



De gevoeligheid van het menselijk oor voor de verschillende tonen der toonladder

<https://hdl.handle.net/1874/255195>

A 40192

Med. 29 juni 1905

De gevoeligheid

van het

Menschelijk oor

voor

de verschillende tonen der toonladder.

H. F. MINKEMA.



DE GEVOELIGHEID VAN HET MENSCHELIJK OOR

voor de

VERSCHILLENDE TONEN DER TOONLADDER.

2 9/5

AAN DE NAGEDACHTENIS

MIJNER

OULDERS.

Diss. Utrecht 1905

DE GEVOELIGHEID VAN
HET MENSCHELIJK OOR VOOR
DE VERSCHILLENDE
TONEN DER TOONLADDER

PROEFSCHRIFT TER VERKRIJGING VAN DEN
GRAAD VAN DOCTOR IN DE GENEESKUNDE
AAN DE RIJKS-UNIVERSITEIT TE UTRECHT
NA MACHTIGING VAN DEN RECTOR MAG-
NIFICUS DR. J. M. S. BALJON HOOGLEERAAR
IN DE FACULTEIT DER GODGELEERDHEID
VOLGENS BESLUIT VAN DEN SENAAAT DER
UNIVERSITEIT TEGEN DE BEDENKINGEN
VAN DE FACULTEIT DER GENEESKUNDE
TE VERDEDIGEN OP DONDERDAG 29 JUNI 1905.
DES NAMIDDAGS TE 3 UREN DOOR
HARMEN FREDERIK MINKEMA ARTS
° ° ° GEBOREN TE LEEUWARDEN ° ° °

FIRMA KAREL F MISSET
ARNHEM



Bij het verschijnen van dit proefschrift is het mij eene aangename taak, U Hoogleeraren, Lectoren en Assistenten der Medische en Philosophische faculteit, mijnen dank te betuigen voor het van U genoten onderwijs.

U Hooggeleerde ZWAARDEMAKER, Hooggeachte Promotor, betuig ik hierbij in het bijzonder mijne erkentelijkheid voor de hulp en voorlichting, die ik niet alleen bij het samenstellen van dit proefschrift, doch ook als assistent in de oorheelkunde, in zoo ruime mate van U mocht ondervinden.

Bovendien nog mijnen dank aan de Heeren QUIX en DE JONG, voor de hulp mij bij het nemen der proeven verleend.

INHOUD.

Blz.

HOOFDSTUK I.

Literatuur over boven- en benedengrens der toonladder en over bepalingen van minima perceptibilia	1
--	---

HOOFDSTUK II.

Proeven in de open lucht genomen op de heide te Milligen	15
--	----

HOOFDSTUK III.

Proeven in eene besloten ruimte, genomen in de universiteits- bibliotheek te Utrecht	28
---	----

HOOFDSTUK IV.

Proeven genomen in het austisch kamertje in het Physiolo- gisch laboratorium te Utrecht	35
--	----

HOOFDSTUK V.

Gevolgtrekkingen	49
----------------------------	----

HOOFDSTUK I.

Zooals bekend is, verstaat men onder de toonladder eene volgens opklimmend trillingsgetal gerangschikte reeks van tonen. Deze reeks is continue, en strekt zich uit tusschen twee uiterste, voor het menschelijk gehoor waarneembare tonen, die men de grenstonen noemt.

Over de juiste ligging dier grenstonen aan den beneden- en den bovenkant der scala, bestaat eene uitgebreide literatuur, hetgeen niet belet, dat men ook nu nog in twijfel verkeert. Een kort historisch overzicht moge hier volgen.

CHLADNI. ¹⁾ Deze gebruikte om de benedengrens te bepalen eene zeer lange snaar. Door deze al door te verkorten, ging hij na, wanneer voor het eerst een toon werd gehoord. Pas bij 16 trillingen trad eene duidelijke toongewaarwording op. Daar eene snaar echter niet vrij is van boventonen, en de 1^e boventoon vrij sterk optreedt, is het lang niet zeker, of de door CHLADNI gehoorde toon de grondtoon, dan wel de 1^e boventoon is geweest.

SAVART ²⁾ gebruikte zijn bekend tandrad, dat bij draaiing door 't schuren langs eene kaart van karton, elken gewilden toon kan voortbrengen. Deze onderzoeker meende, dat een toon van 7—8 trillingen nog gehoord werd. Hierbij geldt echter dezelfde tegenwerping als bij CHLADNI, dat in werkelijkheid niet de grondtoon maar de eerste boventoon is gehoord.

¹⁾ CHLADNI. Die Akustik. Leipzig 1802. p. 2 en 36.

²⁾ SAVART. Annalen der Physik und Chemic 1831 bd. 22. p. 596.

HELMHOLTZ ¹⁾ toonde aan, dat het bij de bepaling van de toongrenzen er vooral op aankomt, de intensiteit van het geluid sterk genoeg te maken, daar ons oor voor lage tonen veel ongevoeliger is dan voor eenigszins hoogere. Bovendien moet men om storende en verwarring gevende boventonen te vermijden, eene geluidsbron kiezen, die volkomen sinusvormige trillingen voortbrengt. Het best hiervoor geschikt zijn wijde gedekte orgelpijpen. Bij bepalingen hiermede zijn tonen lager dan *E*, nauwelijks waar te nemen. In de muziek worden dan ook geene tonen lager dan *C*, van 32 trillingen, gebezigd. Tonen van minder trillingsgetal dan 32 worden door ons oor hoofdzakelijk als eene reeks van schokken, en alleen in de subcontra-actaaf als eene soort brommen opgevat. Met stemvorken van KÖNIG, bezwaard door loopgewichten, hoorde HELMHOLTZ niet eerder eenen toon dan bij 28 trillingen. Ook snaren kan men gebruiken. Brengt men n.l. in het midden eene verzwaring aan, dan liggen de nog optredende boventonen twee tot drie octaven hooger dan de grondtoon, waarmede ze dus niet licht verward worden. Met snaren maakten echter reeds tonen van 34 trillingen eenen stootenden dreunenden indruk.

PREYER ²⁾ liet metalen tongen maken, geborgen in glazen kastjes. Deze tongen geven sterke boventonen. Laat men hen echter grootendeels uitklinken en luistert dan, met het oor dicht bij het kastje geplaatst, dan krijgt men duidelijk den lagen grondtoon te hooren. Met zulke tongen werd door PREYER nog duidelijk een toon van 14 trillingen gehoord. De amplitudo was zeer groot, toch was de geluidsindruk zeer zwak, waaruit dus weer blijkt, dat men om de juiste ondergrens te bepalen tonen van zeer sterke intensiteit moet nemen.

APPUNN ³⁾ deed proeven met eene buigzame staallamelle, aan het vrije uiteinde voorzien van eene verbreeding. Met deze lamelle meende APPUNN nog duidelijk eenen toon te hooren, als de lamelle 8 trillingen uitvoerde.

ZWAARDEMAKER ⁴⁾ en CUPERUS ⁵⁾, namen bij hunne onderzoekingen omtrent den omvang van het gehoor in verband met

¹⁾ HELMHOLTZ. *Lehre von den Tonempfindungen* 1863. p. 275.

²⁾ PREYER. *Sammlung physiologischer Abhandlungen*. Jena 1877. p. 1.

³⁾ APPUNN. *Berichte der Westerauische Gesellschaft*. bd. 1887—88.

⁴⁾ ZWAARDEMAKER. *Tijdschrift voor Geneeskunde*, 1892 I. p. 502.

⁵⁾ CUPERUS. *Dissertatie* Leiden 1893. De gehoorgrens voor hooge en lage tonen.

den leeftijd de ondergrens, voor den jeugdigen leeftijd, bij 10 trillingen aan, eveneens afgaande op bepalingen met de staallamelle van APPUNN.

VAN SCHAIK ¹⁾ echter toonde aan, dat de lamellen-tonen waar APPUNN, ZWAARDEMAKER en CUPERUS hunne lage benedengrens mede verkregen, volstrekt niet zonder boventonen waren. In de lucht om de lamelle heen n.l. vormen zich boventonen en wel zeer sterk de 1e boventoon, zoodat het zeer goed mogelijk is, dat de gehoorde lage toon niet van 10, doch van 16 trillingen is geweest.

BATTELLI ²⁾ toonde voor stemvorken hetzelfde aan als VAN SCHAIK voor de lamellen. Hij kon zelfs dien eersten sterken boventoon registreeren. Aan de voorwaarde, die HELMHOLTZ gesteld heeft, dat men eene geluidsbron moest nemen, zonder boventonen, werd naar het schijnt voldaan door SCHÄFER. ³⁾ Deze wekte n.l. met sirenes intermissietonen op. Door deze al lager te nemen, kwam hij ten slotte tot eene grens bij 16 trillingen. Intermissietonen nu geven, daar zij van physiologischen aard zijn, geene boventonen, zoodat uit deze bepaling afdoende zou blijken, dat de benedengrens bij eenen toon van 16 trillingen ligt, een cijfer, waartoe het meerendeel der onderzoekers gekomen is. In eene latere publicatie echter in het „Handbuch der Physiologie van NAGEL van 1905”, in welk handboek SCHÄFER het hoofdstuk Akustik behandelt, spreekt hij niet meer over dien physiologischen aard der intermissietonen. Misschien heeft zijne meening daaromtrent zich gewijzigd?

Evenals voor de benedengrens loopen de bepalingen over de bovengrens uit elkaar, ja nog veel sterker.

CHLADNI ⁴⁾ vermoedde, dat de bovengrens niet veel hooger zou liggen dan c^6 .

SAVART ⁵⁾ kwam met zijn tandrad tot toonshoogten van 24000 trillingen, die nog gehoord werden. Op nog eene andere manier werden tonen opgewekt, n.l. door eene snel ronddraaiende stalen

¹⁾ V. SCHAIK. Extrait des Archives Néerlandaises, tom. 29, p. 87.

²⁾ BATTELLI. Archives italiennes de biologie, 127, p. 202.

³⁾ SCHÄFER. Zeitschrift für Physiologie der Sinnesorganen, bd. 21, 1899. p. 172.

⁴⁾ CHLADNI. Die Akustik. Leipzig 1802.

⁵⁾ SAVART. Annalen der Physik und Chemie, bd. 22, 1831.

staaf, waarvan de aan den zijkant bevestigde plaatjes telkens tegen een er bij gehouden, op een statief bevestigd, plaatje slaan. Hiermede werden geene tonen van hooger trillingsgetal dan 16000 gehoord.

DESPRETZ ¹⁾ vervaardigde zeer kleine stemvorken, en verkreeg tonen, die theoretisch berekend van 36000 trillingen waren. Slechts enkele jonge personen echter hoorden deze hooge stemvorken.

PREYER ²⁾ bepaalde de bovengrens met allerlei stemvorken, die van DESPRETZ, APPUNN e a. Hij meent, dat men geene vaste bovengrens kan aannemen, daar voor een groot aantal normaal hoorenden de grenston uiteenliep van 16000—30000 trillingen en nog hooger.

ZWAARDEMAKER ³⁾ heeft bij zijne onderzoekingen over de hoorgrenzen met het oog op den leeftijd, bemerkt, dat al naar de mensch ouder wordt de bovengrens lager komt te liggen. Deze inkrimping begint reeds in het 4^e jaar en gaat steeds door, zoodat ze op $\pm$ 60-jarigen leeftijd ongeveer 5 halve tonen bedraagt. De hoogste tonen nu, alleen voor kinderen waarneembaar, lagen bij f^7 , voor oudere kinderen bij e^7 , dus bij eenen toon van 21000 trillingen. Voor iemand van 30 jaar bij dis^7 bij eenen toon van 18000 trillingen. Voor iemand van 40 jaar bij d^7 van 50 jaar bij c^7 en bij grijsaards ongeveer bij b^6 . Als geluidsbronnen dienden een Galtonfluit en klankstaven, geleverd door de fabriek van KÖNIG.

CUPERUS ⁴⁾ bepaalde de bovengrens eveneens met een Galtonfluitje, geijkt volgens de methode van ZWAARDEMAKER en v. D. PLAATS en daarna vergeleken met de klankstaven van KÖNIG. Het resultaat was, in verband met den leeftijd, dat bij kinderen de bovengrens lag bij a^7 , op middelbaren leeftijd bij dis^7 en op 70-jarigen leeftijd bij a^6 .

MELDE ⁵⁾ gebruikt eene stemvorkserie, door APPUNN vervaardigd, om de bovengrens te bepalen. Hijzelf hoorde tonen van hooger trillingsgetal dan 11000 niet meer. Hij ging eerst van de stem-

¹⁾ DESPRETZ. Comptes rendus, 1845, p. 1214, tom. 20.

²⁾ PREYER. Sammlung Physiologische Abhandlungen. Jena, 1877. p. 19.

³⁾ ZWAARDEMAKER. Das presbyacusiche Gesetz. Zeitschrift für Ohrenheilkunde, bd. 24, 1893. p. 303.

⁴⁾ CUPERUS. Dissertatie Leiden, 1893.

⁵⁾ MELDE. Wiedemann's Annalen. Bd. 51 N. f. 1894. p. 661.

vorken de toonshoogte na, volgens eene vibromicrographische methode. De te onderzoeken stemvork schreef n.l., vlak onder eene stemvork van bekend trillingsgetal, op een licht ingevet glasplaatje, dat men er snel langs trok, hare trillingen op. Onder het microscoop werden dan de twee reeksen trillingen vergeleken en zoo berekend. Hij kwam tot de conclusie, dat de bij de stemvorken opgegevene trillingsgetallen juist waren. Daar nu eene stemvork van APPUNN met een trillingsgetal van 40.000 nog gehoord werd, zou dus de bovengrens zeer hoog, bij eenen toon van 40.000 trillingen liggen.

STUMPF en MEIJER ¹⁾ bedienden zich eveneens van de serie stemvorken van APPUNN Sr. en eene reeks fluitjes van APPUNN Jr. en Galtonfluitjes. Om hiermede de juiste toonshoogte te bepalen lieten zij deze geluidsbronnen door samenklinken met andere bekende stemvorken, verschiltönen geven. De hoogte van deze verschiltönen werd op het gehoor door vergelijking met stemvorken bepaald. Zij lieten b.v. een Galtonfluitje unisono klinken met eene stemvork van bekend trillingsgetal. Nu werd een ander fluitje unisono met het 1^e gesteld en de standen genoteerd. Werd nu de toonshoogte van het 1^e fluitje door verkorting van de luchtkamer steeds verhoogd, dan traden eerst zwevingen, later duidelijk verschiltönen op. De hoogte van zulk eenen verschiltoon werd bepaald, en hiermede was tevens de toonshoogte van het fluitje bij die instelling bekend. Op deze manier steeds hoger tonen nemende, werd door hen eene bovengrens gevonden bij a^6 , een toon van 14000 trillingen. Op dezelfde manier de serie fluitjes van APPUNN Jr. nagaan, waarmede volgens den maker tonen verkregen werden van 50880 (gis^8), trillingen, die nog gehoord werden, bleken echter de opgegeven trillingsgetallen niet juist. Het fluitje van 50880 trillingen gaf er slechts 11000. Daarna werden de stemvorken van APPUNN Sr. nagegaan. Ook hierbij bleken de opgegeven trillingsgetallen te hoog. Zij gingen slechts tot 15330. De bepalingen van APPUNN en MELDE, met deze stemvorken, waarbij de grens bij eenen toon van 40000 trillingen lag, zijn dus onjuist geweest.

