J. PIKET EN C. ZWIKKER

DEFINITIE EN METING VAN GELUIDSSTERKTE

Overdruk uit Nederlandsch Tijdschrift voor Natuurkunde,
II, 7, blz. 209—222
's-Gravenhage - Martinus Nijhoff - 1935

DEFINITIE EN METING VAN GELUIDSSTERKTE

door J. PIKET en C. ZWIKKER

§ 1. *Inleiding*.

Bij verschillende geluidsproblemen, waar we voor een beoordeling van geluid niet kunnen volstaan met het aangeven van de physische grootheden geluids-intensiteit I, of geluids-druk P (b.v. bij lawaaimeting) is het gebruik van een physiologische grootheid, de geluidssterkte, beter op zijn plaats.

Deze *geluidssterkte* definiëren we voorlopig als:
de grootheid, die de sterkte van de geluidsindruk weergeeft voor den gemiddelden mens.

We stellen als eisen:

1°. dat de getalwaarde ervan even groot is voor twee geluiden, waarvan het „publiek" oordeelt, dat ze even luid klinken;

2°. dat de getalwaarde 2, 3, 4 maal zo groot wordt, als het „publiek" oordeelt, dat het geluid 2, 3, 4 maal zo sterk is geworden.

Dat het definiëren van een dergelijke grootheid niet op losse schroeven staat, berust daarop, dat

1°. onder goede experimentele omstandigheden [1]) het mogelijk bleek voor een groot aantal proefpersonen met een gemiddelde afwijking van ± 50 % in de intensiteit aan te geven, of twee zuivere tonen, die niet te ver in frequentie uiteenliggen, even sterk klinken;

2°. eveneens onder juiste experimentele omstandigheden [2]) een groot aantal proefpersonen met een gemiddelde afwijking van ± 50—75 % in de intensiteit kon aangeven of een zuivere toon was gedaald tot op $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ van de oorspronkelijke waarde.

Voor zuivere tonen is dus met goede grond een dergelijke grootheid aan te geven, en het komt er maar op aan de band met de physische grootheden te leggen.

Pogingen daartoe stammen o.a. van R i e s z [3]), die tevens het mechanisme van de typische oorgevoeligheid probeert te ontleden door verband te zoeken met de nog juist te onderscheiden intensiteittrapjes voor een bepaalde toon; en verder van F l e t c h e r [4]), die, zij het met tabellen of grafieken, een volledige band legt tussen de geluidssterkte G en de physische intensiteit I, ook voor samengestelde geluiden.

Hij onderneemt verder een ordeningspoging voor de terminologie, door de nieuwe definities te gebruiken van de American Standards Association.

In dit artikel zijn vrije vertalingen (onofficiële !) daarvan gebruikt.

§ 2. *Intensiteitsniveau.*

Uitgaande van de scherp gedefinieerde *geluidsdruk* P of *geluidsintensiteit* I, kunnen we de *geluidssterkte* G vastleggen, als we grafisch of in formule de oorgevoeligheid kennen als functie van:
1°. de frequentie ν,
2°. de intensiteit I.

Door het grote intensiteitsgebied, dat ligt tussen gehoor-, en pijngrens (10^{-16} tot 10^{-4} watt/cm^2) is het gebruik van een nieuwe grootheid β ingeburgerd:

$$\beta = \log I/I_0 \text{ (bel)} \quad \text{of}$$

$$\beta = 10 \log I/I_0 \text{ (decibel)}.$$

I_0 is hierin een drempelintensiteit van 10^{-16} watt/cm^2, die voor de frequentie van 1000 perioden per seconde ongeveer met de gehoorgrens overeenkomt.

Dit *intensiteitsniveau* β stelt dus voor het aantal *db* (decibel), dat een toon ligt boven een vaste intensiteit van 10^{-16} watt/cm^2. Een toon met een intensiteit 10^{-9} watt/cm^2 heeft een intensiteitsniveau:

$$\beta = 10 \, . \log 10^{16-9} \, db = 70 \, db.$$

Opmerking: De in Duitsland gebruikte phon-schaal heeft dezelfde eenheden, maar het nulpunt ligt 3,5 *db* (phon) hoger.

