

Max Planck Research Group  
Epistemes of Modern Acoustics

---

# Sound & Science: Digital Histories



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



**MAX PLANCK INSTITUTE  
FOR THE HISTORY OF SCIENCE**

# GELUIDMETINGEN

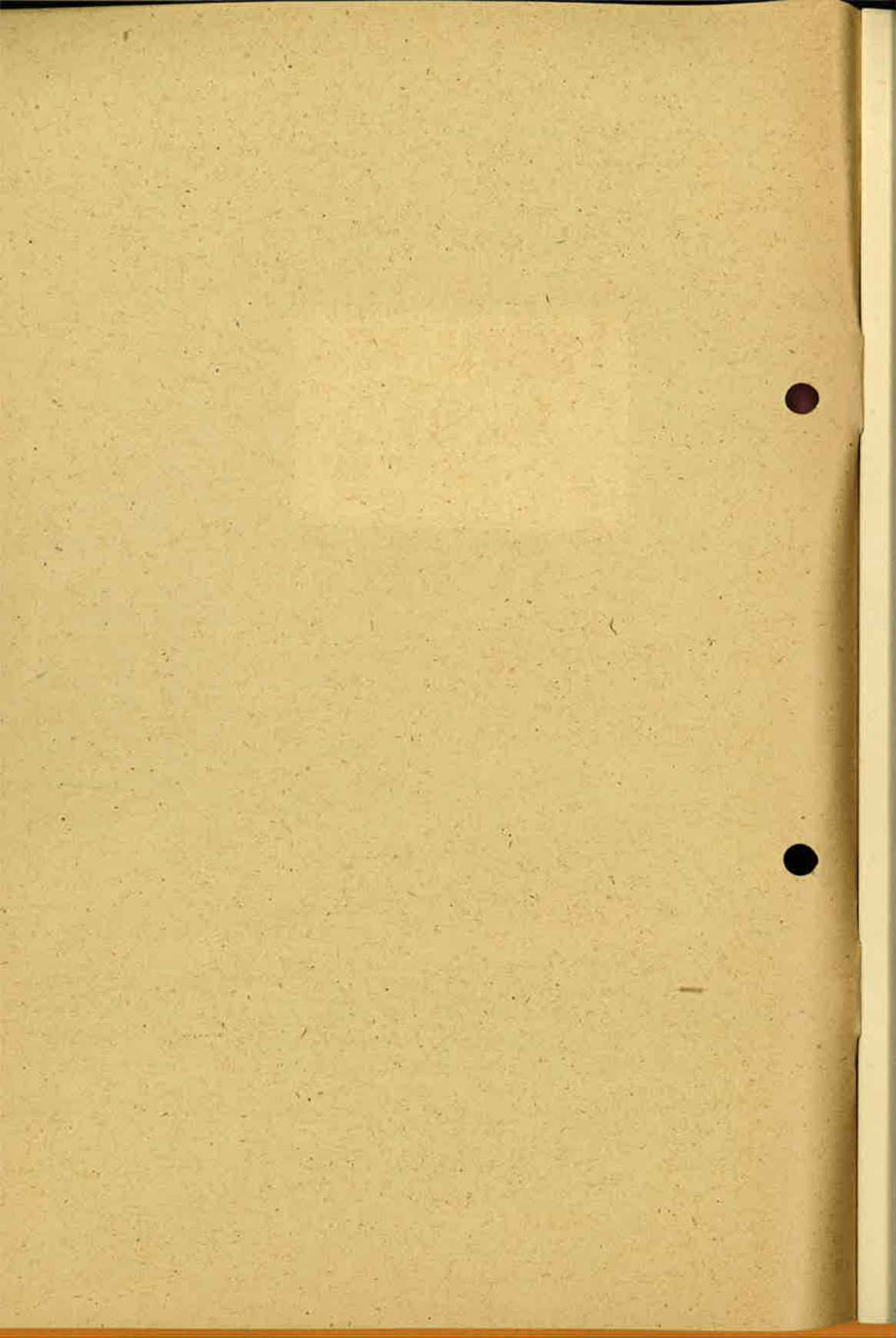
door

PROF. DR. C. ZWIKKER.