KÖNIG ²⁾ vervaardigde eene serie stemvorken, waarbij de hoogste tot f^7 ging. De beenen van deze stemvork waren slechts 14

¹⁾ STUMPF und MEIJER. Wiedemann's Annalen. Bd. 61 V. f. 1897. p. 760.

²⁾ KÖNIG. Wiedemann's Annalen. Bl. 69, 1899 N. F.

mM. lang, en even breed. Deze stemvork was zeer lastig aan het trillen te brengen, en werd dan slechts door weinige en alleen jongere personen gehoord. De toonhoogte van zijne stemvorken bepaalde KÖNIG door vergelijkingen en het optreden van zwevingen met lagere vorken. Hij merkte duidelijk aan zich zelf, dat de leeftijd invloed heeft op het hooren van zeer hoge tonen. Op 43 jarige leeftijd hoorde hij n.l. f^7 , toen hij 57 jaar was hoogstens e^7 en in zijn 67^e jaar, zelden nog d^7 . Later bepaalde KÖNIG de toonhoogte van zijne stemvorken door middel van de stoffiguren van KUNDT. De bepalingen waren ook met de hoogste stemvorken zeer goed uitvoerbaar en betrouwbaar, en de uitkomsten kwamen vrijwel overeen met die door middel van de zwevingen gevonden. Met zijne klankstaven de bovengrens bepalend, kwam KÖNIG ook tot f^7 .

SCHWENDT ¹⁾ bepaalde nog eens nauwkeurig de stemvorkserie van KÖNIG, en wel door middel van de stoffiguren. Goede resultaten werden verkregen door de figuren in lycopodiumpoeder op te laten treden.

Het bleek toen, dat de trillingsgestalten bijna volkomen overeenkwamen met de door KÖNIG opgegevene. Ook met de klankstaven traden de figuren op, ofschoon minder gemakkelijk. Zeer gemakkelijk en duidelijk daarentegen traden de figuren op met de Galtonfluit. Ook hiermede was weer de hoogste nog te hooren toon, de f^7 .

EDELMANN ²⁾ heeft, naar aanleiding van de resultaten door SCHWENDT met de stoffiguren verkregen, dit middel gebruikt om zijne nieuw model Galtonfluiten te ijken. Voor elk instrument, dat nu wordt afgeleverd, is op die manier met opgave van cylinderhoogte en daarbij passende »maulweite» de toonhoogte bepaald. Zoo wordt nu opgegeven, dat bij eene cylinderhoogte van 0,2 mM. de fluit eenen toon geeft van 54900 trillingen, die nog gehoord zou worden. EDELMANN komt dus tot veel hogere bovengrens, dan de meeste onderzoekers.

Eene kritiek op de manier van ijken, en vooral op de conclusies, die Edelmann er uit trekt, is niet uitgebleven.

MIJERS ³⁾ heeft behalve pijplengte en »maulweite» ook nog gelet

¹⁾ SCHWENDT. Archiv für die gesammte Physiologie bd. 75. p. 346.

²⁾ EDELMANN. Zeitschrift für Ohrenheilkunde, bd. 36, 1900. p. 1.

³⁾ MIJERS. Journal of physiology, vol. 28, 1902, p. 417.

op de luchtdrukking, waarmede men de Galtonfluiten aanblaast. Het bleek, dat zoowel de intensiteit als de toonshoogte van het geluid sterk wisselden, al naar de gebruikte luchtdrukking. De toonshoogten werden met de gevoelige vlammen en de stoffiguren van KUNDT bepaald. Zoo vindt MIJERS b.v. voor eene pijplengte van 1,3 mM. en 0,8 »maulweite”;

Bij 36 mM. druk n. = 5673.

» 109 » » » 10942.

» 608 » » » 23315.

» 800 » » » 28332.

EDELMANN geeft alleen op, dat de pijp bij die afmetingen eene toonshoogte heeft van $a^7 = 28000$ trillingen. Dit hooger worden van den toon berust waarschijnlijk op het optreden van boven-tonen. Nu werd nog nagegaan of inderdaad een toon van 50000 trillingen hoorbaar is, zooals EDELMANN opgeeft.

Het gelukte MIJERS nooit in het volgens de bijgegeven tabel hoorbare hoge geluid, trillingen van 50.000 in de stoffiguren, op welke manier ook, zichtbaar te maken. Een enkele maal kon bij zacht aanblazen, een toon te zwak om te bepalen, worden gehoord. Bij sterker aanblazen hoorde men echter geen toon. MIJERS komt dan ook tot de conclusie, dat bij het gebruik van de Galtonfluit de toonshoogten sterk wisselen met de gebruikte luchtdrukking, en dat met zekerheid alleen tonen tot f^7 met 21080 trillingen gehoord kunnen worden.

Gaan we dus de bepalingen omtrent de bovengrens na, dan blijkt ook deze niet vast te staan. Wel mag men aannemen, dat met sterk wisselende individueele verschillen de bovengrens niet hooger zal liggen dan bij eenen toon van 21000 trillingen. Nu gaat nog, volgens de presbyacusische wet aan de benedengrens eene sext, aan de bovengrens eene septime verloren, zoodat in het gunstigste geval in de jeugd. de scala van voor het oor waarneembare tonen, zich over $10\frac{1}{2}$ octaven van C_2 tot f^7 uitstrekt.

Uit boven aangehaalde bepalingen blijkt dus, dat een normaal oor eene reeks tonen van C_2 tot f^7 kan hooren. Doch ons oor is lang niet even gevoelig voor al die tonen.

Reeds lang bekend is het, dat het voor hoogere tonen gevoeliger is dan voor lagere. Een kort overzicht van de literatuur hieromtrent moge hieronder gegeven worden.

HELMHOLTZ zegt in zijne »Lehre von den Tonempfindungen" naar aanleiding van proeven met de sirene, dat hooger tonen zonder meer energieverbruik toch eenen sterkeren indruk op ons gehoor maken, dan lagere. Van algemeene bekendheid is, dat het hooge sopraangeluid veel sterker indruk maakt dan het lage basgeluid. Dit alles zijn echter slechts vage aangiften.

Zekere gegevens verkreeg men pas, toen men de kleinste hoeveelheid energie ging berekenen, noodig om eene toongewaarwording op te wekken, m.a.w. toen men den *prikkelingsdrempel* voor ons gehoor ging bepalen voor de verschillende tonen der toonladder, en de hiervoor noodige acustische energie in natuurkundigen zin uitdrukte.

Eene eerste bepaling had plaats in 1870 door TÖPLER en BOLZMANN ¹⁾. Zij bepaalden rechtstreeks in eene gedekte orgelpijp de amplitudo der geluidsgolven. Zij lieten hiertoe, vlak boven en vlak onder het zeer dunne deksel van eene van glazen zijwanden voorziene gedekte orgelpijp, eenen snel intermitteerenden lichtbundel vallen. Beide bundels vallen nu door een interferentieprisma, geplaatst met het brekende vlak in het vlak van het deksel der orgelpijp. In het verder verloop van deze nu interfereerende lichtbundels, kan men met eene loupe zeer goed en scherp de ontstane interferentielijnen van FRESNEL beschouwen. Bij het aanspreken van de pijp ondergaat de onderste der lichtbundels zeer snelle vertragingen en versnellingen, isochroon met de geluidstrillingen. De interferentie-figuur zal daardoor eveneens evensnel medetrillen. Door nu den lichtbundel sterk intermitteerend te maken, door z.g. stroboscopisch zien, gelukte het de interferentiefiguur voldoende langzaam te doen trillen. Door den tijd van trilling en den uitslag van de interferentiefiguur te bepalen, kon de amplitudo van de geluidsgolven in de pijp berekend worden. De uitgezonden energie in acustischen zin was dus bekend. Met deze pijp werd in de buitenlucht nagegaan, natuurlijk bij gelijk luchtverbruik en luchtdruk als bij de amplitudometing, op welken afstand nog juist een geluidsindruk werd waargenomen. Zij vonden voor deze pijp van de toonhoogte $g \ 9900 \times 10^{-8}$ Erg per cm^2 . en per seconde. Jammer genoeg is op deze exacte manier slechts deze g bepaald. Na deze onder-

¹⁾ TÖPLER en BOLZMANN. Annalen der Physik und Chemie, bd. 21, blz. 306, 1870.

zoekers, en wel door Lord RAYLEIGH, ¹⁾ is in 1877 wederom eene enkele bepaling verricht. Deze gebruikte eveneens eene orgelpijp en wel eene van de toonshoogte f^4 . De toegevoerde energie uitgedrukt door luchtverbruik en luchtdruk, breidde zich naar zijne berekening op een vrij veld, over eenen halven bol uit, met den afstand van de pijp tot de hoorgrens als straal. De hier aankomende energie bedroeg per cm^2 . en per seconde 4500×10^{-8} Erg. Ook door dezen onderzoeker is slechts eene bepaling gedaan op deze manier.

In 1883 volgde eene publicatie van WEAD ²⁾. Deze onderzoeker gebruikte als geluidsbron eene stemvork en mat daarvan microscopisch de amplitudines. Uit de afname van de amplitudo werd nu de per tijdseenheid afgegeven hoeveelheid energie berekend. Met deze stemvorken wederom buiten de hoorgrens bepalend, kwam WEAD tot de volgende absolute gegevens.

p. cm^2 . p. sec.	p. cm^2 . p. sec.
$c = 7950 \times 10^{-8}$ erg	$c^2 = 1100 \times 10^{-8}$ erg
$c^1 = 295$	$g^2 = 1590$
$g^1 = 260$	$c^3 = 710$

Door WEAD is dus voor een grooter gedeelte van de toonladder den prikkelingsdrempel bepaald.

In 1888 volgde een onderzoek van WIEN ³⁾. WIEN gebruikte resonatoren, waarvan de achterwand gevormd wordt door de kapsel van eenen aneroidbarometer. De uitslagen van deze kapsel nu worden door eene in 't midden opgeplaatste stift overgedragen op een loodrecht op de stift staand spiegeltje. De stiftuitslag is evenredig met de tangens van den draaiingshoek van het spiegeltje. Door op het spiegeltje een spleetbeeld van eene lichtbron te werpen, kan men uit de verbreeding van het spleetbeeld tijdens het trillen den draaiingshoek en daaruit den resonatoruitslag berekenen. De eigenlijke geluidsbron was een telefoon; door middel van door eene stemvork onderbroken wisselstroomen, gaf deze een constant en sterk geluid. De amplitudo

¹⁾ RAYLEIGH. Proceedings of the Royal society, t. 26 p. 248, 1877.

²⁾ WEAD. American Journal of science, vol. 26, 1883, p. 177.

³⁾ WIEN. Wiedemann's Annalen, bd. 36, p. 384.

van de luchttrillingen is dus te meten in den resonator. Door de wisselstroomen ter opwekking van den telefoontoon zeer zwak te maken, kon de resonatortoon ook verzwakt worden. Op die manier werd de prikkelingsdrempel bepaald. Door de meting van 't aantal schaaldeelen van het spleetbeeld op het spiegeltje en de daaruit te berekenen luchtamplitudo volgde dan de voor den prikkelingsdrempel noodige luchtamplitudo. Hieruit, volgens RAYLEIGH, de energie berekenend, die de lucht dan had, worden de waarden van WIEN de volgende:

Toonsoogte.	Energie per cm^2 . en per sec. in 10^{-8} Ergs.
a	857×10^{-8}
a ¹	612

ALLARD ¹⁾ geeft eene korte beschrijving over energiemeting, verricht bij klokken, fluiten en sirenes. De juiste manier, waarop de energie bepaald werd, wordt niet vermeld. De uitkomsten zijn de volgende, waarbij in de notaties van ALLARD T de toe te voeren energie is, n het trillingsgetal en x het aantal K.M. aangeeft waarop het geluid nog wordt gehoord.

Energien.	T.	n.	x.
Kleine klok.	0,33	800	1,89
Groote klok.	1,44	600	3,04
Hoorn.	2,5	650	3,37
Stoomfluit.	37,5	1500	4,9

Eene correctie aanbrengend voor den luchtweerstand en wel $b = \pm 0,473x$, vindt ALLARD de algemeene geldige formule voor de noodige energie en wel: $l = n \times 4,3 \times 10^{-8}$.

In 1904, dus 17 jaar na zijne eerste bepaling met de orgelpijp, zijn door RAYLEIGH ²⁾ wederom bepalingen verricht. Nu werden stemvorken gebruikt. Eene poging om orgelpijpen te vervaardigen, zoodanig, dat ze bij zeer geringen energie-toevoer toch behoorlijk aanspreken, was mislukt. Van de gebruikte stemvorken werd volgens de methode van WEAD onder het microscoop de ampli-

¹⁾ ALLARD. Comptes rendus t 95, p. 1062.

²⁾ RAYLEIGH. Philosophical Magazin, bd. 38, 1894, p. 365.

tudo gemeten en de wijze van uitklinken bepaald. Nu in de buitenlucht de voor het waarnemen van het drempelgeluid noodigen afstand bepalende, kwam RAYLEIGH tot de volgende uitkomsten :

Toonsoogte.	Luchtamplitude op de hoorgrens in cM.	Energie per cM ² . per sec. in 10 ⁻⁸ Ergs.
c ¹	6×10^{-9}	90×10^{-8}
g ¹	$4,6 \times 10^{-9}$	$43 \times$ »
c ²	$4,6 \times 10^{-9}$	43

In 1901 werd voor het eerst voor de geheele toonladder de prikkelingsdrempel bepaald, en wel door ZWAARDEMAKER en QUIX¹⁾. Deze onderzoekers gebruikten als geluidsbronnen: voor de lagere tonen van c, -g³ stemvorken, voor de middenoctaven orgelpijpen van c³-g⁵ en voor de bovenoctaven de Galtonfluit, nieuw model, c⁶-g⁶. Voor de stemvorken werd de methode van WEAD toegepast, ook wat de berekening aangaat, voor de orgelpijpen en de Galtonfluit de methode van RAYLEIGH. De resultaten van dit onderzoek zijn de volgende.