§ 3. *Geluidsniveau.*

De *frequentie*-afhankelijkheid van de oorgevoeligheid in het gehele intensiteitsgebied is moeilijk anders dan grafisch weer te geven.

Een goede verzameling krommen van punten met gelijke geluidssterkte gaf K i n g s b u r y [1]). Hij liet een uitgebreid auditorium beoordelen, welke intensiteiten 2 zuivere tonen, die niet al te veel in frequentie verschilden, moesten hebben om even luid te klinken. Zo kon hij in een intensiteits-frequentie-diagram volledige „gehoorkrommen" opbouwen, die punten van gelijke geluidssterkte over het gehele frequentie-gebied verbonden.

Door Munson [8]) zijn ze later nagemeten; hij vond verschillen

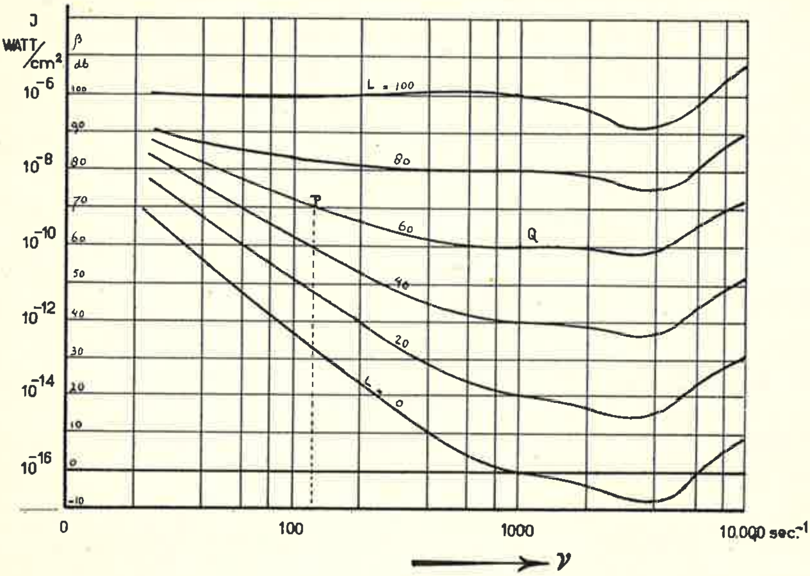

Fig. 1.

met Kingsbury rondom $\nu \approx 3000\ \mathrm{sec}^{-1}$. In fig. 1 zijn de gehoorkrommen van Munson getekend, die behoren bij een β van 0, 20, 40, enz. *db* voor een toon van 1000 sec^{-1}.

We komen nu een stap nader tot de geluidssterkte, als we een grootheid definiëren, die voor alle punten van zo'n kromme eenzelfde waarde heeft. Fletcher voert daartoe in het geluidsniveau:

> het *geluidsniveau* L van een zuivere toon is in grootte het intensiteitsniveau van een even luide toon van 1000 sec^{-1}.

Blijkbaar is dus het geluidsniveau L voor alle punten van een gehoorkromme dezelfde, en wel gelijk aan de β van het er op liggende punt van 1000 sec^{-1}.

Zo is de L van de toon, voorgesteld door het punt P in fig. 1 gelijk aan de β van de toon Q van 1000 sec^{-1}, d.i. 60 *db*.

In formule:

$$L = 10 \,.\, \log I'/I_0 \; db,$$

waarin I' voorstelt de intensiteit van de even luide toon van 1000 sec^{-1}.

Zowel het intensiteitsniveau als het geluidsniveau worden uitgedrukt in decibels. Het is echter duidelijk, dat, wanneer het intensiteitsniveau met een bepaald aantal decibels daalt, het geluidsniveau niet met ditzelfde aantal decibels zal dalen. Plaatsen we tussen geluidsbron en waarnemer een scherm, dat slechts één millioenste van de geluidsenergie van alle frequenties doorlaat, dan zal het intensiteitsniveau voor alle frequenties met 60 decibel zakken, bijv. van 80 op 20. Het geluidsniveau van de toon van 1000 sec^{-1} zakt inderdaad ook met 60 decibel, het geluidsniveau van de toon van 120 sec^{-1} zakt meer dan 60 decibel, zelfs meer dan 80 *db*, immers de intensiteit van deze toon komt onder de gehoordrempel. Voor alle toonhoogten, lager dan 1000 sec^{-1} is $|\triangle L| > |\triangle \beta|$. Versterkt men de muziek van een luidspreker, dan komen de lagere tonen meer naar voren, verzwakt men de muziek met behoud van de kwaliteit, dan verdwijnen de lage tonen het eerst onder de gehoorgrens.