---

PUBLICATIE No. 24  
VAN DE  
GELUIDSTICHTING  
DELFT - HOLLAND

VOORDRACHT GEHOUDEN IN DE  
MAATSCHAPPIJ DILIGENTIA TE 'S-GRAVENHAGE



# GELUIDMETINGEN

door

PROF. DR. C. ZWIKKER.

---

Geluid is, zooals ik waarschijnlijk bekend mag veronderstellen, de psychische indruk, teweeggebracht door luchttrillingen, die ons oor bereiken. Daarbij zijn de luchttrillingen nog daardoor gekenmerkt, dat de frequentie binnen bepaalde grenzen moet vallen, (namelijk tusschen 20 en 20.000 trillingen-per-seconde) en dat de amplitudo binnen bepaalde grenzen moet vallen (nl.  $\frac{1}{10}$  Å en  $\frac{1}{10}$  mm). Het oor is een wel zeer gevoelig instrument. Men vergelijk de juist nog hoorbare amplitudo van  $\frac{1}{10}$  Ångstrom-eenheid met den diameter van een enkel waterstof-atoom, die ongeveer 1 Ångstrom-eenheid bedraagt. Men merke bovendien op, dat het begin der pijngewaarwording ligt bij een amplitudo, die met het oog nauwelijks is waar te nemen.

Nauw verbonden met deze kleine amplituden is de in het algemeen kleine waarde van de energie, die in geluidgolven aanwezig is. De krachtige sirenes, die toegepast worden als waarschuwingsapparaat voor de luchtbeveiliging, zijn de sterkste geluidbronnen, die wij hebben, zij stralen ongeveer 1 kilowatt aan geluidsenergie af. Hiermee overstemmen zij elk symphonie-orkest, dat al zwaar bezet moet zijn, wil het een geluidsenergie van 100 watt produceeren. De menschelijke stem produceert een geluidsenergie van 10 à 100 microwatt, overeenkomend respectievelijk met de toestanden van gewoon spreken en schreeuwen. Tien millioen schreeuwers zouden 1 kilowatt kunnen voortbrengen.

Het laat zich hooren, dat de objectieve meting van een betrekkelijk

energie-arm fenomeen, zooals het geluid is, langen tijd bijzondere moeilijkheden heeft meegebracht. Men is daarin eerst geslaagd, nadat de radio-techniek ons versterkers had geleverd, die langs electrischen weg trillingsenergieën met den factor  $10^{16}$  en meer konden versterken.

In principe bestaat elke geluidmeter uit een microfoon, die de luchttrillingen omvormt tot electrische wisselstroomen, een versterker, die deze electrische wisselstroomen versterkt en een meet-instrument, dat op deze versterkte stroomen reageert. Wat men op die manier meet, is een physische grootheid, nl. de amplitude van de luchttrillingen. Ons interesseert intusschen, een maat te hebben voor den psychischen geluidsterkte-indruk en wel liefst een even-

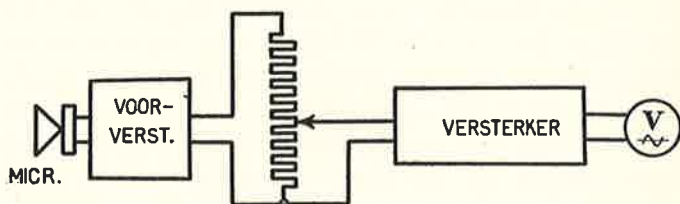


Fig. 1.

redige maat. Bij de bereiking van dat doel ontmoeten wij diverse belangwekkende problemen, die hier besproken zullen worden.

Bij het zuiver physische gedeelte van de meting doen zich, afgezien van de eigenaardigheden, die optreden bij het bouwen van versterkers, twee interessante vraagstukken voor, die onmiddellijk van acoustischen aard zijn. Het eerste betreft de vraag, hoe wij komen tot een absolute meting van de trillingsenergie, uitgedrukt in cgs-eenheden.