Geluids- bron.	Toon.	Trilling- getal.	Energie per cM ² . p. sec. in 10 ⁻⁸ Erg.	Energie op trommelvl. p. noodige periode.	Aantal noodige trillingen.
Stemvork.	c	128	5894×10^{-8}	$30,7 \times 10^{-8}$	2
	g	192	9900	36,6	2
	c ¹	256	2707	7,05	2
	g ¹	384	469	10,6	2
	c ²	512	1306	1,7	2
	g ²	768	3727	3,2	2
Orgelpijp.	c ³	1024	5530	3,6	2
	g ³	1536	6687	2,9	2
	c ⁴	2048	3486	1,14	2
	g ⁴	3072	3652	0,79	2
	c ⁵	4096	6564	1,33	2,5
	g ⁵	6144	8214	2,45	5,5
Galton.	c ⁶	8192	11124	9,00	20
	g ⁶	12288	18336	9,94	20

¹⁾ ZWAARDEMAKER en QUIX. Engelmann's Archiv für Anatomie und Physiologie. Supplement bd. 1902.

Het benodigde aantal trillingen is ontleend aan de onderzoeken van ABRAHAM en BRÜHL.¹⁾

Bijna gelijktijdig met bovenvermeld onderzoek verscheen eene publicatie van MAX WIEN²⁾, eveneens de geheele toonladder omvattend. WIEN bezigde als geluidsbronnen verschillende soorten van telefonen. Door zeer sterk varieerende wisselstroomen te gebruiken, waren in den telefoon tonen van elk gewild trillingsgetal op te wekken. Volgens WIEN is de amplitude van de telefoontrilplaat evenredig met de stroomsterkte, en is dus de intensiteit van den toon evenredig met het kwadraat van de stroomsterkte. De gevoeligheid van ons oor mag men in verband hiermede omgekeerd evenredig stellen met het kwadraat van den geringsten stroom, die een minimumtoon in de telefoon teweegbrengt. Op deze manier zijn door WIEN de volgende waarden gevonden.

Trillings- getal.	Energie p. cm^2 . in sec. in 10^{-8} Erg.	Energie op het trommelv. p. noodige trillingen.	Aantal noodige trillingen.
100	140×10^{-8}	7×10^{-9}	2
200	1,2	3×10^{-11}	2
400	0,016	3×10^{-13}	2
800	0,0008	7×10^{-15}	2
1600	0,00025	5×10^{-16}	2
3200	0,00025	3×10^{-15}	2
6400	0,0008	5×10^{-14}	5,5
12800	0,009		

De laatste der mij bekende onderzoeken op dit gebied is eene door WEBSTER³⁾ verricht, gepubliceerd in Oct 1903. Deze onderzoeker gebruikte een toestel, door hem »Phone» genoemd. Het bestaat uit eene stemvork, waarvoor een resonator is aangebracht, die aan den naar de stemvork gekeerden kant van eene trilplaat is voorzien. De stemvork nu (waarvan de amplitudo microscopisch wordt bepaald) deelt hare trillingen

¹⁾ ABRAHAM und BRÜHL. Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, bd. 18, p. 177.

²⁾ WIEN. Pflüger's Archiv. bd. 97 (1903). p. 1.

³⁾ WEBSTER. Mechanical efficiency of production of sound. Festschrift für Ludwig Boltzmann. 1904, p. 866.

door een verbindingsdraadje aan de trilplaat mee en het nu door den resonator versterkte geluid heeft eene te berekenen energie. Met dit toestel zijn door WEBSTER over een groot wateroppervlak, en over een grasveld bepalingen verricht. Van de uitgewerkte bepalingen is echter alleen die voor eene toonhoogte van c' aangegeven, en wel:

Toonhoogte.	Energie per cm^2 . per sec.	Energie op tr.vl. p. aantal periode.
c'	6144×10^{-8} Erg.	8×10^{-8} Erg.

Resumeerend, blijken er dus enkele onderzoeken gedaan te zijn door TÖPLER en BOLZMANN, RAYLEIGH, WEAD en WEBSTER over slechts een klein gedeelte van de toonladder, en twee onderzoeken, die van Zw. en Q. en van WIEN over de geheele toonladder. Vergelijkt men nu de resultaten dier met allerlei soorten van geluidsbronnen verrichte bepalingen, dan blijkt, dat de resultaten van 1^e onderzoekers vrijwel parallel verlopen met die van Zw. en Q., doch met die van WIEN groote verschillen opleveren. Doen we b.v. een greep uit de resultaten van ZWAARDEMAKER—QUIX en WIEN, dan vindt men:

N.	ZWAARDEMAKER—QUIX.		WIEN.	
	p. cm^2 . p. sec.	op tr.vl. p. trill.	per cm^2 . p. sec.	op tr.vl. p. aantal trill.
100	5894×10^{-8}	307×10^{-8}	140×10^{-8}	70×10^{-8}
3000	3653 »	0,7 »	0,0008 »	3×10^{-15}

Terwijl het verschil in de lagere octaven niet zoo groot is, is die in de hoogere zeer groot. Voor N. 3000 vindt WIEN een minimum 10 miljoen maal kleiner dan Zw. en QUIX. Ook het beloop van de uitkomst der bepalingen biedt verschil aan. Bij Zw. en Q. is het aan 't begin en einde van de toonladder veel glooiender, dan bij WIEN. Aan den anderen kant zijn er ook weer punten van overeenkomst. Zoo vinden beide, dat er slechts één minimum van gevoeligheid is, en dat dit minimum gelegen is $\pm$ bij g^4 .

Daar het nu om de groote verschillen, die de beide laatste reeksen opleveren, gewenscht was nog een onderzoek te verrichten, is de nu volgende reeks bepalingen gedaan. Om de eenvoudigste geluidsbron te nemen, werden alleen pijpen deels

van hout, deels van metaal gebruikt. Het onderzoek is gesplitst in drie onderdeelen.

Eene eerste reeks in de open lucht, op een geheel vlak en open heideveld in de buurt van het militair herstellingsoord te Milligen.

Eene tweede reeks in de boekengalerij van de universiteitsbibliotheek te Utrecht.

Eene derde reeks in een hiertoe in het Physiologisch laboratorium ingericht acustisch kamertje.

De eerste reeks, als de zuiverste, wat aangaat uitwendige omstandigheden, geniet het meeste vertrouwen. Ook door WIEN is er op aangedrongen, een eventueel te herhalen onderzoek in de open lucht te doen plaats hebben.

HOOFDSTUK II.

Proeven genomen op de heide te Milligen. Als geluidsbronnen werden gebruikt houten gedekte orgelpijpen van uniform maaksel en dezelfde houtsoort, gaande van C tot g^4 , in elk octaaf eene c en eene g. De afmetingen dier pijpen volgen hieronder in cM.

Toons- hoogte.	Lengte.	Diepte.	Breedte.	Hout- dikte.
C	110	10,5	8,5	0,9
G	70	8,3	6,7	0,7
c	51	7,3	5,8	0,7
g	32,2	5,8	4,7	0,7
c^1	23,2	4,8	4	0,6
g^1	15,2	3,9	3,4	0,6
c^2	9,5	3,7	2,9	0,6
g^2	5,5	3	2,6	0,5
c^3	3,9	2,8	2,3	0,45
g^3	2,3	2,3	2	0,4
c^4	1,5	2	1,7	0,4
g^4	1,2	1,6	1,4	0,3

Verder werd gebruikt een palmhouten gedekt fluitje, met verschuifbaren stempel voor de toonhoogten g^2 tot c^3 . De afmetingen daarvan zijn:

Toons- hoogte.	Lengte.	Diepte.	Breedte.	Hout- dikte.
g^2	8	2,5	2,2	0,45
c^3	5	,	,	,

Ook fluiten van andere constructie werden gebezigd, n.l. twee fluiten van EDELMANN te München, gebouwd volgens het principe der stoomfluiten met verschuifbare mondopening (Maulweite). De grootste dezer fluiten, tonen voortbrengend van e^2 tot en met a^4 , heeft de volgende afmetingen. De lengte van de luchtkolom is als de fluit den toon e^2 voortbrengt 11,2 cM.; geeft de fluit a^3 te hooren, dan 3,2 cM. De doorsnede van de luchtkamer is 1,8 cM., terwijl de mondopening 3 mM. bedraagt.

De kleinste fluit, tonen gevende van a^3 tot en met a^4 , heeft de volgende afmetingen. De lengte van de luchtkolom is, als de fluit a^3 weergeeft 4,3 cM.; geeft ze a^4 , dan 0,8 cM. De doorsnede van de luchtkamer is 0,7 cM., terwijl de mondopening 2 mM. bedraagt.

Voor tonen hooger dan a^4 werd gebruik gemaakt van een nieuw model Galtonfluitje, vervaardigd door EDELMANN. Volgens eene opgave, in de er bij geleverde tabel, kan de toonhoogte door verandering in lengte der luchtkolom en van mondopening gewisseld worden om alle nog hoorbare tonen van af a^4 voort te brengen.

Om ons de voor het aanblazen der pijpen benoodigde lucht te leveren, werd van eenen spirometer van HUTCHINSON gebruik gemaakt. Genoemde spirometer toch heeft het voordeel gemakkelijk transportabel te zijn en onder bepaalde voorzorgen eenen regelmatig en luchtstroom te leveren, met voor het aanblazen der pijpen voldoende drukking. Eene beschrijving van de inrichting van den spirometer moge hier volgen.

Aan de tusschen de katrollen zich bevindende dwarslat wordt een aanzetstuk van koper gehaakt. Van boven is dit stuk voorzien van eene conische uitholling, waarin goed sluitend de pijpen zijn te bevestigen. Deze conische uitholling eindigt onder in een er aan gesoldeerd koperen buisje, waarmede door eene caoutchouc slang het aanzetstuk met den binnensten spirometerbak wordt verbonden. Zijdelings heeft het aanzetstuk nog eene tweede doorboring, eveneens van een koperen buisje voorzien, waarmede het, zich vlak onder het voetstuk aan de orgelpijp bevindend, luchtkamertje met eenen manometer wordt verbonden.

Ten einde nu de drukking en de uitstroomingssnelheid van de

lucht uit den spirometerbak naar believen te kunnen veranderen, bevindt zich een metalen bakje op de geëquilibreerde spirometerklok. Door nu in dit bakje zand of water te gieten, kon de drukking zeer gevoelig worden geregeld.

Daar de grootere pijpen geen' voldoende steun in het aanzetstuk vonden, werden zij met zoo min mogelijk aanrakingsvlak nog door een verstelbaar ijzeren statief gesteund. De gebruikte manometer is eene knievormig gebogene glazen buis, met vrij nauw lumen, die gevuld werd met ligroïne (soort. gew. 0,7). Het knievormig gebogen zijn van de manometerbuis en de vulling met ligroïne maakten, dat deze manometer met nauwkeurigheid eene, in horizontalen waterdruk omgerekende drukking, van 0,1 mM. liet aflezen.

Door deze manometerbuis nu zoo op een eenvoudig houten statiefje te bevestigen, dat beide beenen eenen gelijken hoek, in dit geval van 24° , maken met het vlak van 't statiefje, en dit toestel bij het gebruiken steeds nauwkeurig horizontaal te plaatsen, kon bij de bepalingen volstaan worden met de aflezing van één' der takken van de manometerbuis. De drukking van de lucht vlak onder de orgelpijpen was dan met voldoende nauwkeurigheid bekend. Nog noodig voor de berekening van de aan de pijp toegevoerde energie, is de kennis van het per tijdseenheid verbruikte luchtquantum. Deze hoeveelheid nu werd bepaald, door met een arrêter-horloge den tijd na te gaan, dien de binnenste spirometerklok noodig heeft om eenen bepaalden afstand te dalen. De hiermede corresponderende hoeveelheid uitgedreven lucht wordt op eene langs de klok aangebrachte vaste vertikale schaal direct in cm^3 . afgelezen. Er werd steeds een vast bedrag van indaling toegelaten, en wel overeenkomende met een bedrag van 1000 cm^3 , ongeveer beantwoordend aan het midden van de spirometerklok. Dit laatste werd gedaan, omdat de luchtdrukking bij het doorloopen van dit gedeelte het meest constant was. De spirometerbak daalde blijkbaar *dan* het regelmatigst. Zoo zijn dus vrij eenvoudig het per tijdseenheid verbruikte luchtquantum en de druk, waaronder deze lucht staat, te bepalen.

De gang van het onderzoek is nu de volgende. Na plaatsing van den spirometer op een van stelschroeven voorzien voetstuk, wordt dit zoo gesteld, dat de klok volkomen vrij in het water kan dalen en stijgen. De nauwkeurig horizontaal gestelde mano-

meter wordt verbonden met het koperen aanzetstuk; eveneens de klok, nadat deze eerst door naar boven trekken met lucht is gevuld.

De te onderzoeken pijp wordt met zijn mondstuk stevig in de conische opening van het aanzetstuk gedrukt. Nu wordt zoolang òf water òf fijn zand gegoten in het bakje boven de klok, tot de pijp behoorlijk aanspreekt. Bij dit laten aanspreken, werd er steeds goed op gelet, dat de pijpen hunnen grondtoon te hooren gaven en geene storende boventonen optraden. Sprak de pijp goed en regelmatig aan, dan werd door den acustischen waarnemer den afstand gezocht, waarop nog juist een geluidsindruk werd verkregen. Daarop werden dan de drukking in den manometer afgelezen, en de tijd bepaald voor de daling van den spirometerbak van verdeeling 2500—1500 en deze waarnemingen eenige keeren herhaald, om gemiddelde waarden te verkrijgen. Ter controleering wisselden hoorder en toestelbedienaar zoo nu en dan om.

De eerste reeks definitieve proeven had, zooals gezegd plaats in de open lucht. Hiertoe werd mij bereidwillig door den heer QUIX de gelegenheid geboden bij het militair herstellingsoord op de heide te Milligen. Genoemde plaats is bij uitstek geschikt voor het nemen van acustische proeven. Er werd eene plek uitgekozen op een geheel vlak heideveld in de nabijheid van het herstellingsoord, zonder eenig struikgewas, begroeid met lange dicht opeenstaande heide. Pas op 600 M. bevonden zich de dichtst bijzijnde boomen rondom het herstellingsoord, terwijl de straatweg meer dan een K.M. van de uitgekozen plek verwijderd was. Vanaf de opstellingsplaats voor den spirometer werden met witte houten paaltjes goed zichtbare afstanden uitgezet van 50—300 M. De tusschengelegen afstanden werden nauwkeuriger met een maattouw bepaald.

Hoewel reeds laat in het najaar, was het weder vrij gunstig.

De eerste serie proeven had plaats op 18 October 1904 des avonds. Het weder was goed, de lucht zeer helder, geen wind, nergens in den omtrek eenig storend geluid. Luisteraar was QUIX, die in staande houding, met het rechter oor naar het toestel gekeerd, luisterde. Eerst werd gepoogd, eenen vasten afstand te bewaren, en het meer of minder luid aanspreken der pijpen

daarnaar te regelen, doch het dan vaak inconstant worden van de geluidsterkte, of het bij sommige pijpen spoedig optreden van storende boventonen deed deze manier verlaten. De resultaten worden hier niet vermeld, daar deze bepaling meer als eene orienteerende is beschouwd.

Den volgenden middag werden de proeven herhaald.