§ 4. *Geluidssterkte volgens Riesz.*

We weten nu, dat onze gezochte geluidssterkte G alleen nog een $f(L)$ is, en het nagaan van de intensiteits-afhankelijkheid komt neer op het zoeken naar deze $f(L)$.

De oude wet van Weber-Fechner geeft aan: $G =$ const. L.

Uit metingen van Laird, Taylor en Wille[5]), die weer een verzameling proefpersonen gebruiken, om te beoordelen wanneer een zuivere toon is gedaald tot op $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ van de oorspronkelijke waarde, besluit Riesz[3]):

$$G = \text{const. } L^2.$$

De metingen van Laird, Taylor en Wille kloppen goed met min of meer langs theoretische weg verkregen resultaten van Riesz. Deze bepaalde namelijk voor alle punten van het intensiteits-frequentiediagram het aantal van elkaar onderscheidbare niveau's, gelegen tussen het punt in quaestie en de gehoorgrens. Bij deze metingen bepaalde hij het minimum van de intensiteitstoename, nodig om een toon inderdaad als sterker te horen dan de voorgaande. De hoogte van dit ,,trapje'' is een functie van I en ν. Door integratie is uit te maken, hoeveel trapjes, n, een bepaalde toon van de gehoorgrens is verwijderd. De Munsonse lijnen blijken niet lijnen van constante n te zijn: voor de lage tonen is n bij dezelfde geluidssterkte aanzienlijk kleiner dan voor de hoge tonen. (Voor punt Q van fig. 1 is $n = 80$, voor punt P is $n = 20$).

Wel is echter de verhouding $n_1 : n_2$ voor twee onder elkaar gelegen punten (gelijke toonhoogte) langs twee Munsonse lijnen constant. Mathematisch geformuleerd is dus:

$$L = f\left(\frac{n}{n_0}\right),$$

waarin n_0' voorstelt de waarde van n voor dezelfde toonhoogte op een eens voor al aangenomen exemplaar der Munsonse lijnen. De functie f is dezelfde voor alle frequenties; n is ongeveer evenredig met L^2.

Waar overgang naar een sterkere toon een vergroting van de luidheidsimpressie geeft, die uitsluitend blijkt af te hangen van de factor, waarmee het aantal ,,trapjes'' wordt vergroot, het individu bij de schatting der geluidssterkte onbewust dus de aantallen van deze trapjes vergelijkt, lag het voor Riesz voor de hand, eens te onderzoeken, of de geluidssterkte evenredig gesteld mocht worden aan dit aantal trapjes. De evenredigheidsfactor moet daarbij dan nog een functie zijn van de frequentie. Inderdaad geeft de uitwerking van deze idee een geluidssterkte, die vrijwel samenvalt met de waarnemingen van Laird, Taylor en Wille. Benaderd door formules is het resultaat weer te geven door:

$$G = a \, . \, \frac{n}{n_0} = b \, L^2.$$

(a en b zijn constanten, n_0 is een functie van ν).

Het falen van de wet van Weber-Fechner, volgens welke G evenredig met L moest zijn, kan eenigszins vergoelijkt worden. Het is namelijk gebleken, dat in het oor overdracht van de geluidsenergie plaats heeft door onderdelen, die niet volkomen lineair werken. Hierdoor horen we boventonen, ook bij geluid, dat in werkelijkheid volkomen monochromatisch is. Voor de toon van 1000 sec^{-1} treedt de eerste boventoon hoorbaar op vanaf $L = 50$ *db.*, de tweede vanaf $L = 70\ db$. enz. Bij lage tonen treden boventonen al hoorbaar op vanaf $L = 20\ db$. Het zenuwstelsel heeft dus een toonmengsel te verwerken, wat een complicatie betekent (zie verderop over meerstemmigheidseffect).