Dit vraagstuk is volkomen bevredigend opgelost in 1922 door de invoering van de condensator-microfoon door den Amerikaan E. C. WENTE <sup>1)</sup>, werkzaam in de Bell Telephone Laboratories. Een

<sup>1)</sup> E. C. WENTE, Phys. Rev. 19, 498, 1922.

aankomende geluidsgolf bestaat uit luchtverdunningen en luchtverdichtingen, die een geringe drukschommeling van een bepaalde frequentie vormen. Deze drukschommeling zal de dunne membraan van de condensator-microfoon aan het trillen brengen. De elektrische capaciteit van den condensator, gevormd door de membraan en de metalen achtergrond verandert daardoor eveneens periodiek en het is voor de moderne zwakstroomtechniek geen moeilijke opgave, deze minieme capaciteitsschommelingen om te tooveren tot gemakkelijk afleesbare uitslagen van een wijzerinstrument.

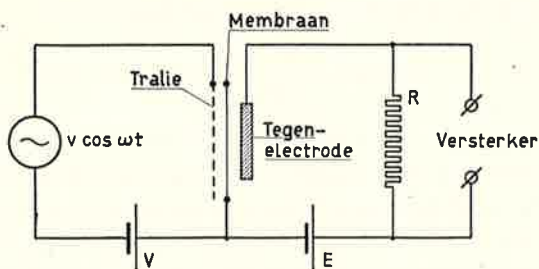


Fig. 2.

Alleen men heeft dan nog niet de geringste notie, hoe groot, uitgedrukt in dyne/cm<sup>2</sup>, de drukschommelingen op de membraan geweest zijn.

Hiertoe nu bezigt men het tralie, dat voor de membraan is geplaatst. Men begint met tusschen tralie en membraan een constante gelijkspanning van 100 à 200 Volt aan te brengen. Daardoor trekken tralie en membraan elkaar aan wegens de electrostatische krachten. De formule voor de kracht per cm<sup>2</sup>, dus de druk  $p$  is de volgende:

$$p = \frac{V^2}{8 \pi d^2} \quad (\text{Lord KELVIN})$$

( $V$  is de spanning in electrostatische eenheden,  $d$  de afstand membraan-tralie in cm).

Vervolgens superponeert men op deze steeds aanwezige gelijk spanning een kleine wisselspanning van dezelfde frequentie als voorheen het geluid had, zoodat de totale spanning wordt:

$$V + v \cos \omega t.$$

Bij het berekenen van de druk  $p$  moet deze grootheid gequadrateerd worden, wat geeft:

$$(V^2 + \frac{1}{2} v^2) + 2 Vv \cos \omega t + \frac{1}{2} v^2 \cos 2 \omega t.$$

Het eerste stuk is een constante en komt niet door de versterker heen. De derde term is wegens de factor  $v^2$  verwaarloosbaar klein, zoodat alleen de middelste overblijft en dus:

$$p = \frac{2Vv \cos \omega t}{8 \pi d^2}.$$

Deze kunstmatig opgewekte druk varieert volgens  $\cos \omega t$  met de tijd, zooals ook de geluidsdruk doet en zal dus de membraan op dezelfde wijze agiteeren. Echter is de absolute waarde van de amplitude van dezen druk volkomen bekend en daarmee dus de condensator-microfoon met de bijbehorende versterkerinrichting in absolute maat geijkt. Men herhaalt deze ijking voor alle toonhoogten, dat wil zeggen voor verschillende waarden van de grootheid  $\omega$ . Men is wel verplicht, de ijking bij alle toonhoogten uit te voeren, omdat de membraan voor verschillende toonhoogten verschillend sterk op den geluidsdruk aanspreekt en de versterker alle frequenties niet evenveel versterkt (resonantie-verschijnselen).

Kent men eenmaal de amplitude van den geluidsdruk, dan kan men daaruit gemakkelijk berekenen, wat de overige grootheden, zooals de bewegingsamplitude, de energiestroom etc. zijn. Dit is reeds alles door RAYLEIGH in zijn klassieke boek: *Theory of Sound*, uiteengezet.