De opstelling en manier van proefneming geheel als den vorigen avond. De luisteraar merkte op, dat eene houding, waarbij het oor zich dicht bij den bodem bevond gunstiger was dan het rechtop staan. Het verschijnsel deed zich bij alle pijpen voor. Zeer veel verschil in de uitkomst maakte het intusschen niet. Misschien was hiervan de oorzaak eene geringe terugkaatsing van het geluid tegen den bodem. Het weer was gunstig. Zoo nu en dan was een lichte wind te bespeuren, loodrecht op de luisterrichting. In de vrij groote windstille tusschenpoozen werden de bepalingen gedaan.

Luisteraars waren om beurten QUIX en MINKEMA. De aflezingen werden weder enkele malen herhaald, en zoo nu en dan eens eene geheele bepaling van eene vorige toonshoogte ter controleering herhaald. De resultaten van deze waarneming zijn de volgende:

TABEL I.
Uitkomsten van de 1^e Serie, 's middags 19 October 1904.

Toonshoogte.	Luchtverbruik in cm^3 . p. sec.	Afstand van den acust. waar- nemer in M.	Manometer aflezing in cm .
C	250	50	0,74
G	161,2	50	1,03
c	74,6	50	0,46
g	86,2	100	0,68
c ¹	58,8	150	0,80
g ¹	55,5	100	1,03
c ²	40,3	100	1,37
g ²	42,7	100	1,65
c ³	34,2	100	1,71
g ³	34	100	1,94
c ⁴	28,3	100	1,94
g ⁴	19,5	100	2,51

Eenigen tijd later werd wederom eene serie waarnemingen gedaan. Plaats van waarneming, toestel, manier van experimenteren geheel als bij de vorige serie. Nu werden ook de palmhouten pijp, de fluiten van EDELMANN en de GALTON fluit gebruikt. De fluiten van EDELMANN en de GALTON fluit, werden door middel van eene goed afsluitende houten stop in het aanzetstuk geplaatst.

Deze 3^e bepaling had des avonds plaats. Het weder was zeer goed, de lucht helder en droog. Zoo nu en dan was een lichte wind merkbaar loodrecht op de luisterrichting. De bepalingen werden echter alleen verricht, als geen wind was te bespeuren. In de volgende tabel II zijn aangegeven de gegevens van deze serie.

Om nu uit de gegevens van bovenstaande seriën de energie waarde te berekenen, paste ik de hiervoor aangegeven methode toe van RAYLEIGH. ¹⁾

Volgens RAYLEIGH wordt de energie, die men aan eene orgelpijp toevoert, uitgedrukt door de formule $e = m \times d \times 981$ m. a. w. de energie = het product van de hoeveelheid verbruikte lucht, de drukking dier lucht en 981 (de versnelling der zwaartekracht.)

Bij gunstig aanspreken van de pijpen (merkbare boventonen mag de pijp dan niet geven), en bij uitwendige gunstige omstandigheden, in ons geval wat het weer en de plek van experimenteren aangaat, wordt volgens RAYLEIGH ongeveer *al* de toegevoerde energie in geluid omgezet. Dit zal nu waarschijnlijk wel niet het geval zijn. Hoe groot echter in elk bijzonder geval het energieverlies zal zijn is moeilijk te bepalen. Volgens WIEN ²⁾ is het vrij aanzienlijk. Op de volgende manieren zou n.l. volgens hem energie verloren gaan:

- 1^e er vormen zich in en buiten de pijp luchtwervels;
- 2^e de lucht schuurt langs de wanden van de pijp, verwarmt haar dus, en doet de geheele pijp mede trillen;
- 3^e in de lucht heeft bij de voortplanting van de geluidsgolven door wrijving en steeds voorkomende luchtstromingen verlies plaats.

Een nog grooter energieverlies zou plaats hebben volgens WEBSTER.

¹⁾ RAYLEIGH Proceedings of the Royal society of London. — vol. 26 p. 248.

²⁾ WIEN. Wiedermann's annalen bd. 36 p. 384.

TABEL II.

Uitkomsten van de 2de Serie, 's avonds 19 en 27 October 1904.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Luchtverbruik in cM ³ . p. sec.	Afstand van den acust. waarn. in M.	Manometer aflezing in cM.
Gedekte houten pijpen.	C	238	80	0,68
»	G	208	100	1,6
»	c	69,4	60	0,4
»	g	75	150	0,46
»	c ¹	44,6	150	0,40
»	g ¹	43,1	100	0,74
»	c ²	28,9	100	0,91
Groote Edelmänn.	e ²	56,2	180	1,31
Palmhouten pijp.	g ²	42,4	135	2
Groote Edelmänn.	g ²	58,1	145	1,25
Houten pijp.	g ³	29	70	1,03
Houten pijp.	c ³	28,5	100	1,03
Palmhouten pijp.	c ³	53,2	200	2,85
Groote Edelmänn.	c ³	69,4	205	1,65
» »	e ³	94,3	410	2,62
Houten pijp.	g ³	24,7	100	0,80
Groote Edelmänn.	g ³	113,6	280	2,51
» »	a ³	142,9	425	3,93
Kleine Edelmänn.	a ³	63,3	400	2,45
Houten pijp.	c ⁴	24,2	100	2
Kleine Edelmänn.	c ⁴	64,1	505	2,74
» »	e ⁴	64,9	450	2,91
Houten pijp.	g ⁴	22,2	90	2,68
Kleine Edelmänn.	g ⁴	63,3	430	2,79
» »	a ⁴	62,5	330	2,68
Galtonfluit	a ⁴	47,7	360	3,02
»	c ⁵	46,4	275	3,02
»	g ⁵	43	250	3,02
»	c ⁶	46,7	220	3,14
»	g ⁶	43,8	70	3,25
»	c ⁷	45,8	20	3,25

WEBSTER ¹⁾ heeft het nuttig effect in acustischen zin van allerlei muziekinstrumenten nagegaan. Zijne meening omtrent het nuttig effect bij orgelpijpen luidt aldus: »the result gave the efficiency of 0,0013, showing, as suspected by Lord RAYLEIGH that nearly all the energy is wasted." Dit laatste intusschen berust kennelijk op een misverstand, want al zegt RAYLEIGH ²⁾ letterlijk »An estimate, founded on these data will necessarily be too high, both because soundwaves must suffer some dissipation in their progress, and also because a part, and in some cases a large part of the energy expended never takes the form of soundwaves at all," niettemin voert hij zijne berekeningen en schattingen uit, alsof niets van de energie verloren ging en alles in geluid werd omgezet. Ook door mij is voorloopig geene correctie voor energie-verlies aangebracht, om vergelijking met de uitkomsten van andere onderzoekers mogelijk te maken.

Het door de pijp voortgebrachte geluid verbreidt zich over een half boloppervlak, aannemende, dat de bodem weinig van het geluid resorbeert en de geluidsbron zich dicht bij den grond bevindt. Op de plek dus, waar door den acustischen waarnemer nog juist een geluid wordt waargenomen, heeft de uitgezondene acustische energie zich dus uitgebreid over eenen halven bol, met de pijp tot middelpunt en den afstand van de pijp tot den waarnemer als straal. Op de plaats van den waarnemer passeert per c.M.² in de seconde eene geluidsenergie groot:

$$e = \frac{m \times d \times 981}{2 \pi r^2}$$

Wil men de energie kennen, die ons trommelvlies bereikt, dan moet van deze waarde, volgens WIEN, het $\frac{1}{3}$ gedeelte genomen worden, daar het trommelvlies, geprojecteerd op het sagittale vlak ongeveer $\frac{1}{3}$ c.M.² groot is. Deze nu gevondene energie is nog te groot als men het minimum perceptibile wil kennen. Bij bovenstaande berekening is n.l. de energie die per seconde op ons gehoor inwerkt gevonden. Een zóó lange duur van inwerking is echter niet noodig, om eene geluidsgewaardiging op te wekken. Volgens de onderzoekingen van HERROUX

¹⁾ WEBSTER. Festschrift v. Boltzmann. 1904 S. 866.

²⁾ RAYLEIGH. Proc. of Royal society vol. 26 p. 248. id. 77.

en YEO ¹⁾, later nog herhaald en uitgebreid door ABRAHAM en BRÜHL ²⁾ is gebleken, dat slechts noodig zijn :

2	trillingen	voor	tonen	tot	een	trillingsgetal	van	3168
3	»	»	»	»	»	»	van	3960
4	»	»	»	»	»	»	van	5020
5	»	»	»	»	»	»	van	6000
10	»	»	»	»	»	»	van	7040
20	»	»	»	»	»	»	van	12288

De geheele uitkomst moet dus voor de meeste tonen nog gedeeld worden door de helft van het trillingsgetal, de formule luidt dan

$$e = \frac{m \times d \times 981 \times 0,33}{2 \pi r^2 \times \frac{1}{2} n}$$

Voor enkele zeer hoge tonen moet hierin $\frac{1}{2} n$ vervangen worden door $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20} n$.

Op deze wijze nu de gegevens der tabellen I en II uitwerkende, komt men tot de volgende resultaten, (zie tabel III en IV.)

De in de tabellen aangegeven trillingsgetallen zijn volgens de z.g. mathematische stemming.

De geluidsenergie op de grens van het hooren is in kolom 9 aangegeven per c.M.² en per sec. en in kolom 10 berekend naar de hoeveelheid die het trommelvlies bereikt gedurende het voor de perceptie noodige aantal trillingen. De laatste kolom bevat dit aantal noodige trillingen, zooals deze door ABRAHAM en BRÜHL zijn aangegeven.

Grooter trillingsgetal dan 7040 is door deze onderzoekers niet nagegaan.

Voor de nog door ons nagegane c^7 met een trillingsgetal van 16384, zou, als men de door ABRAHAM en BRÜHL aangegevene curve doortrekt, het noodige aantal trillingen ± 140 zijn. Daar dit getal echter niet vaststaat, is voor deze toonhoogte alleen de per c.M.² per seconde doorgaande energie aangegeven.

Uit het verloop van de uitkomsten blijkt, dat de energie-

¹⁾ HERROUX and YEO. Proc. of Royal Society, vol. 50 p. 318.

²⁾ ABRAHAM u. BRÜHL. Zeischrift für Psychol. und Physiol. der Sinnesorganen, Bd. 18 S. 177.

waarde van C—g vrij snel afneemt, daarna echter veel geleidelijker daalt, om bij g^4 het minimum te bereiken. Het verloop der uitkomsten in tabel 2 is vrijwel gelijk aan die van tabel 1. Alle waarden echter liggen lager, vooral aan de ondergrens. Dit nu kan zeer goed daaruit verklaard worden, dat de bepalingen, waaruit tabel 1 is voortgekomen, over dag zijn verricht, terwijl die van tabel 2 avondbepalingen zijn onder zeer gunstige omstandigheden.

Voor tabel I zijn de geluidsbronnen alle houten orgelpijpen geweest van eenzelfde constructie en houtsoort. Voor tabel 2 zijn grootendeels dezelfde pijpen gebezigd, doch nu ook voor de midden- en bovenoctaven de fluiten van EDELMANN en GALTON.

Uit de resultaten blijkt, dat de metalen fluiten lagere energie waarden opleveren, dan de houten pijpen. Hetzij echter, dat men het absolute minimum ontleent aan de uitkomsten der houten pijpen, of aan die der metalen fluiten voor beide is het omstreeks gelegen bij g^4 . Na g^4 neemt de energiewaarde eerst nog langzaam, daarna weer sneller toe.

TABEL III.

Resultaten der 1e Serie te Milligen 19 October 1904 's middags. Luisteraars QUIX en MINKEMA.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillings- getal.	Luchtver- bruik per sec. in cM ³ .	Horizon- tale waterdruk in cM.	Toegevoerde energie per sec. vol. $\times$ druk $\times$ 981.	Aftand v. d. luisteraar	Oppervlak halve bol m. d. afstand tot straal in cM. ²	Geluidsenergie op de hoorgrens p. sec. p. cM. ² in 10. ⁻⁸ ergs.	Geluidsenergie op de hoorgrens op 't trommel- vlies p. noodige trill. in 10. ⁻⁸ ergs.	Aantal noodige trillingen.
Houten ge- dekte orgelpijpen.	C	64	250	0,74	181485	50	15700×10^4	115590	1204	2
	G	96	161,2	1,03	162885	50	15700 »	103750	720,5	2
	c	128	74,6	0,46	33667,9	50	15700 »	21444	111,69	2
	g	192	86,2	0,68	57506,2	100	62800 »	9157	31,79	2
	c ¹	256	58,8	0,80	46146,2	150	141300 »	3265,9	8,50	2
	g ¹	384	55,5	1,03	56083,7	100	62800 »	8930,6	15,5	2
	c ²	512	40,3	1,37	54161	100	62800 »	8624,1	11,23	2
	g ²	768	42,7	1,65	69121	100	62800 »	11007	9,55	2
	c ³	1024	34,2	1,71	57368,8	100	62800 »	9135	5,94	2
	g ³	1536	34	1,94	64706,7	100	62800 »	10304	4,47	2
	c ⁴	2048	28,3	1,94	45292,7	100	62800 »	7212,1	2,35	2
	g ⁴	3072	19,5	2,51	48019,9	100	62800 »	7646	1,65	2

TABEL
Resultaten der 2e Serie te Milligen. 19 en 27 October

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillings- getal.	Lucht- verbruik per sec. in cM ³ .	Horizon- tale waterdruk in cM.	Toegévoerde energ. p. sec. vol. × druk × 981 in Ergs.
Houten gedekte pijp.	C	64	238	0,68	158765
	G	96	208	1,60	326476
»	c	128	69,4	0,40	27232
»	g	192	75	0,46	33844
»	c ¹	256	44,6	0,40	17501
»	g ¹	384	43,1	0,74	31288
»	c ²	512	28,9	0,91	25799
Groote Edelman.	e ²	640	56,2	1,31	72221
Palmhouten pijp.	g ²	768	42,4	2	83189
Groote Edelman.	g ²	768	58,1	1,25	71245
Houten pijp.	g ²	768	29	1,03	29302
»	c ³	1024	28,5	1,03	28797
Palmhouten pijp.	c ³	1024	53,2	2,85	148739
Groote Edelman.	c ³	1024	69,4	1,65	112334
»	e ³	1280	94,3	2,62	242376
Houten pijp.	g ³	1536	24,7	0,80	19384
Groote Edelman.	g ³	1536	113,6	2,51	279722
»	a ³	1706 ² / ₃	142,9	3,93	550930
Kl. Edelman.	a ³	1706 ² / ₃	63,3	2,45	152143
Houten pijp.	c ⁴	2048	24,2	2	47480
Kl. Edelman.	c ⁴	2048	64,1	2,74	172293
»	e ⁴	2560	64,9	2,91	185272
Houten pijp.	g ⁴	3072	22,2	2,68	58366
Kl. Edelman.	g ⁴	3072	63,3	2,79	173254
»	a ⁴	3413 ¹ / ₃	62,5	2,68	164318
Galton fluit.	a ⁴	3413 ¹ / ₃	47,7	3,02	141313
»	c ⁵	4096	46,4	3,02	137465
»	g ⁵	6144	43	3,02	127393
»	c ⁶	8192	46,7	3,14	143851
»	g ⁶	12288	43,8	3,25	139645
»	c ⁷	16384	45,8	3,25	146021

IV.
1904. Acustische waarnemers QUIX en MINKEMA.

Afstand v. d. waar- nemer in M.	Oppervl. v. e. halve bol m. afst. tot straal in cm^2 .	Geluidsenergie op de hoorgrens p. sec. p. cm^2 . in 10^{-8} ergs.	Geluidsenergie o. d. hoorgr. op h. trom- melvlies p. noodige trill. in 10^{-8} ergs.	Aantal noodige perioden.	
80	40192×10^4	39502	411,5	2	
100	62800	51986	361	2	
60	22608	12045	62,73	2	
150	141300	2395	8,31	2	
150	141300	1238	3,23	2	
100	62800	4982	8,65	2	
100	62800	4108	5,35	2	
180	203472	3553	3,69	2	
135	114453	7437	6,44	2	
145	132037	5396	4,68	2	
70	30772	9522	8,26	2	
100	62800	4585	2,98	2	
200	251200	5921	3,85	2	
205	263917	4256	2,77	2	
410	1055668	2349	1,19	2	
100	62800	3086	1,34	2	
280	492352	5681	2,46	2	
425	1134325	4856	1,89	2	
400	1004800	1514	0,59	2	
100	62800	7560	2,46	2	
505	1601557	1075	0,35	2	
450	1271700	1457	0,37	2	
90	50868	11474	2,49	2	
430	1161172	1492	0,32	2	
330	683892	2403	0,47	2	
360	813888	1736	0,34	2	
275	474925	2894	0,59	2,5	
250	392500	3170	0,97	5,5	
220	281344	5113	4,16	20	
70	30772	45485	24,8	20	
20	2512	581280		?	