§ 5. *Geluidssterkte volgens Fletcher.*

Daarnaast geven Fletcher en Munson [4]) een op andere wijze gevonden afhankelijkheid tussen G en L tabellarisch weer.

Om tot een verband tussen L en G te komen doen Fletcher en Munson drie reeksen proeven.

Bij een eerste reeks vergelijken zij de indruk, die een proefpersoon krijgt, wanneer op beide oren eenzelfde geluid wordt toegevoerd met de indruk, die hij krijgt, wanneer ditzelfde geluid slechts door één oor wordt ontvangen. Fletcher en Munson onderstellen, dat de geluidssterkte in het eerste geval twee keer zo groot is als in het tweede geval. Door nu het geluid op het enkele oor te vergroten, totdat de indruk gelijk is aan de indruk van het binaurale horen, kan men meten, welke L_2 overeenkomt met een twee keer zo grote geluidssterkte als behoort bij L_1. Op deze wijze kan men telkens een factor 2 opschieten en een verband tussen G en L verkrijgen, waarbij willekeurig $G = 1$ wordt gesteld voor $L = 0$.

Bij een tweede reeks proeven vergelijken zij de luidheid van een mengsel van twee tonen met die van een enkele toon. De twee tonen zijn zo gekozen, dat ze zoveel in frequentie uiteenliggen, dat ze elkaar niet maskeren. Bovendien hebben ze dezelfde L. Weer wordt ondersteld, dat de geluidssterkte van de twee tonen samen twee keer zo groot is als de geluidssterkte van één der tonen. Ook hierin heeft men nu een middel om, uitgaande van een zekere L_1 de waarde L_2 te vinden, waarbij G verdubbeld is en op een constante multiplicator na, G als functie van L te krijgen.

Bij de derde reeks proeven wordt het procédé van de tweede reeks gegeneraliseerd. Men neemt 10 tonen, zover in frequentie uit elkaar gelegen, dat onderlinge maskering niet optreedt, en bepaalt de L van dit mengsel door vergelijking met een zuivere toon. De G van het mengsel wordt gelijkgesteld aan 10 keer de G van elk der samenstellende tonen.

De drie reeksen proeven geven aanleiding tot éénzelfde verband tussen L en G, dat echter sterk afwijkt van de functie van Riesz.

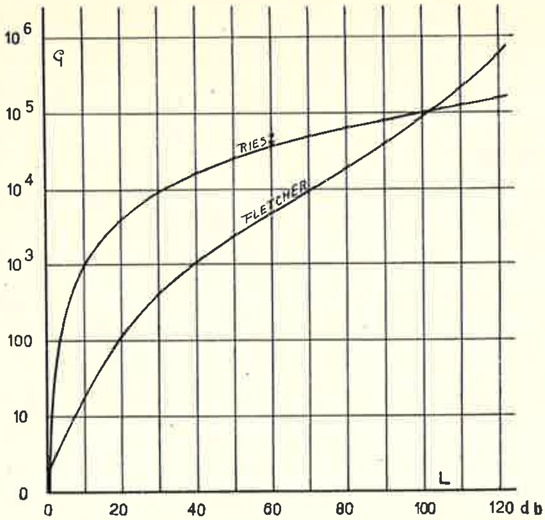

Fig. 2.

Een vergelijking van deze twee is in fig. 2 mogelijk. De constante in de formule van Riesz is daar zo gekozen, dat de waarden voor G bij $L = 100$ *db* overeenkomen.

§ 6. *Vergelijking der beide definities voor geluidssterkte.*

De afwijkingen tussen de beide krommen van fig. 2 behoeven ons niet te verwonderen. Immers Fletcher en Riesz zijn van geheel verschillende criteria uitgegaan. De theorie van Riesz wordt gesteund door de metingen van Laird, Taylor en Wille, die direct datgene gemeten hebben, wat wij als geluidssterkte willen beschouwen. Echter wordt de kromme van Fletcher en Munson ook gesteund door de resultaten van directe waarnemingen, namelijk die van Ham en Parkinson [6]) en ofschoon iets minder overtuigend, door die van Churcher en King [9]); deze waarnemingen verschillen dus aanmerkelijk van de soortgelijke waarnemingen van Laird c.s.