Het tweede interessante punt bij deze zuiver physische metingen spruit voort uit het feit, dat het oor zoo'n groot gevoeligheidsgebied heeft. De afstand tusschen gehoorgrens en pijngrens bedraagt een

factor  $10^7$  in de amplitudo of, wat op hetzelfde neerkomt, een factor  $10^{14}$  in de energie. Nu bestaan er instrumenten, waarmede men een spanning van 1 Volt nauwkeurig kan aflezen tot op 1 promille, maar op dat instrument kan men een spanning van 1 millivolt niet meer aflezen. Een normaal meetinstrument heeft een schaal, die slechts over een gebied, dat een factor 10 omspannt, met de gewenschte nauwkeurigheid kan worden gebruikt. Moet men een grootheid meten, die meer dan een factor 10 varieert, dan dient men een serie instrumenten van verschillende gevoeligheid tot zijn beschikking te hebben, respectievelijk een instrument met vele meetbereiken. Dit is echter bij onze acoustische metingen niet mogelijk, omdat wij er niet op mogen rekenen, dat de versterker, die tusschen microfoon en meetinstrument is geschakeld, over een dergelijk groot meetgebied een constante versterkingsfactor heeft, of — met een technischen term — lineair blijft. Vooral in de laatste versterkingstrappen zien wij de afwijkingen optreden.

Om dit euvel op te heffen, dient de potentiometer, die in fig. 1 is weergegeven. Deze wordt zoo ingesteld, dat de naversterker altijd bijna dezelfde, niet te zware belasting krijgt en dus aan betrekkelijk lichte eischen van lineariteit behoef te voldoen. Alleen van microfoon en voorversterker wordt geeischt, dat ze voor alle voorkomende geluidsdrukken lineair blijven werken. Het is duidelijk, dat de geluidsterkte nu niet zoozeer wordt aangeduid door den uitslag van het meetinstrument, als wel door de plaats van de schuif op den potentiometer. Nog een stapje verder, en wij gaan geheel overstag, stellen de wijzer van den meter altijd op één en hetzelfde punt in door middel van den potentiometer en lezen op de potentiometerschuif de geluidsterkte af.

Dit is op het oogenblik de gebruikelijke tactiek. Om gemakkelijk de fracties  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  enz. af te kunnen takken, bestaat de potentiometer uit klossen van verschillende draaddikte en zeer verschillende weerstand. De contactplaatsen zijn niet evenredig, maar logaritmisch over den weerstand verdeeld, zoodat de van den potentiometer



afgenomen spanning telkens met eenzelfde factor toeneemt, als wij een contactplaats verder gaan. Op die manier gelukt het om kleine waarden van den geluidsdruk met dezelfde procentueele fout te meten als groote waarden.

Wat voor getallen moeten wij nu op de potentiometerschaal aanbrengen?

Een bepaalde stand van de schuif leert ons namelijk niet eenduidig de waarde van de drukamplitudo op de microfoon, omdat, zooals ik reeds opmerkte de gevoeligheid van de opstelling verschillend is voor verschillende frequenties. De microfoon en trouwens ook de voorversterker en de naversterker zijn zoogenaamd „selectief”. Het gaat dus niet zonder meer aan de schuif af te ijken in bijv. „millibars”<sup>1)</sup> Ik zeg met opzet: „niet zonder meer”, want, indien wij erop zouden staan een millibar-schaal aan te brengen, dan zou de versterkertechniek ons daartoe wel in staat stellen. Men kan namelijk de versterker wel zoo bouwen, dat de selectiviteiten van microfoon en versterker elkaar juist compenseeren.

Maar onze eischen zijn geheel anders. Hoe zeer misschien de aflezing in millibars ons uit een physisch oogpunt zou bevredigen, wij zouden nog geen maat hebben voor de psychisch ondervonden geluidsterkte. Immers ook ons oor is selectief en waardeert een millibar drukamplitude van 1000 perioden per seconde heel anders dan dezelfde drukamplitude van 100 perioden per seconde.

W. A. MUNSON<sup>2)</sup>, weer iemand van de Bell Telephone Laboratories heeft nauwkeurige metingen verricht over de selectiviteit van het oor. In fig. 3 is het resultaat weergegeven. Op de horizontale as is de geluidsfrequentie,  $\nu$ , uitgezet, op de verticale as de energie-stroomdichtheid,  $I$ , beide op een logarithmische schaal. Een punt in dit diagram stelt dus voor een toon van een bepaalde toonhoogte  $\nu$  en een bepaalde physische sterkte  $I$ . De krommen

<sup>1)</sup> 1 bar = 1 dyne per cm<sup>2</sup>.