HOOFDSTUK III.

Proeven genomen in eene besloten ruimte.

De proeven uit hoofdstuk II zijn nog eens herhaald, in eene besloten ruimte. De uitwendige voorwaarden komen dan meer overeen met die van de onderzoekers ZWAARDEMAKER en QUIX, die hunne stemvorkproeven in het physiologisch laboratorium te Utrecht verrichtten. De luisteraar bevond zich daarbij aan het einde van eene reeks ineenloopende vertrekken. Voor de volgende proefnemingen is het grootste, in Utrecht beschikbare, lokaal gebezigd, de groote zaal van de universiteits-bibliotheek. Deze ruimte is eigenlijk beter te beschouwen als eene reeks van 10 in elkaar loopende vertrekken. Eene nauwkeurige beschrijving van deze lokalen met teekening vindt men bij REUTER ¹⁾. Elk van deze vertrekken is 10 M. breed, 6,5 M. lang en 9 M. hoog, elk voorzien van twee, 4 M. hooge, boogvormige vensters. Ter hoogte van 5 M. loopt om allen heen nog eene, ruim 2 M. breede, gaanderij. De verbinding tusschen de vertrekken bestaat uit hooge boogvormige poorten, hoog $\pm$ 4 M., breed ruim 2 M. De wanden der vertrekken zijn geheel bezet met boeken. De bodem der lokalen is belegd met eenen dikken looper van cocosnootvezelen. Aan het einde der laatste kamer bevindt zich een groot beeld, geplaatst voor eene nisvormige uitholling in den gekalkten muur. De geheele lengte der vertrekkenreeks bedraagt 71 M. Door voorloopige proeven werd uitgemaakt, of

¹⁾ REUTER. Zeitschrift f. Ohrenheilkunde bd. 47. Heft I.

er ook eenig verschil was te bemerken, bij plaatsing van den geluidsbron dicht bij een der einden van de vertrekken of in het midden van de verbindingsgang, met het oog op mogelijke terugkaatsing bij plaatsing dicht bij eenen der eindwanden. Terugkaatsing bleek echter niet merkbaar plaats te hebben. Bij de definitieve proeven werd dan nu de geluidsbron geplaatst vrij dicht bij het beeld, terwijl daardoor de acustische waarnemer de geheele lengte der 10 lokalen beschikbaar had om de plek van het minimum audible op te zoeken. De proeven werden geheel op dezelfde manier genomen als die in de open lucht met denzelfden spirometer en manometer en dezelfde geluidsbronnen.

De hierachter volgende uitkomsten zijn gemiddelden uit eene reeks bepalingen onder zooveel mogelijk dezelfde omstandigheden.

TABEL V.

Uitkomsten der 1e Serie. Acustische waarn. MINKEMA en DE JONG.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Luchtverbruik in cM ³ . p. sec.	Afstand van den acust. waar- nemer in M.	Aflezings v. d. manometer in cM.
Houten gedekte pijpen.	C	178,5	23	0,68
	G	178,5	27	1,20
	c	119	32	1,08
	g	84,7	34	0,51
	c ¹	57,5	37	0,68
	g ¹	37,8	46	0,46
	c ²	25	58	0,68
	g ²	27,8	62	0,97
	c ³	23,8	71	1,08
	g ³ —c ⁶ , hiervoor was de grens niet geheel te bereiken.			
Galtonfluit.	c ₈	28,6	60	2,11
»	g ₈	40	60	3,25
»	c ⁷	43,5	22	3,65

Daar het gebouw alleen over dag ter beschikking was gesteld, hinderde zoo nu en dan het rumoer der niet ver verwijderde straat. Daar de ruimte voor de hoogere tonen nauwelijks lang genoeg was, werd geprobeerd de pijpen zoo zacht mogelijk te doen aanspreken. Acustische waarnemers waren om beurten DE

JONG en MINKEMA (beiden 28 j. oud). Voor deze onderzoekers kon in de gevoelige zone van g^3-c^6 geen minimum bereikt worden. De zaallengte was niet toereikend genoeg.

Een paar dagen later werd eene tweede serie bepalingen verricht, onder geheel dezelfde voorwaarden als bij de eerste serie. Ook nu kon voor de toonsoogten van g^3-c^6 niet geheel het minimum bereikt worden, tenminste voor de onderzoekers DE JONG en MINKEMA. Een der bibliotheekknachten oud 45 j., wiens gehoor overigens normaal was, verklaarde echter aan het einde der vertrekken geen geluid meer te hooren. Eenige meters zouden dus waarschijnlijk voldoende zijn geweest ook voor ons het minimum te doen bereiken.

TABEL VI.

Uitkomsten der 2e Serie. Acustische waarn. MINKEMA en DE JONG.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Luchtverbruik in cm^3 . p. sec.	Afstand van den acust. waarnemer in M.	Aflez. v. d. manometer in cm .
Houten gedekte orgelpijpen.	C	166,6	16	0,46
»	G	135,1	18	0,74
»	c	78,1	24	0,63
»	g	66,7	42	0,46
»	c^1	40	46	0,51
»	g^1	34,5	57	0,51
»	c^2	21,7	66	0,68
»	g_2	25,6	70	0,86
»	c^3	21,5	71	0,97
»	g^2-c^6 , hiervoor werd door ons geen minimum bereikt.			
Galtonfluit.	c^6	33,3	71	1,65
»	g^6	33,3	60	2,39
»	c^7	35,7	35	2,74

Eene derde serie waarnemingen werd 3 Januari 1905 gedaan. Acustisch waarnemer was Prof. ZWAARDEMAKER.

Bij deze serie gelukte het, de pijpen zoo zacht te doen aanspreken, dat ook voor de 4e en 5e octaaf een minimum werd gevonden. De resultaten dezer serie zijn de volgende. Het zij nog vermeld, dat evenals te Milligen, de opgegeven uitkomsten gemiddelden zijn van eenige herhalingen van de aflezingen.

Getracht werd, om de te Milligen gebruikte groote metalen fluiten van EDELMANN ook hier te onderzoeken, doch zij laten zich niet voldoende verzwakken om er in eene beperkte ruimte het minimum mede te bereiken.

De uitkomsten dezer derde serie volgen hieronder.

TABEL VII.

Uitkomsten der 3e Serie. Acustisch waarn. Prof. ZWAARDEMAKER.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Luchtverbruik in cm^3 . p. sec.	Afstand van den acust. waar- nemer in M.	Aflez. v. d. manometer in cm .
Houten gedekte orgelpijpen.	C	166,6	18	0,57
	G	138,8	19	1,08
	c	96,1	27	0,91
	g	83,3	42	0,57
	c^1	45,4	42	0,51
	g^1	31,3	45	0,4
	c^2	25	58	0,63
	g^2	27,2	62	0,91
	c^3	22,7	65	0,97
	g^3	20	65	1,08
	c^4	18,5	66	1,37
	g^4	14,5	70	1,94
	c^5	28,6	71	1,25
Galtonfluit.	g^5	29,4	69	1,94
	c^6	27,7	42	1,54
	g^6	37	25	1,54
	c^7	35,7	20	2,28

Uit de gegevens van de tabellen 5, 6 en 7, werden nu weder volgens de methode, opgegeven bij de proeven te Milligen, de energiewaarden berekend. Voor de berekening wordt dus daarheen verwezen.

De resultaten zijn gegeven in de tabellen 8, 9 en 10.

TABEL VIII.
Resultaten der 1^e Reeks in de Bibliotheek der Rijks Universiteit te Utrecht op 28 Dec. '04 's morg.
Acustische waarnemers MINKEMA en DE JONG.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillinhs- getal.	Lucht- verbruik per sec. in cM ³ .	Horizon- tale waterdruk in cM.	Toegevoerde energie per sec. vol. $\times$ druk $\times$ 981.	Afstand v. d. waar- nemer in M.	Oppervlak v. e. halve bol m. d. afstand t. straal in cM. ²	Geluidsenergie op d. hoorgrens p. sec. p. cM ² . in 10^{-8} ergs.	Geluidsenergie op d. hoorgrens op 't trommenvl. p. noodige trill. in 10^{-8} ergs.	Aantal noodige trillingen.
Houten gedekte orgelpijpen.	C	64	178,5	0,68	119074	23	3322×10^4	358430	3733	2
	G	96	178,5	1,20	210130	27	4578	459000	3187	2
	c	128	119	1,08	126078	32	6431	196050	1021	2
	g	192	84,7	0,51	42376	34	7260	58368	2026	2
	c ¹	256	57,5	0,68	38357	37	8597	44617	116,1	2
	g ¹	384	37,8	0,46	17058	46	13289	12836	22,28	2
	c ²	512	25	0,68	16677	58	21126	7895	10,28	2
	g ²	768	27,8	0,97	26448	62	24140	10956	9,51	2
	c ³	1024	23,8	1,08	25216	71	31658	8151	5,3	2
	c ⁶	8192	28,6	2,11	59199	60	22608	26185	21,3	20
Galton fluit.	g ⁶	12288	40	3,25	127530	60	22608	56410	30,6	20
	c ⁷	16384	43,5	3,65	155763	22	3040	512390		?

TABEL IX.

Uitkomsten der 2de Reeks in de Universiteitsbibliotheek, 30 Dec. 04'. Luisteraars om beurten: MINKEMA en DE JONG.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillings- getal.	Lucht- verbruik per sec. in cm^3 .	Horizont. waterdruk in cm .	Toegevoerde energie per sec. vol. $\times$ druk $\times 981$	Afstand v. d. waar- nemer in M.	Oppervl. v. e. halven bol m. d. afstand tot straal. in cm^2 .	Geluidsenergie op d hoorgrens p. sec. p. cm^2 . in 10^{-4} ergs.	Geluidsenergie op d hoorgrens op 't trommenvl. p. noodige trill- in 10^{-8} ergs.	Aantal noodige trillingen.
Houten gedekte orgelpijpen.	C	64	166,6	0,46	75184	16	1608×10^4	467560	4869	2
	G	96	135,1	0,74	98071	18	2035	481920	3346	2
	c	128	78,1	0,63	48265	24	3617	133440	695	2
	g	192	66,7	0,46	30097	42	11080	27164	94,3	2
	c^1	256	40	0,51	20012	46	13289	15059	39,2	2
	g^1	384	34,5	0,51	17261	57	20404	8459	14,7	2
	c_2	512	21,7	0,68	14480	66	27356	5293	6,9	2
	g^2	768	25,6	0,86	21602	70	30772	7019	6,1	2
	c^3	1024	21,5	0,97	20464	71	31658	6464	4,2	2
Galtonfluit.	c^6	8192	33,3	1,65	53906	71	31658	17028	13,9	20
»	g^6	12288	33,3	2,39	78078	60	22608	34536	18,7	20
»	c^7	16384	35,7	2,74	95961	35	7693	124740		?

*

TABEL X.
Uitkomsten der 3e Reeks Universiteits-Bibliotheek. Acustisch waarnemer Prof. ZWAARDEMAKER.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillings- getal,	Lucht- verbruik per sec. in cM ³ .	Horizon- tale waterdruk in cM.	Toegevoerde energie per sec. vol. × druk × 981.	Afstand v. d. waar- nemer in M.	Oppervl. v. e. halven bol m. d. afstand tot straal in cM ² .	Geluidsenergie op d. hoorgrens p. sec. p. cM ² . in 10 ⁻⁸ ergs.	Geluidsenergie op d. hoorgrens op trommelvl. p. nood. aant. trill. in 10 ⁻⁸ ergs.	Noodig aantal trillingen.
Houten gedekte orgelpijpen.	C	64	166,6	0,57	93163,7	18	2035 × 10 ⁴	457810	4891,3	2
»	G	96	138,8	1,08	147059,7	19	2267	648700	4515	2
»	c	128	96,1	0,91	85784,4	27	4578	187390	976	2
»	g	192	83,3	0,57	46578,8	42	11078	42047	146	2
»	c ¹	256	45,4	0,51	22714,1	42	11078	20504	53,39	2
»	g ¹	384	31,3	0,4	12282,1	45	12717	9657,8	16,76	2
»	c ²	512	25	0,63	15450,7	58	21126	7313,2	9,52	2
»	g ²	768	27,2	0,91	24279,2	62	24140	10057,4	8,73	2
»	c ³	1024	22,7	0,97	21600,6	65	26533	8141	5,3	2
»	g ³	1536	20	1,08	21189,6	65	26533	7986,1	3,46	2
»	c ⁴	2048	18,5	1,37	24863,4	66	27356	9085,4	2,95	2
»	g ⁴	3072	14,5	1,94	27595,5	70	30772	8967,8	1,95	2
Galton fluit.	c ⁵	4096	28,6	1,25	35070,7	71	31657	11078,6	2,25	2,5
»	g ⁵	6144	29,4	1,94	55952,3	69	29899	18714	5,57	5,5
»	c ⁶	8192	27,7	1,54	41847,5	42	11078	37778	30,74	20
»	g ⁶	12288	37	1,54	55897,4	25	3925	142420	77,2	20
»	c ⁷	16384	35,7	2,28	79853,8	20	2512	317880		?

HOOFDSTUK IV.

Proeven in het acustisch kamertje van het physiologisch laboratorium.