Door Geiger en Firestone [2]) worden redenen voor deze afwijkingen opgegeven. Het resultaat van deze proeven is namelijk zeer afhankelijk daarvan, of men een rustpoos inschakelt tussen de beide te vergelijken geluidssterkten of niet. Ham en Parkinson geven geen rustpoos, waardoor het door een β van 100 *db* verdoofde oor een reductie van 9 *db* al een grote terugval vindt (zij geven op, dat G de helft is geworden). Bij de proeven van Laird c.s., waarbij wel een rustpoos is toegestaan, heeft het oor zich hersteld en vindt het ook bij $\beta = 91$ *db* het geluid nog zeer sterk, men moet teruggaan tot $\beta = 70$ *db* om de geluidssterkte tot op de helft van die, behorende bij $\beta = 100$ *db* te horen zakken.

Het is verder zeer de vraag, of Fletcher en Munson mogen aannemen, dat de geluidssterkte verdubbelt bij het binaurale horen. Wanneer de zenuwen, naar de beide oren gaand, onafhankelijk van elkaar werken, zal wel het aantal zenuwimpulsen verdubbelen, het is echter de vraag, of de psychologische sterkte-indruk verdubbelt.

Bij Fletcher's proeven met een dubbele toon zorgt hij ervoor, dat geen maskering optreedt, dat wil zeggen, dat een optreden van een zeer zwakke toon van de tweede frequentie even snel wordt opgemerkt, of de eerste toon aanstaat of niet. Dit zegt echter nog niets over de vraag of de bijdrage tot G van de tweede toon afhankelijk is van het aanstaan van de eerste toon. Men zou toch met recht nog enige verdovende werking kunnen verwachten.

Ten slotte moge er nog op gewezen worden, dat Fletcher's kromme in fig. 2 meer gelijkt op een rechte dan op een logarithmische kromme, terwijl de praktijk van het dagelijkse leven toch al leert, dat onze zintuigen min of meer logarithmisch waarnemen à la Weber-Fechner.

Ofschoon Fletcher het volste recht heeft, een functie G in te voeren, zoals hij dat gedaan heeft, menen stellers van dit artikel, dat zijn functie G voor de praktijk van minder betekenis is dan de functie van Riesz.

§ 7. *Overzicht van de definities.*

Voor een goed overzicht volgen hieronder de tot dusver gebruikte physische en physiologische geluidsgrootheden met hun definities, voor een zuivere toon:

Geluidsdruk (P): eff. waarde van de overdruk op een bepaalde plaats.
Eenheid: dyne/cm^2 (bar.).

Geluidsintensiteit (I): (in een gegeven richting): de energie, die per sec. door een cm^2 loodrecht op die richting wordt doorgelaten.
Eenheid: erg/cm^2 sec ($= 10^{-7}$ watt/cm^2).
Voor een vlakke golf geldt: $I = P/\varrho\, c$ (ϱ = dichtheid van lucht; c = geluidssnelheid).

Intensiteitsniveau (β): het aantal *db*, dat de toon ligt boven een drempelintensiteit van 10^{-16} watt/cm^2.
Eenheid: decibel (phon).
In formule:
$\beta = 10 \,.\, \log I/I_0 = 20 \,.\, \log P/P_0$ (*db*).

Geluidsniveau (L): het intensiteitsniveau van een even luide toon van 1000 sec^{-1}. Eenheid: decibel.

Geluidssterkte (G): grootte van de indruk op het „publiek".
Eenheid: ?
Voor $G = f(L)$ zie Riesz of Fletcher.

§ 8. *Geluidssterkte van samengestelde tonen.*

Op samengestelde tonen kan het bovenstaande niet zonder meer worden toegepast.