<sup>2)</sup> W. A. MUNSON, Journ. Acourt. Soc. of America, 4, 7, 1932.

in de figuur verbinden nu de tonen, die op het oor den indruk maken van gelijke geluidsterkte. Het zijn de zoogenaamde Munsonsche lijnen. P en Q liggen op dezelfde Munsonsche lijn, stellen dus 2 tonen voor, die even luid klinken, ofschoon de fysische in-

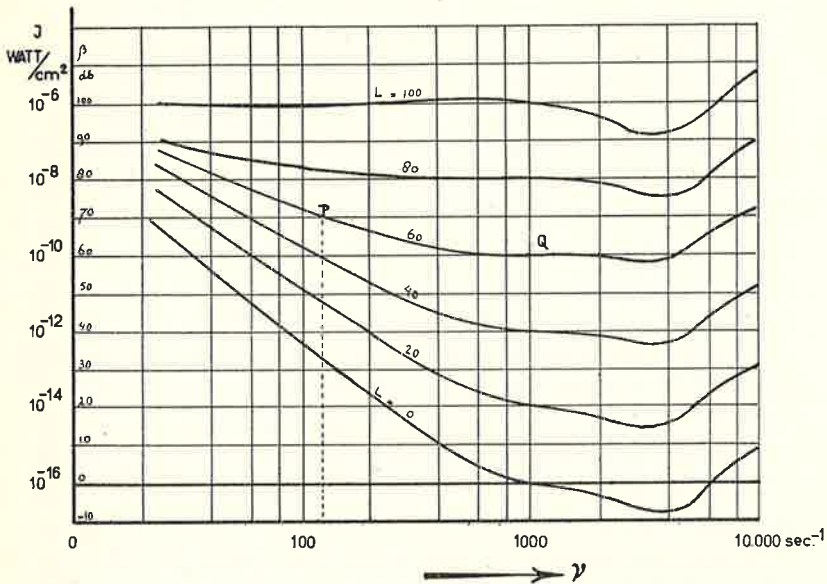


Fig. 3.

tensiteit van P 10 keer zoo groot is als die van Q. Het oor is dus voor de frequentie van P minder gevoelig dan voor de frequentie van Q.

De onderste kromme, aangegeven met „ $L = 0$ ”, verbindt alle tonen, die op de grens van de hoorbaarheid liggen; het is de gehoor-grens. Het oor is het gevoeligst voor de frequentie 3000, voor tonen beneden 1000 perioden per seconde neemt de gevoeligheid aanmerkelijk af. Intusschen zien wij, dat voor sterkere geluiden (zie de bovenste geteekende krommen) de selectiviteit grootendeels verdwenen is.

Bij de krommen staan de getallen  $L = 100$  etc. Dit beteekent, dat langs deze lijn de „luidheid” gelijk is aan 100 „foon”. Van alle oneindig vele Munsonsche lijnen zijn slechts die geteekend, die bij de frequentie  $1000 \text{ sec}^{-1}$  vertegenwoordigen de energiestroomdichtheden  $10^{-16} \text{ watt/cm}^2$ ,  $10^{-14}$  etc., dus die bij deze frequentie telkens een factor 100 in energie verschillen. Het recept, waarmede wij tot de getallen komen, is als volgt. Telkens, als de energie van den 1000-perioden-toon een factor 10 toeneemt, zegt men, dat de toon een bedrag 10 foon in loudheid is toegenomen. Neemt de energie toe met een factor 100, dat is dus 2 keer een factor 10, dan neemt de loudheid met 20 foon toe. Als wij nu willekeurig de loudheid  $L = 0$  stellen op de gehoorgrens, dan ontstaan de getallen voor  $L$ , die  $U$  in de figuur ziet aangegeven. Natuurlijk stellen wij langs een Munsonsche lijn  $L$  constant. Wegens de convergentie der lijnen naar de zijde der lage toonhoogte, komt een factor 10 in de energie daar niet meer overeen met een loudheidsverschil van 10 foon. Bij een toonhoogte van 100 perioden-per-seconde (dat is het geluid, dat brommende transformatoren voortbrengen) komt een factor 10 in de energie zelfs overeen met 20 foon, in plaats van 10 foon.