In 1904 is op de zolderverdieping van het physiologisch laboratorium een kamertje ingericht, voor acustische proeven. Het doel was, eene ruimte te maken, groot genoeg voor een paar onderzoekers met toestellen, waar geen geluid van buiten kon indringen en omgekeerd, van waaruit geen geluid naar buiten ging. Het kamertje zelf is geheel omgeven met kleine vertrekken en eene breede gang, terwijl geen van zijn zijmuren correspondeert met de hoofdmuren van het gebouw. De afmetingen zijn aan den binnenkant de volgende:

hoogte 2,28 M., breedte 2,28 M., diepte 2.20 M.

Het is dus nagenoeg cubisch. De bodem, de zolder en de wanden bestaan uit geluiddempende lagen, de bodem uit loodplaten, waarover weer viltpapier en een dik tapijt, de zijwanden van binnen naar buiten gerekend uit de volgende lagen:

1^e eene laag trichopiëse (gevlochten paardehaar) dik $2\frac{1}{2}$ c.M.

2^e eene laag tufsteen dik $7\frac{1}{2}$ c.M.

3^e eene luchtlaag van ± 2 c.M.

4^e een houten wand $2\frac{1}{2}$ c.M. dik.

5^e eene laag zand met fijn gestooten kurk van 2 c.M.

6^e eene laag kurksteen dik 6 c.M.

Deze kurksteen is aan den buitenkant met cement en gips gladgemaakt. De zijwanden hebben dus eene goede dikte, en zijn opgebouwd uit stoffen, die, zooals proeven hebben uit-

gemaakt ¹⁾, sterk het geluid dempen. Ook de deur is van dezelfde dempende lagen voorzien, terwijl bovendien nog eene 2^e deur, alleen van hout, de eerste bedekt. In het kamertje is een klein venster, waartegen aan den buitenkant een luikje van kurksteen en hout kan worden geplaatst, terwijl eene afgepaste laag trichopiëse bij het nemen der proeven aan den binnenkant wordt geplaatst. Dit venstertje, dient tevens om de geleiding voor electrisch licht en electrische drijfkracht door te laten.

Om nu eene verbinding te bewerkstelligen bij het verrichten van acustische proeven, tusschen eene buiten het kamertje zich bevindende geluidsbron en den in het kamertje zich bevindenden waarnemer, of omgekeerd, is in de beide zijwanden eene doorboring gemaakt, waarin op de volgende manier verwisselbare stoppen zijn aan te brengen. In de trichopiëse is eene opening gemaakt, juist groot genoeg om eene dunwandige koperen buis van 4,5 c.M. doorsnede door te laten. Deze buis is, vastgehouden door 2 doorboorde marmeren platen, met cement gemetseld in eene uit den tufsteenmuur gehouwen opening. De buis eindigt $\frac{1}{2}$ c.M. van den houten wand, zoodat ze daarmede geen contact maakt. Aan den buitenkant is tegen het houten beschot eene $1\frac{1}{2}$ c.M. dikke loodplaat bevestigd, voorzien van eene opening, ruim genoeg om de stop zonder aanraking door te laten. De stop zelve nu, bestaat uit eene koperen buis, geheel volgegoten met lood, die volkomen past in de in den wand gemetselde koperen buis. Eene centrale doorboring van $1\frac{1}{2}$ c.M. diameter is er in aangebracht, terwijl zij eindigt in eene omgebogene looden plaat, die met behulp van vilt eene volkomene afsluiting teweegbrengt tegen de loodplaat op het houten beschot. Eenig geluid van uit het kamertje komend, stuit dus steeds tegen eene dikke laag, het geluid sterk dempend, lood.

Dit kamertje nu heeft mij gediend bij het nemen van eene derde serie proeven. De geluidsbronnen werden n. l. hierin geplaatst. Gelijk bij de vorige twee reeksen, werden weer als geluidsbronnen gebruikt: de serie houten orgelpijpen van uniform-maaksel, de 2 fluiten van EDELMANN en het GALTONfluitje.

De pijpen en fluiten werden bevestigd aan een statief, waaraan tevens eene inrichting zich bevond tot het aanbrengen van den knievormig gebogen manometer.

¹⁾ A. BILTRIS. Vergelijking der geluiddoovende kracht v. verschillende stoffen. Vlaamsch natuur- en geneeskundig congres 1901, blz. 23.

De voor het aanblazen der pijpen benoodigde lucht, werd geleverd door eene tegen den muur van de naastbijzijnde kamer en vlak bij de looden stop geplaatste orgeltafel. De lucht hierdoor geleverd, ging door eene caoutchouc verbindingsbuis naar eene langs de zijwanden loopende looden buis, die door het venstertje uitmondt in het acustisch kamertje. Van daar ging weder eene caoutchouc buis naar de geluidsbron.

Ter gemakkelijke bevestiging aan de pijpen en om er de zijbuis naar den manometer aan te verbinden, werd wederom het koperen aanzetstuk gebezigd, dat bij de twee eerste seriën aan den spirometer was bevestigd.

Om nu nog de door de orgeltafel geleverde hoeveelheid lucht te kunnen meten, werd in de caoutchouc buis, die naar de looden buis voerde een aërodromometer of z.g. veerend windvaantje ingevoegd. Deze gevoelige en betrouwbare instrumenten, ik gebruikte n.l. een groot model voor de grootere, en een kleiner model voor de geringere luchthoeveelheden, waren geijkt met eenen gasmeter, en ter controleering daarna met eenen spirometer.

Een groot voordeel van het gebruik van deze aërodromometers is, dat men in den afgelezen uitslag van het trilplaatje, direct eene maat heeft voor de per seconde door de buis gaande luchthoeveelheid. Om nog de luchthoeveelheid naar willekeur te regelen, was eene klemschroef aan de caoutchoucbuis aangebracht.

De experimenten verliepen nu als volgt. Na opstelling van pijp en manometer in het acustisch kamertje, werd door den waarnemer, na vulling van den balg van de orgeltafel met lucht, met de klemschroef zoodanig de luchttoevoer geregeld, tot nog juist een geluidsindruk verkregen werd. Het geluid bereikte op de volgende manier het oor van den waarnemer. Van de geluidsbron breidde het zich uit over het acustisch kamertje. Een deel ging door de doorboring van de looden stop en daarna door eene aan het einde van de stop bevestigde korte caoutchoucbuis, die door den waarnemer in het oor werd gestoken. De uitslag van den aërodromometer werd genoteerd en de manometer in het kamertje afgelezen. De hoeveelheid toegevoerde lucht en de druk, waaronder deze stond, waren dus bekend.

Bij de voorloopige proeven bleek echter, dat op deze manier voor geene enkele pijp het minimum perceptibile bereikt kon worden. De door de $1\frac{1}{2}$ cM. wijde doorboring gaande hoeveelheid

geluid was te groot en het geluid kon niet voldoende verzwakt worden. Om hierin te voorzien; werd aan den kant van de geluidsbron een diafragma in de looden stop aangebracht, in den vorm van eene doorboorde caoutchouc-kurk. Deze doorboring werd zoo groot genomen, als de gemiddelde wijdde van de mensche-lijke gehoorgang, n.l. 7 mM. in doorsnede. De hierdoor passeerende hoeveelheid geluid was dus veel geringer dan bij de volle opening, een minimum perceptibile echter was nog niet te bereiken. Nu werd getracht de doorboring nog kleiner te nemen, n.l. 5 en 3 mM. Hierbij echter deed zich het volgende voor. Het geluid van de lage pijpen afkomstig, werd voldoende verzwakt, en was wat zijne toonhoogte en timbre aangaat, voor den waarnemer buiten het kamertje goed te beoordeelen. Dit laatste nu moet mogelijk zijn, want vooral bij de lage pijpen C—c komt het, wil men deze hunnen zuiveren grondtoon laten geven, op eenen juisten luchttoevoer aan. Bij geringen toevoer treden n.l. domineerend de 2de en 3de boventoon op, die bij meer toevoer overgaan in den 1en boventoon, welke pas bij veel meer luchttoevoer onder hooger en druk, in den grondtoon overslaat. Voor de hoogere pijpen echter deed zich in dit opzicht een groot bezwaar voor, bij het gebruik van nauwe doorboringen. Men hoort dan een hoog krassend geluid, in plaats van den grondtoon en wijziging in den luchttoevoer brengt hierin geene verandering. Begaf men zich in het acustisch kamertje, dan bleek de pijp echter haren juisten toon te geven.

Misschien is de verklaring hiervan gelegen in resonantie, die op kan treden achter de caoutchoucstop in de veel wijdere looden buis. Om resonantie zoo veel mogelijk uit te sluiten, werd nu in de looden buis eene zeer dikwandige er juist in passende caoutchoucslang geschoven met een lumen van $3\frac{1}{2}$ mM. Het verschijnsel trad nu veel minder op, doch minima perceptibilia werden nog niet verkregen. Er bleef dus niets anders over, dan op den weg van het geluid eene geluidverzwakkende laag aan te brengen.

Eenige van zulke proeven, met geluiddempende stoffen, vindt men bij VIERORDT. ¹⁾ Met zijnen valphonometer bepaalde VIERORDT van allerlei stoffen het geluiddempend vermogen. Een paar resul-

¹⁾ VIERORDT. Die Schall und Tonstärke und das Schalleitungsvermögen der Körper, 1882.

taten zijn de volgende. De rangschikking is naar het geleidingsvermogen.

Metalen: ijzer; koper; zilver; goud; tin; *lood*. Minerale en steensoorten: zout; gips; leem; *marmer*.

Lood en marmer zijn dus slecht geleidende stoffen, daarom zijn deze ook gebruikt bij het vervaardigen en bevestigen van de stoppen in het acustisch kamertje.

Eene van de conclusies, waartoe VIERORDT komt, is de volgende:

Het geluid wordt in gelijk lange dempende lagen met hetzelfde relatieve bedrag verminderd, afhankelijk van de oorspronkelijke sterkte.

Bovendien meent VIERORDT, dat de dempingsfactor eenvoudig evenredig is met de dikte van de dempende laag.

Door Dr. BILTRIS ¹⁾ zijn onderzoekingen verricht over de geluiddempende kracht van allerlei geweven stoffen, als vilt, wol, gevlochten paardehaar (trichopiëse) e. a. Hij bouwde daartoe van de te onderzoeken stoffen even groote en even dikke goed sluitende kamertjes. Er binnen in werd steeds dezelfde wekkerklok gezet. Nu werd nagegaan, op welken afstand van de kamertjes men geen geluid meer hoorde. Voor trichopiëse bleek deze afstand de kleinste te zijn. BILTRIS komt dan ook tot de conclusie, dat trichopiëse eene van de het geluid het meest verzwakkende stoffen is. Het zooeven beschreven acustische kamertje, is daarom met eene laag trichopiëse bekleed.

Eveneens in 1901 is door F. TUFTS ²⁾ een onderzoek gepubliceerd over den weerstand, dien korrelige lichamen bieden aan luchtstroomen en aan geluidsgolven.

Hij bepaalde hiertoe de weerstanden, die lagen van hagelkorrels van verschillende dikte boden aan doorgevoerde lucht. Hiertoe werd de drukking en de snelheid van die door de korrels gevoerde lucht bepaald en voor de verschillende korrelgrootten vergeleken. Zijne conclusie is, dat voor even lange lagen, de laag met de fijnste korrels 4 tot 10 maal grooteren weerstand aan doorgedreven lucht biedt, dan lagen met korrels van resp. 2 en 4 maal de doorsnede van de fijne korrels.

Daarop werd nagegaan, welke demping van geluidsgolven optrad. Hiertoe werd, als bodem van eene dikwandige houten doos, een caoutchoucvellesje uitgespannen op eenigen afstand

¹⁾ BILTRIS. Vlaamsch Natuur- en Geneeskundig Congres 1901, blz. 23.

²⁾ TUFTS. American journal of science, vol. XI, pag. 357, 1901.

TABEL XI.
Uitkomsten der 1e Reeks April '05. Acustisch kamertje.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillings- getal.	Lucht- verbruik per sec. in cM ³ .	Horizon- tale H ₂ O druk. in cM.	Toegevoerde energie vol. × dr. × 981 in ergs.	Afstand v. d. luisteraar. in M.	Oppervlak heele bol met afstand als straal in cM ² .	Geluidsenergie p. cM. ² p. sec. in 10 ⁻² ergs.	Geluidsenergie op 't trommelvl. p. aantal trill. in 10 ⁻⁵ ergs.	Aantal noodige trillingen.
Houten pijpen.	C	64	125,7	0,4	49325	1,95 M.	477594	10,32 ¹	107,5	2
	D	72	138,5	0,46	62499	»	»	13,06	121,1	2
	E	80	142,8	0,46	64442	»	»	13,49	112,3	2
	F	85 ¹ / ₃	149	0,46	67238	»	»	14,08	110,4	2
	G	96	121,4	0,8	95275	»	»	19,95	138,5	2
	A	106 ² / ₃	129,9	0,86	109578	»	»	22,94	143,4	2
	B	120	144,9	0,86	122233	»	»	25,59	142,1	2
	c	128	58,1	0,34	19375	»	»	4,06	21,1	2
	d	144	58,1	0,40	22798	»	»	4,77	22,1	2
	e	160	46,5	0,40	18247	»	»	3,82	15,9	2
	f	170 ² / ₃	46,5	0,34	15510	»	»	3,24	12,7	2
	g	192	46,5	0,34	15510	»	»	3,24	11,3	2
	a	213 ¹ / ₃	46,5	0,29	13234	»	»	2,77	8,7	2
	b	240	34,9	0,23	7877	»	»	1,64	4,6	2
	c ¹	256	23,3	0,29	6632	»	»	1,38	3,6	2
	d ¹	288	29,6	0,29	8417	»	»	1,76	4,1	2
	e ¹	320	30,6	0,34	10202	»	»	2,13	4,5	2
	f ¹	341 ¹ / ₃	32,6	0,40	12792	»	»	2,67	5,2	2
	g ¹	384	28,5	0,46	12861	»	»	2,13	3,7	2
	a ¹	426 ² / ₃	27,9	0,40	10948	»	»	2,29	3,6	2
	b ¹	480	29,6	0,46	13351	»	»	2,79	3,9	2
	c ²	512	25,7	0,68	17148	»	»	3,59	4,7	2
	d ²	576	27,9	0,74	20258	»	»	4,24	4,9	2
	e ²	640	27,3	0,91	24368	»	»	5,10	5,3	2
					24008	»	»	5,21	5,1	2