Denken we ons dit geluid uit componenten opgebouwd (Fourier-analyse) dan kunnen we definiëren:

De *geluidsdruk* P, die bepaald is door:

$$P^2 = \Sigma P_k^2.$$

De *intensiteit* $I = \Sigma I_k.$

L (geluidsniveau) is te definiëren als het intensiteitsniveau van de even luide zuivere toon van 1000 sec.$^{-1}$ G is dezelfde functie van L als bij de zuivere tonen. Het interesseert ons nu in hoge mate, te weten, hoe L, respectievelijk G, voor een toonmengsel te berekenen is uit de overeenkomstige waarden voor de componenten van het mengsel.

Met behulp van een geluidsanalysator kan van de componenten, waaruit het mengsel is opgebouwd, elk der geluidsniveaux L_k gemeten worden, daaruit volgt op de normale wijze G_k. De totale geluidssterkte is, wegens het optreden van een maskeringseffect, niet

$$G = \Sigma G_k,$$

maar minder:

$$G = \Sigma b_k \,.\, G_k.$$

De maskeringsfactor b_k (kleiner dan 1) hangt af van de intensiteit en de frequentie van elk der componenten.

Als er n samenklinkende componenten zijn, is elke b_k theoretisch een functie van 2 n veranderlijken (n geluidsniveau's en n frequenties). Het zou buitengewoon ingewikkeld worden, b_k als functie van al deze grootheden te bepalen. We moeten gaan benaderen. Daartoe neemt F l e t c h e r aan, dat de maskering voor verreweg het grootste gedeelte veroorzaakt wordt door die toon uit het mengsel, die met zijn frequentie het dichtste bij de frequentie ν_k ligt en bovendien aan de lage kant. Het is namelijk gebleken, dat een aanstaande toon veel sterker maskerend werkt op hogere frequenties dan op lagere.

Als tweede vereenvoudiging kan worden ingevoerd de aanname, dat b_k niet afhankelijk is van ν_k, maar alleen van het frequentieverschil tussen de k-de toon en zijn buurman aan de zijde van de lagere toonhoogten, een aanname, die door allerlei proeven van F l e t c h e r wel gerechtvaardigd schijnt.

De coëfficient b_k wordt nu voor tonen van gelijke L als volgt door F l e t c h e r bepaald. Hij neemt een mengsel van 10 tonen, alle van dezelfde L, liggende op constante frequentie-intervallen. De laagste toon wordt niet gemaskeerd, de andere negen wel en wel alle evenveel, dus:

$$G = (1 + 9\, b_k)\, G_k.$$

Men meet de totale L en L_k, zoekt hierbij op in fig. 2 de overeenkomstige G en G_k en rekent b uit.

Voorbeeld: 10 tonen, alle een $L_k = 50\ db$; frequentie-interval 230; L van mengsel blijkt te zijn: 75 db.
Hierbij vinden we volgens de kromme van R i e s z, in bepaalde eenheden,

$$G_k = 25;\ G = 56, \text{ dus}$$

$$56 = (1 + 9\, b)\, 25,$$

waaruit $b = 0{,}14$, een lage waarde, die wijst op aanzienlijke maskering.

Uit het waarnemingsmateriaal van F l e t c h e r is b te berekenen als functie van $(\nu_k - \nu_m)$, L_k en $(L_k - L_m)$. Hij neemt toe met $\nu_k - \nu_m$, heeft een minimum bij $L_k = 60\ db$, en neemt toe met $L_k - L_m$. Ondanks alle benaderingen en vereenvoudigingen bleek het berekende geluidsniveau van willekeurige toonmengsels achteraf goed te kloppen met de gemeten L.

§ 9. *Geluidsmetingen.*

Tenslotte iets over de wijze waarop elk dezer 5 grootheden gemeten kan worden, waarbij we ons om te beginnen weer beperken tot zuivere tonen.

De *geluidsdruk* P en de *intensiteit* I kunnen gemeten worden met een apparatuur, bestaande uit microfoon, potentiometer, versterker en wisselspanningsmeter, schematisch aangegeven in fig. 3.

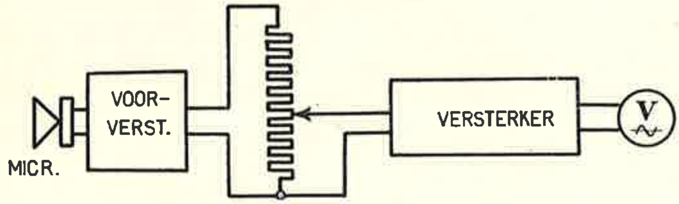

Fig. 3.