Ik moge opmerken, dat deze definitie van loudheid volkomen willekeurig is. De lijnen van constante loudheid zijn niet willekeurig, wel de getallen, die er bij staan. Wij hadden als maat voor de geluidsterkte ook elke andere functie van de  $I$  kunnen nemen in plaats van de nu gekozen; die in formule luidt:

$$L = 10 \log \frac{I \text{ (bij } \nu = 1000)}{10^{-16} \text{ watt/cm}^2}.$$

Het is dan ook zeer de vraag, of de grootheid  $L$  evenredig is met de psychische sterkteindruk, ja, ik kan er zelfs onmiddellijk aan toevoegen, dat dit in het geheel *niet* het geval is.

Alvorens van fig. 3 af te stappen, vestig ik nog Uw aandacht op de links aangebrachte decibelschaal. Dit is een logarithmische schaal

voor de fysieke grootheid  $I$ , welke laatste uitgedrukt werd in  $\text{Watt/cm}^2$  en wel is, onafhankelijk van de frequentie:

$$\text{Aantal decibel} = 10 \log \frac{I}{10^{-16} \text{ watt/cm}^2}.$$

Bij een frequentie van  $1000 \text{ sec}^{-1}$  valt de foonschaal per definitie samen met de decibelschaal, bij alle andere frequenties niet.

De woorden decibel en foon worden nog dikwijls door elkaar gebruikt. U kunt intusschen op de fig. aflezen, dat voor sterke geluiden het aantal foons ongeveer hetzelfde is als het aantal decibel. Er is alleen verschil voor zwakke en lage tonen.

Ik kom nu terug op de selectiviteit van de geluidmeter en herinner eraan, dat de zwakstroomtechnici door geschikte keuze van capaciteiten, weerstanden, zelfinducties enz. elke gewenschte selectiviteit kunnen verkrijgen. Het ligt nu voor de hand deze selectiviteit overeen te laten stemmen met die van het oor en daarvoor te nemen een Munson'sche lijn uit het midden van het diagram van fig. 3, dus bijv. die, behoorende bij Luidheid  $L = 60$  foon. Nog beter is het, de selectiviteit variabel te maken, zoodat hij bij alle geluidsterkten overeenstemt met die van het oor. Dit is te bereiken, door te zorgen, dat met den stand van den potentiometer er iets wordt veranderd in de voorversterker, doordat bijv. een draaibare condensator of een ingewikkelder mechanisme gekoppeld is met de schuif van den potentiometer. Ja, het is zelfs mogelijk, de selectiviteitskromme continu met de geluidsterkte te laten veranderen en wel door den microfoonstroom zelf. Men kan deze zoodanig door een spoel, gewikkeld op ijzer van bijzondere magnetische eigenschappen, zenden, dat automatisch de gevoeligheid van den geluidmeter afneemt, als het geluid zwak en laag van toon wordt.

Wanneer aldus overeenstemming is bereikt tusschen het oor en het instrument voor de relatieve waardeering van geluiden van verschillende toonhoogten, dan is het mogelijk, den potentiometer

te voorzien van een schaal, die afgeteekend is in foon. Fig. 4 geeft U den indruk van den beteekenis van eenige foon-waarden.

De nieuwe ontwikkeling der geluidmeters gaat daarheen, dat de instelling van deze potentiometer volkomen automatisch gaat met behulp van een hulpmotortje. In principe zou men dit als volgt kunnen bewerkstelligen. Men brenge op de wijzerplaat van het

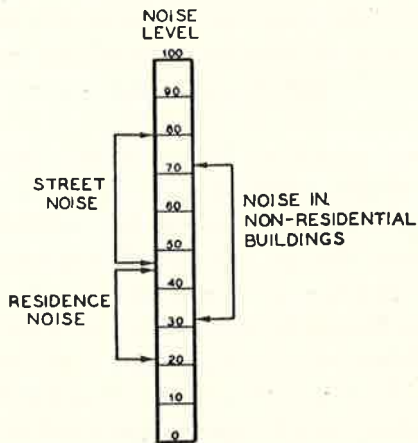


Fig. 4.