»	g^2	768	25,7	0,86	21680	»	»	4,53	3,9	2
»	a^2	$853\frac{1}{3}$	25,7	0,91	22946	»	»	4,80	3,8	2
»	b^2	960	27,9	1,03	28194	»	»	5,90	4,1	2
»	c^3	1024	21,4	1,03	21621	»	»	4,52	2,9	2
»	d^3	1152	22,5	1,03	22740	»	»	4,76	2,8	2
»	e^3	1280	25,7	1,08	27233	»	»	5,70	2,9	2
»	f^3	spreekt niet aan.				»	»			
»	g^3	1536	20,2	0,8	15853	»	»	3,31	1,5	2
»	a^3	$1706\frac{2}{3}$	20,2	0,86	17040	»	»	3,56	1,4	2
»	b^3	1920	19	0,80	14911	»	»	3,12	1,1	2
»	c^4	2048	20,2	1,54	30518	»	»	6,38	2,6	2
»	d^4	2304	20,2	1,6	31706	»	»	6,63	1,9	2
»	e^4	2540 2540	19	1,54	28704	»	»	6,0	1,6	2
»	f	spreekt niet aan.				»	»			
»	g^4	3072	15,4	1,77	26742	»	»	5,59	1,2	2
Galton fluit	a^4	$3413\frac{1}{3}$	34,7	1,94	66041	»	»	13,82	2,7	2
nieuw model	b^4	3840	34,7	1,94	66041	»	»	13,81	3	2,5
uit de fabriek	c^5	4096	29,6	1,77	51395	»	»	10,76	2,2	2,5
v. Edelmann	d^5	4608	34,7	1,71	58213	»	»	12,18	2,6	3
te München.	e^5	5120	34,7	1,94	66041	»	»	13,82	3,6	4
»	f^5	$5461\frac{1}{3}$	35	2,11	72447	»	»	15,16	4,2	4,5
»	g^5	6144	31,6	1,94	60135	»	»	12,59	3,8	5,5
»	a^5	$6826\frac{2}{3}$	38,1	2,22	82973	»	»	17,37	7,6	9
»	b^5	7680	47,8	2,79	130836	»	»	27,39	11,9	10
»	c^6	8192	34,9	2,57	87986	»	»	18,42	12,3	20
»	d^6	9216	46,5	2,36	107655	»	»	22,54	15,9	20
»	e^6	10240	46,5	2,52	114954	»	»	24,07	15,7	20
»	f^6	$10922\frac{2}{3}$	46,5	2,85	130012	»	»	27,22	16,6	20
»	g^6	12288	39	3,01	115160	»	»	24,11	13,1	20
»	a^6	$13653\frac{1}{3}$	46,5	3,5	159658	»	»	33,43	16,3	20
»	b^6	15360	58,1	3,66	208609	»	»	43,68	21,1	20
»	c^7	16384	58,1	4,07	231977	»	»	48,57	?	?

boven eene orgelpijp. Een paar cM. boven dit vliesje was, op de doos goed aansluitend, een bakje aangebracht met gazen bodem, waarin hagelkorrels konden gegoten worden. Liet men nu de pijp aanspreken, dan trilde het caoutchouc membraantje, vooral als de pijp den eigen toon van 't membraantje gaf, zeer sterk. De uitslag werd gemeten. Door nu hagel in het bakje te gieten werd de geluidafgifte van 't vliesje bemoeielijkt, dus de uitslag van het vliesje kleiner. Deze verkleining van den uitslag was eene maat voor de geluiddempende kracht van de laag hagelkorrels. Het bleek, dat de laag met de fijnste korrels ongeveer drie maal sterker het geluid dempte, dan eene even dikke laag van de grofste korrels. Verder bleek, dat de geluiddempende kracht eenvoudig evenredig was met de dikte van de laag. Bij proeven met geweven stoffen, neteldoek, flanel, katoen en vilt, werden dezelfde uitkomsten verkregen.

Door SIEVEKING en BREHM¹⁾ werd eveneens de geluiddempende kracht van allerlei stoffen, als linnen, vilt en kurksteen onderzocht. Zij plaatsten in een goed geluidisoleerend hokje van 1 M³. inhoud, eene electrisch gedrevene stemvork van de toonshoogte c¹ op de resonantiekast. In eenen van de wanden van het hokje, was eene opening van 25 × 25 cM. gelaten, waarvoor de te onderzoeken stoffen goed sluitend werden aangebracht. Om de sterkte van het nog door de stoflaag gaande geluid te meten, werd op eenigen afstand van het hokje eene volkomen gelijke stemvork, eveneens c¹, de z.g. ontvanger, opgesteld, die, wanneer geluid uit het kastje kwam, mede ging trillen. De amplitudo van deze stemvork was dan de maat voor de hoeveelheid door-gelaten geluid. Hunne resultaten zijn de volgende.

Gewone stoffen, linnen, katoen enz. laten meer dan 90 % door. Maakt men ze nat, dan nog slechts 60 %. Het zooveel gebruikte vilt, meest als een goede isolator opgevat, laat in eene 3 cM. dikke laag nog 81 % van het geluid door. Perst men het sterk, dan wordt het beter geluidisoleerend en laat nog 42 % door. Met kurksteen van 3 cM. dikte werd eene demping van 50 % verkregen. Bedekt men de buitenwanden met gips of cement, dan is de kurksteen een veel betere isolator.

Voor de onderzochte stoffen geldt, dat de doorgankelijkheid in den regel omgekeerd evenredig is met de dichtheid van de

¹⁾ SIEVEKING u. BREHM. *Annalen der Physik.* 4e Folge, bd. 15, S. 808.

stof. Bij proeven met verschillende geluidssterkten bleek, dat de vermindering van het geluid procentisch steeds dezelfde was.

Kurksteen is bij de proeven van SIEVERING gebleken, niet de beste geluidisoleerende stof te zijn, doch zeer goed neutraliseert het dreunen en stooten b.v. van geheele wanden en voorkomt aldus het overdragen van trillingen op vaste lichamen. Daarom is de kurksteen in eene 6 cM. dikke laag, bedekt met cement, als wand om het acustisch kamertje aangebracht.

Als goed geluid dempende en gemakkelijk te hanteeren stof, werden donsveeren gebruikt, die gelijkmatig verspreid aangebracht werden achter de caoutchoucstop in de looden doorboring.

Het geluid gaat dus door de 7 mM. wijde opening, passeert eene losse laag veeren en komt dan door eene korte caoutchoucbuis in het oor van den waarnemer. Door herhaaldelijk probeeren, werd de mate van verzwakking zoo genomen, dat zonder wijziging er in te moeten aanbrengen gedurende de proefneming, eene geheele reeks van $C-c^7$ kon worden nagegaan. Eene eigenaardigheid deed zich nog voor. Het bleek n.l., dat het geluid van de lage pijpen, het beste bemerkbaar van $C-c^1$, gemakkelijker door de geluidverzwakkende laag heendrong, dan dat der hooge pijpen. Om na te gaan of deze eigenaardigheid afhankelijk was van den aard der geluiddempende stof, werden ook andere stoffen op den weg van het geluid aangebracht. Hiervoor dienden houten en gipsen stoppen, die nauwkeurig afsluitend in de looden doorboring werden aangebracht. Ook bij deze stoffen trad het verschijnsel ofschoon in mindere mate op.

Wat de geluidsbronnen betreft, werden de houten gedekte orgelpijpen ditmaal gebruikt, om eene continue reeks tonen, met heele tonen opklimmend te onderzoeken. Door inschuiven van de stempels werden de tusschenliggende tonen verkregen. De mate van inschuiving was voor de lage pijpen door den fabrikant op den steel der stempels aangegeven, en werd voor de hoogere pijpen door stemming met stemvorken en andere fluiten door ons bepaald. Voor twee toonhoogten en wel voor de f^3 en de f^4 werd geen zuivere toon verkregen, zoodat deze twee niet in de reeks voorkomen. De fluiten van EDELMANN, die bij de proeven in de bibliotheek niet gebruikt konden worden, bleken bij de proeven in het acustisch kamertje vrij goed te voldoen. Zij

lieten bij zuiver aanspreken eene vrij groote wisseling in den luchttoevoer toe.

Dit laatste kan niet gezegd worden van de Galtonfluit. Deze toch is zeer gevoelig zelfs voor geringe wijzigingen in den luchttoevoer, zoodat het maar voor ééne reeks gelukte, eene serie met heele tonen opklimmend, van a^4 — c^7 , te bepalen. Er werd nauwkeurig op gelet, dat de Galtonfluit ook werkelijk de bedoelde toonshoogte gaf.

Deze gevoeligheid van de Galtonfluit voor den juisten luchttoevoer, treedt het meest bij tonen hooger dan c^6 voor den dag.

Bij de op boven aangegeven wijze verrichte bepalingen, bevond zich de geluidsbron steeds 1.95 M. verwijderd van de luisteropening, en op dezelfde hoogte, gerekend vanaf de mondopening der pijpen, tot de opening in de caoutchouckurk. In de nu volgende tabellen zijn de gegevens uit de bepalingen, en de berekeningen, direct op ééne tabel vereenigd.

Daar men mag aannemen, dat de losse, dikke trichopiëse en het vloerkleed, het geluid volkomen dempen, en dus nergens terugkaatsing plaats heeft, is aangenomen, dat het geluid zich van uit de geluidsbron over een heel boloppervlak uitbreidde. In ons geval was dit boloppervlak steeds even groot met eenen straal van 1.95 M. Van de energie die zich hierover uitbreidde, bereikte de hoeveelheid, die zich op $\frac{1}{3}$ cm^2 . bevindt, het oor van den waarnemer.

TABEL XII.

Uitkomsten der 2e Reeks genomen met de groote en kleine fluit van EDELMANN. Acustisch kamertje.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillings- getal.	Lucht- verbruik per sec. in cm^2 .	Horizon- tale H_2O druk in cm .	Toegevoerde Energie vol. $\times \text{dr.} \times 981$ in ergs.	Afstand v. d. luisteraar. in M .	Oppervlak heele bol met afstand als straal in cm^2 .	Geluidsenergie p. cm^2 p. sec. in 10^{-2} ergs.	Geluidsenergie op 't trommelvl. p. aantal trill. in 10^{-5} ergs.	Aantal noodige trillingen.
Metalen groote fluit v. Edelmann te München.	e^2	640	33,7	0,34	11242	1,95 M.	477594	2,35	2,5	2
	f^2	$682\frac{2}{3}$	32,6	0,34	10869	"	"	2,28	2,2	2
	g^2	768	32,6	0,34	10869	"	"	2,28	1,9	2
	a^2	$853\frac{1}{3}$	29,6	0,4	11615	"	"	2,43	1,9	2
	b^2	960	27,9	0,34	9310	"	"	1,95	1,4	2
	c^3	1024	28,5	0,29	8113	"	"	1,7	1,1	2
	d^3	1152	30,6	0,29	8701	"	"	1,82	1,1	2
	e^3	1280	33,1	0,29	9408	"	"	1,97	1,0	2
	f^3	$1365\frac{1}{3}$	35,1	0,4	13773	"	"	2,88	1,4	2
Metalen kleine fluit v. Edelmann te München.	g^3	1536	37,1	0,46	16746	"	"	3,51	1,5	2
	a^3	$1706\frac{2}{3}$	40,1	0,4	15735	"	"	3,29	1,3	2
	a^3	$1706\frac{2}{3}$	21,4	0,8	16795	"	"	3,52	1,4	2
	b^3	1920	21,4	0,74	15539	"	"	3,25	1,1	2
	c^4	2048	21,5	0,8	16873	"	"	3,53	1,2	2
	d^4	2304	25,7	0,8	20169	"	"	4,22	1,2	2
	e^4	2560	25,7	0,97	24456	"	"	4,07	1,1	2
	f^4	$2730\frac{2}{3}$	24,6	0,86	20758	"	"	4,35	1	2
	g^4	3072	24,6	0,8	19306	"	"	4,04	0,8	2
	a	$3413\frac{1}{3}$	27,9	0,8	21896	"	"	4,59	0,9	2

TABEL XIII.

Uitkomsten der 3e Reeks 8—10 April 1905. Acustisch kamertje.

Geluidsbron.	Toons- hoogte.	Trillings- getal.	Lucht- verbruik per sec. in cM^3 .	Horizon- tale waterdruk in cM .	Toegevoerde energie vol. $\times \text{dr.} \times 981$ in ergs.	Afstand v. d. luisteraar in M.	Oppervl. v. e. heele bol m. afst. tot straal in cM^2 .	Geluidsenergie p. sec. p. cM^2 . in 10^{-2} ergs.	Geluidsenergie op 't trommenvl. per aantal perioden in 10^{-5} ergs.	Aantal noodige perioden.
Houten gedekte orgelpijpen van uniform maaksel.	C	64	142,8	0,46	64442	1,95 M.	477594	13,49	140,5	2
	D	72	142,8	0,4	56035	»	»	11,73	108,6	2
	E	80	149,2	0,46	67326	»	»	14,1	117,4	2
	F	$85\frac{1}{3}$	153,5	0,46	69268	»	»	14,5	113,7	2
	G	96	134,2	0,86	113217	»	»	23,7	164,6	2
	A	$106\frac{2}{3}$	138,5	0,86	116847	»	»	24,46	152,9	2
	B	120	134,2	0,86	113217	»	»	23,7	131,7	2
	c	128	58,1	0,29	16530	»	»	3,46	18,02	2
	d	144	46,5	0,34	15510	»	»	3,24	15,03	2
	e	160	46,5	0,34	15510	»	»	3,24	13,53	2
	f	$170\frac{2}{3}$	46,5	0,4	18246	»	»	3,82	14,92	2
	g	192	34,9	0,29	9928	»	»	2,08	7,22	2
	a	$213\frac{1}{3}$	39	0,29	11095	»	»	2,32	7,26	2
	b	240	34,9	0,34	11644	»	»	2,43	6,77	2
	c ¹	256	29	0,23	6543	»	»	1,37	3,57	2
	d ¹	288	29	0,29	8250	»	»	1,72	4	2
	e ¹	320	29,6	0,29	8417	»	»	1,76	3,67	2
	f ¹	$341\frac{1}{3}$	29,6	0,23	6681	»	»	1,4	2,73	2
	g ¹	384	27,9	0,34	9310	»	»	1,95	3,38	2
	a ¹	$426\frac{2}{3}$	28,5	0,34	9506	»	»	1,99	3,11	2
	b ¹	480	29	0,29	8250	»	»	1,72	2,4	2
	c ²	512	26,8	0,74	19453	»	»	4,07	5,3	2
	d ²	576	26,8	0,8	21033	»	»	4,4	5,1	2

»	c ²	640	27,9	0,86	23544	»	»	4,93	5,14	2
»	f ²	682 ² / ₃	28,5	0,86	24044	»	»	5,03	4,92	2
»	g ²	768	26,8	0,86	22612	»	»	4,73	4,11	2
»	a ²	853 ¹ / ₃	27,3	0,91	24368	»	»	5,10	3,99	2
»	b ²	960	27,9	0,91	24907	»	»	5,22	3,62	2
»						»	»			
»	c ³	1024	20,2	0,86	17040	»	»	3,57	2,32	2
»	d ³	1152	22,5	0,97	21415	»	»	4,48	2,59	2
»	e ³	1280	22,5	1,03	22739	»	»	4,67	2,48	2
»	f ³	1365 ¹ / ₃	spreekt slecht aan			»	»			
»	g ³	1536	20,2	0,68	13479	»	»	2,82	1,23	2
»	a ³	1706 ² / ₃	21,4	0,8	16795	»	»	3,52	1,37	2
»	b ³	1920	21,4	0,86	18050	»	»	3,78	1,31	2
»	c ⁴	2048	21,4	1,71	35904	»	»	7,51	2,45	2
»	d ⁴	2304	21,4	1,71	35905	»	»	7,51	2,18	2
»	e ⁴	2560	20,2	1,65	32697	»	»	6,85	1,78	2
»	f ⁴					»	»			
»	g ⁴	3072	16,6	1,88	30617	»	»	6,41	1,39	2
Galton fluit.	a ⁴	3413 ¹ / ₃	25,7	1,43	36052	»	»	7,55	1,47	2
»	b ⁴	3840	29	1,48	42104	»	»	8,82	1,91	2,5
»	c ⁵	4096	29,6	1,6	46460	»	»	9,73	1,98	2,5
»	d ⁵	4608	30,6	1,6	48030	»	»	10,1	2,18	3
»	e ⁵	5120	31,6	1,94	60135	»	»	12,59	3,28	4
»	f ⁵	5461 ¹ / ₃	29,6	1,88	54593	»	»	11,43	3,14	4,5
»	g ⁵	6144	29	1,88	53484	»	»	11,2	3,34	5,5
»	a ⁵	6826 ² / ₃	34,9	2,45	83885	»	»	17,56	7,72	9
»	b ⁵	7680	34,8	2,62	89448	»	»	18,7	8,13	10
»	c ⁶	8192	34,7	1,63	80334	»	»	16,8	13,7	20
»	g ⁶	12288	35,2	2,44	84258	»	»	17,6	9,57	20
»	c ⁷	16384	47,8	3,26	152869	»	»	32	?	?