Elk dezer onderdelen behoort een frequentie-onafhankelijke karakteristiek te hebben. De stand van de potentiometer en de aflezing van de meter zijn directe maten voor geluidsdruk of -intensiteit.

Het *intensiteitsniveau* meten we, als we potentiometer en meter logarithmisch ijken (dus in *db*).

Geven we bovendien aan de versterker een stel frequentiekarakteristieken die de omgekeerden zijn van de gehoorkrommen van M u n s o n, dan zijn we in staat, van zuivere tonen althans, direct het *geluidsniveau* L te meten.

Het bepalen van de *geluidssterkte* G geschiedt daarna het veiligst aan de hand van de tabellen of formules, die ons daarvoor ten dienste staan.

De twee thans bestaande methoden, de geluidssterkte van een *willekeurig* mengsel te bepalen volgen uit het voorgaande:

1°. De analyseer-methode van F l e t c h e r bestaat daarin, dat met een analysator het geluidsniveau van elk der componenten gemeten wordt.

Daaruit volgt voor elk een geluidssterkte G_k; de totale geluidssterkte is nu:

$$G = \Sigma\, b_k \,.\, G_k,$$

waarin voor elke component met de tabellen van F l e t c h e r een maskeringsfactor b_k ingevuld kan worden.

2°. Meting ineens:

Meet men met een apparatuur, bestemd om het geluidsniveau L van een zuivere toon te meten, het (schijnbare) geluidsniveau van een mengsel, dan maakt men een fout, doordat men geen rekening houdt met de onderlinge maskering.

Immers met een dergelijk toestel meten we:

$$L_s = 10 \,.\, \log \frac{\Sigma I_k'}{I_0},$$

waarin I_k' voor de k-de component voorstelt de intensiteit van die toon van 1000 sec^{-1}, die op dezelfde gehoorkromme ligt.

Dit is het schijnbare geluidsniveau. Het ware geluidsniveau wordt gegeven door de formule:

$$L_w = f^{-1} \left\{ \Sigma b_k f(L_k) \right\}.$$

Nemen we voor de G-L betrekking de wet van Riesz dan wordt de fout in grootte gegeven door:

$$G_w - G_s = \text{const} \left(\Sigma b_k \log^2 \frac{I_k'}{I_0} - \log^2 \frac{\Sigma I_k'}{I_0} \right).$$

Dat dit verschil klein is, moge blijken door het uit te rekenen voor het voorbeeld van § 8.

We hebben twee tonen met $L_1 = L_2 = 50$ *db*, dus $I'_1 = I'_2 = 10^{-11}$ watt/cm². ($I_0 = 10^{-16}$ watt/cm²).

$$\log^2 \frac{\Sigma I_k'}{I_0} = \log^2 (2 \,.\, 10^5) = 28{,}1.$$

$$b_1 = 1,\ b_2 = 0{,}14, \text{ waaruit:}$$

$$\Sigma b_k \log^2 \frac{I_k}{I_0} = 1{,}14 \,.\, 5^2 = 28{,}5.$$

De fout in G bedraagt 0,4 op een totaal van 28. Teruggerekend op L vinden we, dat: $L_w = 53{,}3$ *db*, $L_s = 53{,}0$ *db*.

De meeste in de handel zijnde objectieve lawaaimeters zijn toestellen, zoals hier beschreven, die in één enkele aflezing het geluidsniveau aangeven. Ofschoon ze fundamenteel onjuist zijn, voldoen ze in de praktijk goed. Het verplaatsen van het Σ-teken naar voren en de invoering der b_k zijn twee effecten, die elkaar vaak practisch compenseren (meerstemmigheids-effect tegenover maskeringseffect). Er zijn echter wel gevallen te bedenken, waarbij de fout niet te verwaarlozen is. Wanneer we namelijk twee tonen van 50 *db* kiezen, die verder in frequentie uit elkaar liggen, dan in het voorbeeld van hierboven, wordt b_2 groter. G_w wordt groter, terwijl G_s niet verandert, de fout wordt groter.