meetinstrument twee stiftjes aan, dicht bij elkaar, waartusschen zich de naald bevindt. Maakt de naald contact met het linksche stiftje, dan wordt hierdoor de stroom van den hulpmotor ingeschakeld, die het potentiometer-contact zoodanig verschuift, dat de stroom in het meetinstrument aangroeit; maakt daarentegen de wijzer contact met de rechter stift, dan wordt de stroom van den hulpmotor in tegengestelden richting ingeschakeld, het potentiometercontact verschuift zoo, dat de meterstroom afneemt. Door dit mechanisme moet de wijzernaald tenslotte vrij tusschen beide stiftsen komen te zweven, hij wordt, ook bij wisselende geluidsterkte,

altijd op dezelfde plaats gehouden. Het potentiometercontact volgt daarbij volkomen automatisch de veranderingen in de geluidsterkte.

Het wijzerinstrument verliest hierbij volkomen zijn karakter van aflees-apparaat en is dan ook in de modernste uitvoeringen niet meer aanwezig. Het is vergroeid met het mechanisme, dat het glijcontact van den potentiometer moet bewegen. Dit mechanisme is ook geen gewone electromotor. Deze zou een te groote massa-traagheid bezitten. In de plaats daarvan werkt men met mechanismen, die ontwikkeld zijn in de techniek der electriche afstandsbediening en hun belangrijkste toepassing vinden in de zoekers van automatische telefooncentrales. Het zijn zeer lichte mechanismen met stijgraderen, zooals U die uit het horloge kent, electriche relais, differentieel-koppelingen en andere vernuftig bedachte onderdeelen uit de instrumentmakerswerkplaats. Op deze wijze is de snelheid van instelling van het glijcontact zoodanig vergroot, dat bijvoorbeeld de intensiteitsveranderingen van de klanken van de spraak gevolgd kunnen worden.

Een consequentie van deze groote instellingssnelheid is, dat men met het oog den stand van den potentiometer niet meer kan volgen. In de plaats van de gewone visuele aflezing dient dan te komen een registratie op een afloopenden filmband. Het eenvoudigste gaat dit met het z.n. PHILIPS-MILLER-systeem, waarbij aan het contact een mesje is bevestigd, dat de bewegingen van het contact grift in een voortgaande filmstrook. Uit een documentatie-oogpunt is een dergelijke registratie natuurlijk van extra belang.

In de Philips-fabrieken te Eindhoven worden luidsprekers op de volgende wijze gekeurd. Men beschikt over een gramfoonplaat, waarop een glijtoon is vastgelegd. Dit is een toon, die geleidelijk van zeer lage toonhoogte glijdt naar de hoogste tonen of omgekeerd. Deze toon wordt opgenomen door een pick-up en overgedragen aan de luidspreker. De pick-up heeft dergelijke eigenschappen, dat de aan de luidspreker afgegeven spanning voor alle toonhoogten

dezelfde is. Het geluid, dat de luidspreker afgeeft, wordt gemeten met den boven beschreven zelfregistreerenden geluidmeter, die het resultaat inkrast op den filmband. Men kan nu op dezen filmband aflezen, of en hoe sterk de luidspreker maxima en minima vertoont in de weergave van de verschillende toonhoogten, anders gezegd, wat zijn relatieve gevoeligheid is door het geheele geluidsspectrum. Gramfoon en filmband worden door dezelfde motor gedreven, loopen dus „synchroon”, zoodat elke plaats van den filmband overeenkomt met een bepaalde toonhoogte. Daarom is het mogelijk, vooraf op den filmband een schaal voor de toonhoogte typografisch aan te brengen. In enkele seconden is zoo een luidspreker volkomen „doorgemeten” en is van het resultaat een document vervaardigd. Met kleine wijzigingen, respectievelijk completeeringen in de opstelling is op deze wijze de spectrale gevoeligheid te bepalen van een versterker, een pick-up, een gramfoonplaatmateriaal, een filmstrook voor sprekende film en welk acoustisch product men ook wil.