Aan de resultaten uit de proeven in het acustisch kamertje genomen, is natuurlijk eene andere waarde te hechten, dan aan die uit de twee vorige hoofdstukken. Door het invoegen van eene geluiddempende laag hebben de uitkomsten geene absolute waarde meer. Toch behouden zij, daar voor alle toonhoogten dezelfde verzwakking is aangebracht, eene relatieve waarde in verband met de uitkomsten der vorige hoofdstukken.

De energiewaarden van de op het trommelvlies en per noodig aantal trillingen berekende minima zijn in 10^{-5} ergs aangegeven. Bij vergelijking nu blijkt er eene zeer groote overeenkomst te bestaan, zoowel wat het algemeen beloop, als wat enkele eigenaardigheden der reeksen aangaat. Daar dezelfde energiewaarden in de vorige reeksen in 10^{-8} ergs zijn aangegeven, lijkt het niet te gewaagd, het besluit te trekken, dat de ingevoerde geluiddempende laag veeren, eene 1000-voudige verzwakking op het geluid heeft uitgeoefend.

HOOFDSTUK IV.

Gevolgtrekkingen.

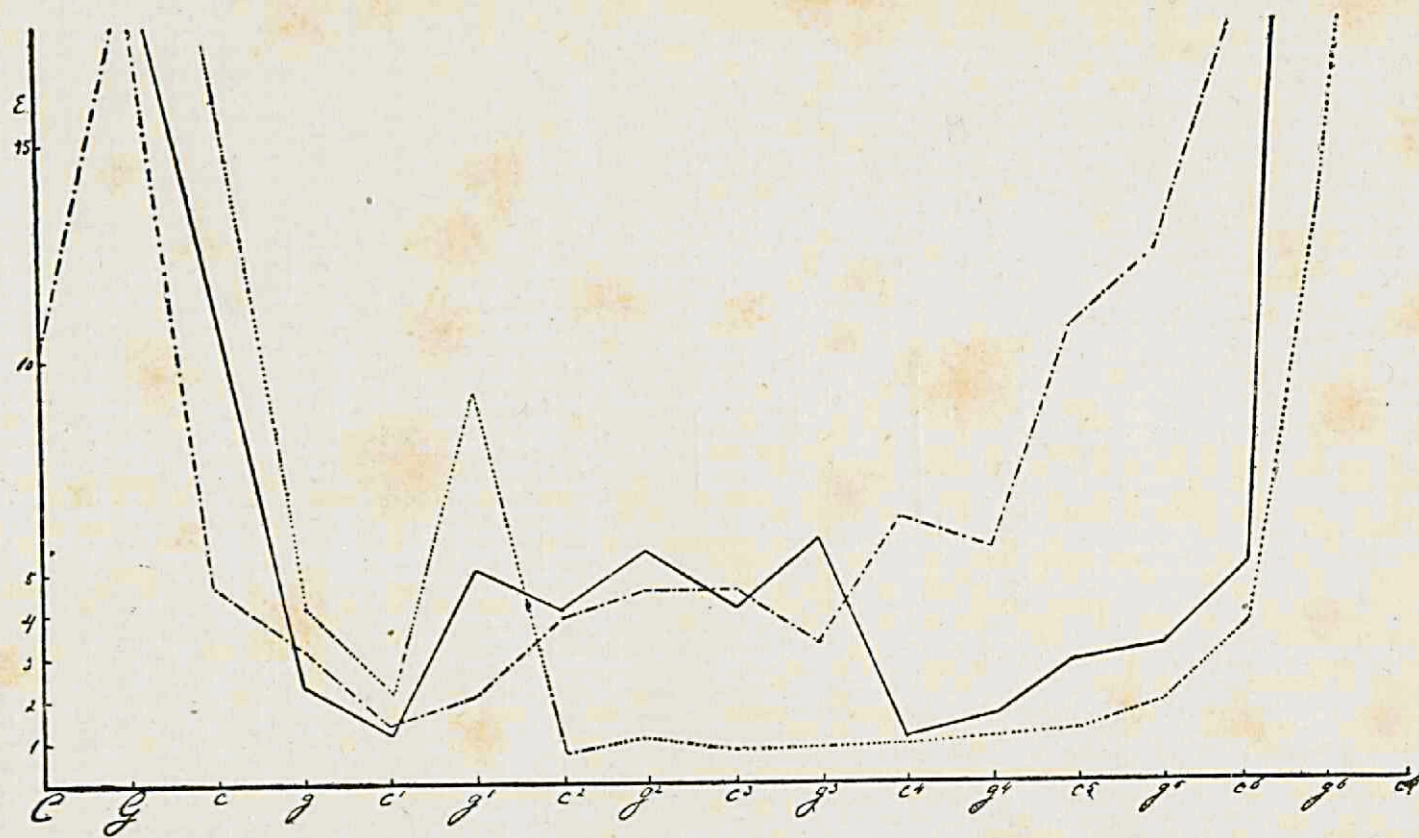
Voor een gemakkelijker overzicht, zijn hieronder een paar curven afgedrukt. In deze curven zijn op de ordinaten de energiewaarden aangegeven, behoorend bij de op de absis geplaatste toonhoogten.

De doorlopende lijn, geeft de resultaten van de proeven te Milligen, de gestippelde lijn die uit de bibliotheek, en de onderbroken — — lijn, die uit het acustisch kamertje weer.

Op curve I is de »geluidssterkte op den grens van het hooren' per cm^2 . en per seconde aangegeven, voor de reeks te Milligen in 10—5 ergs, in de bibliotheek in 10—4 ergs, voor de reeks in het acustisch kamertje in 10—2 ergs.

Op curve II zijn de »absolute minima perceptibilia" aangegeven, de energie op het trommelvlies en per noodig aantal trillingen, voor de reeksen te Milligen en in de bibliotheek in 10—8 ergs, voor die uit het acustisch kamertje in 10—5 ergs.

Voor al uit curve II blijkt, dat het verloop van de drie, met dezelfde geluidsbronnen, doch onder zeer verschillende uitwendige omstandigheden, bepaalde reeksen vrijwel hetzelfde is.



Acustische energie per cm^3 . per seconde vereischt tot het teweegbrengen van eene minimale gewaarwording.

Ten einde nu gemakkelijk de tot nu toe door de verschillende onderzoekers gevondene energiewaarden te kunnen vergelijken, dienen de volgende twee tabellen, waarvan de gegevens voor tabel XIV ontleend zijn aan de publicaties van genoemde onderzoekers zelve, en die van tabel XV daaruit berekend, volgens de gegevens van ABRAHAM en BRÜHL, wat aangaat het noodige aantal trillingen.

TABEL

Vergelijkingstabel van de energiehoeveelheid in 10^{-8} erg per cm^2 .

	100	C	$\frac{g}{\text{of } a}$	200	c^1	$\frac{g^1}{\text{of } a^1}$	400	c^2	g^2	800
Töpler en Boltzmann . .			9900							
Rayleigh-pijp										
Rayleigh-stemvorken . .					90	43		43		
Wead		7950			295	260		1100	1590	
Zwaardemaker en Quix .		5894	9900		2707	469		1306	3727	
Wien 1888.			857			612				
Wien 1903.	140			1,2			0,016			0,0008
Webster 1904.					6144					
Minkema 1904		12045	2395		1238	4982		4108	5396	

TABEL

Vergelijkingstabel van de energiehoeveelheid in 10^{-8} erg op het

	100	C	$\frac{g}{\text{of } a}$	200	c^1	$\frac{g^1}{\text{of } a^1}$	400	c^2	g^2	800
Töpler en Boltzmann .			36,6							
Rayleigh-pijp										
Rayleigh-stemvorken .					0,23	0,7		0,05		
Wead		41,4			0,72	0,45		1,56	1,38	
Zwaardemaker en Quix		30,7	36,6		7,1	10,6		1,7	3,2	
Wien 1888			2,6			0,92				
Wien 1903	0,7			0,007			0,00003			0,0000007
Webster 1904					8					
Minkema 1904		62,7	8,3		3,2	8,7		5,4	4,7	

XIV.
per seconde (geluidssterkte op den grens van het hooren).

c ³	g ³	1600	c ⁴	$\frac{g^4}{\text{of } f^4}$	2300	c ⁵	g ⁵	6400	c ⁶	g ⁶	12800
710				4500							
5530	6687		3486	3652		6564	8214		11124	18336	
		0,00025			0,00025			0,0008			0,009
4256	5681		1075	1492		2894	3170		5113	45485	

XV.
trommelvlies per noodige trillingen (absolute minima perceptibilia).

c ³	g ³	1600	c ⁴	$\frac{g^4}{\text{of } f^4}$	3200	c ⁵	g ⁵	6400	c ⁶	g ⁶	12800
				0,9							
0,49											
3,6	2,9		1,1	0,79		1,33	2,45		9	9,94	
		0,00000005			0,0000003			0,000005			
2,8	2,5		0,4	0,3		0,6	1		4	24,8	

Vat men de uitkomsten van mijne drie bovengenoemde reeksen van bepalingen samen, dan zijn deze vrijwel gelijk. De nog bestaande verschillen vinden voldoende verklaring in de uitwendige omstandigheden, waaronder de bepalingen verricht zijn. Bij de berekeningen is de theoretische afstandswet (uitbreiding van het geluid over eenen halven bol) aangenomen. Voor de bepalingen op de heide te Milligen mag men dit laatste wel als juist beschouwen, en voor de bepalingen in de bibliotheek als ten naastenbij juist. Bij de proeven in het acustisch kamertje, veronderstelden wij eveneens de theoretische verhoudingen bijna volkomen verwezenlijkt, op gronden, die uit de beschrijving van dit vertrek als vanzelf voortvloeien. Dit alles gaat nimmer volkomen door, zoodat eenige schommeling in de uitkomsten niet mag bevreemden.

Iets dergelijks geldt voor eene nog aan te brengen correctie voor energieverlies, hetzij in de geluidsbron, hetzij onderweg.

Ten opzichte van dit energieverlies zou men WEBSTER kunnen volgen. Deze toch geeft aan als »efficiency" voor houten pijpen 0,0013 en voor metalen pijpen 0,0038, dus zeker niet minder dan 0,001. Het een duizendste deel van de in bovenstaande tabellen aangegeven energiehoeveelheid zou dus noodig zijn voor de minima perceptibilia. Drukt men dus de in bovengenoemde tabellen aangegeven energiewaarden uit in 10—11 ergs, in de plaats van in 10—8 ergs, dan is zeker de grootst mogelijke correctie aangebracht. In het beloop der waarden echter is daardoor geene verandering gekomen.

Met voldoende zekerheid, meen ik dan ook uit de resultaten van het onderzoek de volgende gevolgtrekkingen te mogen maken:

1e dat de gevoeligheid van ons oor van $C-g^1$ snel toeneemt, daarna onder geringe schommelingen tot g^5 nagenoeg gelijk blijft;

2e dat ons oor slechts één maximum van gevoeligheid heeft, gelegen in het viergestreepte octaaf;

3e dat in de redelijk gevoelige zone van g^1-g^5 de minima perceptibilia van dezelfde orde zijn;

4e dat het absolute minimum perceptibile gelegen is bij g^4 en ongeveer 1×10^{-8} , respectievelijk na correctie voor energieverlies 1×10^{-11} ergs bedraagt.

STELLINGEN.

I.

De studie van de microscopische anatomie van het gehoor-
orgaan van dansmuizen en andere doofstomme diersoorten,
moet den grondslag vormen voor de kennis van de pathologisch-
anatomische afwijkingen der aangeboren menschelijke doof-
stomheid,

II.

Het Nederlandsch bezit, in acustischen zin, slechts ééne
tweeklank, en wel de »ei”.

III.

De meening van BUNGE en leerlingen, dat anorganisch ijzer
niet zou worden gebruikt voor de vorming van haemoglobine
is onjuist.

IV.

Het infectieus zijn, van lijders aan scarlatina, in hunne recon-
valescentie, hangt *niet* af van het al of niet vervellen, doch van
den toestand der mucosae van middenoor, neus en keel.

V.

Calcium zouten zijn in hunne werking op den darm, als anta-
gonisten op te vatten van de salinische, zoowel als van de
plantaardige en alkaloïdachtige laxantia.

VI.

De verbruiks-theorie („Aufbrauch-theorie") van EDINGER verklaart het beste, de meeste symptomen der spinale systeemziekten en periphere neuritiden.

VII.

Paralyse van den niet graviden uterus, als reactie op sondeeren of curetteeren, komt niet voor.

VIII.

Voor bezwaren gevende prostatahypertrophieën, is de prostatactomie de beste behandelingsmethode.

IX.

Perubalsem is zeer aan te bevelen bij de behandeling van gecompliceerde fracturen en scheurwonden.

X.

Het intraoculair desinfecteeren, door middel van jodoform, is beslist af te keuren.

XI.

De onaangename verschijnselen, optredende door het bijeenzijn van vele menschen in eene beperkte ruimte, worden *niet* veroorzaakt door met de uitademingslucht vrijkomende z.g. anthrotoxinen.

XII.

Het voorkómen van het uitbreken van eclampsia gravidarum, behoort tot den taak van den behandelenden medicus.

XIII.

Het *goed* gorgelen (met antiseptische vloeistoffen) heeft eene, mechanisch reinigende, uitwerking, die zich *ook* over bogen, tonsillen en een deel van den pharynxwand uitstrekt.