Behalve in het geval, dat de tonen van het mengsel zeer dicht bij elkaar liggen, geeft dit type toestellen voor toonmengsels een te lage waarde aan ten opzichte van zuivere tonen. Dit is een gebrek van de geluidssterktemeter. Beschouwt men het toestel echter als lawaaimeter, d.w.z. neemt men ook nog de hinderlijkheid van het geluid in aanmerking, dan wordt het gebrek heel veel kleiner. Een ongewenst aanwezige zuivere toon is namelijk hinderlijker en irriterender dan een toonmengsel van hetzelfde geluidsniveau. Men veroordele daarom de objectieve meters niet als onbruikbaar voor de praktijk.

§ 10. *Knallen.*

Met voorbijgaan van alle tussenliggende trappen weet Steudel [7]) [7a]) voor het geval van een regelmatige opeenvolging van knallen, een direct verband aan te geven tussen de geluidsdruk en het geluidsniveau.

In zijn impulsformule:

$$L = 20 \,.\, \log \frac{1}{P_o} \cdot \frac{1}{\tau} \left\{ \int_{t_0}^{t_0 + \tau} (p - p_o)\, dt \right\}^{max.}$$

stelt de integraal voor een integraal over een karakteristieke tijd van 0,0003 sec., waarbij dan de aanduiding „max." betekent, dat de tijd t_o zo gekozen moet worden, dat deze integraal maximaal wordt; p_o is de druk van de lucht op het ogenblik t_o; P_o is een constante ter waarde van $1{,}5 \,.\, 10^{-3}$ bar.

Voor periodieke geluiden met een periode kleiner dan 1 sec. wordt bij het bedrag van L nog iets opgeteld. Deze extra bijdrage nadert tot 10 *db* bij verhoging der frequentie, welke limietwaarde reeds bereikt is bij een frequentie van 50 sec^{-1}.

Een bezwaar voor de toepassing is echter de nog te geringe nauwkeurigheid. Steudel beperkt het gebruik dan ook tussen 50 en 100 *db*. Toepassing op zuivere tonen levert „gehoorkrommen" voor punten van gelijke L, die vrij behoorlijk de gehoorkrommen van Munson volgen.

Het moet mogelijk zijn op de basis van de formule van Steudel een toestel te construeren, dat het geluidsniveau objectief meet. Dit toestel zou ook met vrucht te gebruiken zijn voor de meting van continue geluiden, ook al zijn ze van gecompliceerde aard. Intussen is aan deze lastige technische opdracht nog niet voldaan. Het toestel, dat Steudel zelf hiervoor heeft geconstrueerd [7]) is niet exact en slechts van beperkte toepasbaarheid.

LITTERATUUR

1. Kingsbury. Direct comparison of the Loudness of pure tones, Phys. Review 29, 588, 1927.
2. P. H. Geiger & F. A. Firestone. The estimation of fractional reduction of Loudness, Journ. Acoust. Soc. Am. 5, 25, 1933.
3. R. R. Riesz. Relationship between Loudness and minimum perceptible increment of intensity. J.A.S.A. 4, 211, 1933.
4. H. Fletcher & W. A. Munson. Loudness, its Definition, Measurement and Calculation. J.A.S.A. 5, 82, 1933. Bell syst. Techn. Journ. 12, 377, 1933.
5. D. A. Laird, E. Taylor and H. H. Wille. The apparent reduction of Loudness. J.A.S.A. 3, 393, 1932.
6. L. B. Ham & J. S. Parkinson. Loudness and Intensity Relations. J.A.S.A. 3 511, 1932.
7. U. Steudel. Empfindung und Messung der Lautstärke, Zs. f. Hochfreq. techn. und Elektro Akustik 41, 116, 1933.

7*a*. H. Barkhausen e.a. Phys. Z.25, 537, 1924; Z. f. Techn. Physik 8, 215, 1927; Hochfrequenztechnik u. Elektrokustiek 41, 115, 1933.

8. W. A. Munson. J.A.S.A. 4, 7, 1932.
9. B. G. Churcher & A. J. King. Nature 131, 760, 1933.