabel VIII. Hierin vindt men tevens de bijbehorende waarden voor de drukamplitude uitgedrukt in duizendste dynes per cm².

⁴⁹⁾ Cf. VON BEKESY: Ann. d. Physik. Bd. 14 1932 p. 51.

Tabel VIII.

Toonhoogte in sec. — 1	Minimum energiestroom in 10^{-8} ergs per sec. per cm^2	Drukamplitude in 10^{-3} dynes per cm^2
96	114	9,8
128	24	4,5
192	8,1	2,6
256	5,3	2,1
384	1,5	1,1
512	0,94	0,89
768	0,13	0,33
1024	0,23	0,44
1536	0,71	0,77
2048	1,02	0,92

§ 3. Conclusie.

Uit tabel VIII volgt voor het betreffende oor een maximum gevoeligheid van 10^{-9} ergs per sec. per cm^2 voor een toonhoogte van ongeveer 800 trillingen per sec. Zoowel voor lagere als voor hogere tonen neemt de gevoeligheid af. Dit is speciaal voor de hoge tonen in overeenstemming met het werk van WAETZMANN en HEISIG. Andere onderzoekers vinden deze afname eerst bij veel hogere tonen. Ook de grootte-orde der uitkomsten komt goed overeen met deze onderzoekers. Van belang is op te merken, dat de waarnemingen in 't geheel niet overeenstemmen met die van WIEN (VII), welke ook plaats vonden met een telefoon, waarvan de minimum hoorbare amplitude

gemeten werd. Vergelijken we onze metingen met die van FLETCHER en WEGEL, dan wijzen de onze op een iets grootere gevoeligheid.

Dat een maximum gevoeligheid bij toonhoogte 800 gevonden wordt, is in overeenstemming met het werk van TRÖGER⁵⁰⁾, die vindt dat de weerstand van het trommelvlies een minimum bereikt bij 800 trillingen per sec.

Indien we nu de mogelijke oorzaken voor deze grote verschillen nagaan, dan kunnen deze eenerzijds van fysieke aard, doch anderzijds ook van physiologische en psychologische aard zijn.

Fysisch kunnen natuurlijk fouten gemaakt worden in de absolute bepaling. Zoo vindt bij de Amerikaansche onderzoekers ijking plaats door middel van een condensator-microfoon of met een thermofoon, waarbij dan het oor vervangen wordt door een ruimte van hetzelfde volumen. Hierbij wordt geen rekening gehouden met het feit dat de wanden van de gehoorgang zacht zijn, terwijl ook het trommelvlies meegeeft. Bij WIEN (VII) worden absolute waarden verkregen door amplitudemeting der telefoon-trilplaat, hetgeen in de gebruikte methode echter alleen mogelijk is voor lage tonen. De voor de hoogere frequenties gebruikte telefoons worden telkens geïkt door vergelijkende minimumbepalingen der gehoorintensiteit in de van twee opeenvolgende telefoons gemeenschappelijke frequentieband. Sommige onderzoekers vinden hun drempelwaarden door over een groot gebied te extrapoleeren, doordat de gebruikte methoden zich niet leenen voor metingen bij de grenswaarden. Ook hierdoor kunnen fouten optreden. Op de invloed van minder goede toonzuiverheid is in het tweede hoofdstuk reeds de aandacht gevestigd. Tenslotte beïnvloedt de hoedanigheid van het vertrek de metingen; reflectie

⁵⁰⁾ TRÖGER: Phys. Zeitschr. Bd. 31 1930 p. 26.

tegen de wanden of andere voorwerpen veroorzaakt staande golven, waardoor metingen in het vrije stralingsveld onbetrouwbaar worden, indien men er geen aandacht aan besteedt.

Wat de physiologische en psychologische invloeden betreft, moet in de eerste plaats gewezen worden op de individuele verschillen, die ook voor normaalhoorenden belangrijk kunnen zijn. Ook de momenteele toestand van de proefpersonen, aandachtsschommelingen, storende geluiden van buiten af, vermoeid worden van het gehoor, vooral indien met aangehouden tonen gewerkt wordt, zijn alle factoren, welke de meetresultaten beïnvloeden. Ook het feit of de metingen 's nachts dan wel overdag, buiten- of binnenshuis of zelfs in een camera silenta plaats vinden, heeft invloed op de uitkomsten.

In elk geval kunnen we hieruit concludeeren, dat de metingen veel betrouwbaarder worden, indien de minima bij een groot aantal normale proefpersonen bepaald worden en daarvan het gemiddelde genomen wordt. Het verrichten van een dergelijke reeks waarnemingen ligt dan ook in de bedoeling en zal elders besproken worden.

SUMMARY.

In this thesis a method is described of measuring the intensity of sound, more especially of weak sounds, down to energy values of 10^{-10} ergs per cm^2 per sec.

In the first chapter a number of formulas are mentioned regarding the energetics of sound. A relation is obtained for the radiating power from a vibrating circular plate, clamped at the edge, and compared with the results of other investigators. The literature concerning absolute measurements of the intensity of sound is discussed.

The second chapter contains the description of the measuring apparatus and the methods used. A beat frequency generator of high quality for audible currents (note 18, page 15) has been used, while a telephone receiver, connected with it, served as a source of sound. Special attention has been devoted to the purity of the sound.

The amplitude of the vibration of the transmitter has been measured in two different ways: A. by an optical method, by which the central amplitude for various frequencies is directly measured under a microscope, down to a value of 1μ , B. by a system of frequency modulation, in which the vibrating plate is used as part of a condenser microphone, and which measures the average amplitude. In this way far smaller amplitudes down to $0,001 \mu$ can be detected.

With a stethoscope and condenser microphone the distribution of amplitude over the plate surface has been examined and the experimental value of the form factor,

thus measured, checked with the theoretical value. In order to find the intensity in any point of the sound field from the value of the transmitter amplitude, the formula for the radiating power must be corrected for the deviation of the space distribution from the ideal case. In chapter III this is determined, by investigating how the pressure amplitude depends upon the distance and the direction from the source. An exactly similar instrument is used as sound receiver, which also has been calibrated for absolute pressure amplitude. In this way the accuracy obtained is smaller than in the transmitter case. Both these calibrations have been checked at the same time by measuring the amplitude ratio of transmitter and receiver, which agreed with the theoretical value. Because of the greater accuracy the transmitter is to be preferred as standard of absolute intensity.

In chapter IV some measurements of the audibility threshold are described and compared with the results of other investigators. The maximum sensitivity is found at about 800 vibrations per second and an energy flow of 10^{-9} ergs per cm^2 per sec. The results give a somewhat greater sensitivity than that given by FLETCHER and come nearer to those of WAETZMANN and HEISIG.

The researches have been carried out in the otological laboratory of the Groningen University.