In de laboratoria van het SIEMENS,concern heeft men zich speciaal toegelegd op het snel ontleden van een complexgeluid in zijn verschillende samenstellende zuivere tonen. Het geluid wordt opgevangen door een microfoon, daarna electricch gefilterd, zoodat alleen de tonen van een bepaald klein toonhoogte-gebied overblijven en dit geluid wordt toegevoerd aan de voorversterker van den geluidmeter. Het filter is variabel, zoodat men in korten tijd het geheele geluidsspectrum kan aftasten. Door de beweging van het geluid-filter en die van de filmstrook weer synchroon te doen plaats hebben, verkrijgt men een snelle spectraal-analyse van complexe geluiden, waarbij elke component met zijn eigen sterkte is weergegeven. Ook hierbij is de toonhoogteschaal van tevoren typografisch op de film aan te brengen. Prof. E. LÜBCKE hoopt binnen korten tijd met een dergelijke apparatuur een analyse in een tiende seconde te kunnen uitvoeren, zoodat het mogelijk wordt de snelle veranderingen in de spreekgeluiden niet alleen wat betreft de sterkte, maar ook wat betreft de samenstelling te kunnen bestu-

deeren. Reeds nu hebben deze geluids-analysen belangrijk bijgedragen tot het indentificeeren van de oorzaak van het lawaai van machines en van spraakgebreken.

De technische uitvoering der geluidmeters is hiermee op een dergelijk hoog niveau gekomen, dat wel practisch reeds een limiet is bereikt. Daarom past het te meer, ons nog eens af te vragen, of de basis, waarop het geheel berust, wel stevig genoeg is. En dan zien wij, dat daar nog wel het een en ander over te zeggen valt.

Zoo zal het menschelijk hoofd het geluidveld anders beïnvloeden

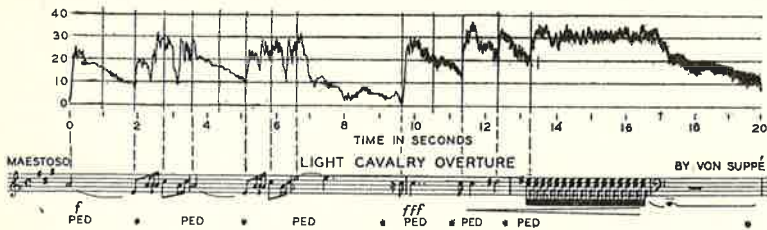


Fig. 5.

dan den geluidmeter. Eigenlijk zou men steeds twee geluidmeters moeten gebruiken om het binaurale hooren na te bootsen. De microfoons zouden aan weerszijden van een montuur moeten worden geplaatst, welk montuur de afmetingen en de hardheid van het menschelijk hoofd zou moeten bezitten.

Een ander punt is dit, dat ons oor toonmengsels zoodanig ingewikkeld verwerkt, dat het wel uitgesloten geacht moet worden, deze zelfde reacties in mechanische instrumenten te doen plaats hebben. Het oor verwerkt ver uit elkaar liggende tonen elk apart en telt daarna de psychische indrukken op. De instrumenten tellen daarentegen eerst de energieën op en logaritmiseeren dan deze som tot een luidheidsmaat. Het oor vertoont verder maskeeringseffecten, die onmogelijk mechanisch zijn na te bootsen.



Het gevolg is, dat het weinig zin heeft, bij het meten van toonmengsels alle verfijningen der boven beschreven objectieve geluidmeters toe te passen en dat men zich redden kan met veel eenvoudiger apparaten, die daarom in het geheel niet slechter behoeven te zijn, ja soms nog wel tegemoet kunnen komen aan de physiologische tekortkomingen van het universeele apparaat. Op deze gronden was het mij mogelijk om voor het speciale doel van het meten door de politie van het verkeerslawaaï, een zeer complex geluid, een eenvoudig apparaat, de Silenta-meter, te construeeren, die in zeer veel opzichten ten achter staat bij de groote apparaturen, maar die voor het speciale doel, waarvoor hij vervaardigd is, minstens even geschikt is (fig. 5).

