

## DE BASIS VAN DE AKOESTIEK

Akoestiek is de wetenschap van het geluid. Als geluid worden mechanische trillingen van de materie beschouwd in zoverre ze waarneembaar zijn door het menselijk oor. Als materie kunnen gassen (lucht), vloeistoffen (water) en vaste stoffen (beengleiding) dienen. Lucht is voor de van oren voorziene mens het belangrijkste medium.

### Geluid

Om hoorbaar te worden, moeten muziek en spraak voldoen aan de natuurkundige wetmatigheden van het geluid. Geluid ontstaat, wanneer de materie in een bepaald frequentiegebied trilt. Voor de voortplanting van die trillingen is op zijn beurt trillende materie nodig. In de materieloze ruimte heerst absolute stilte; de sferenmuziek van de oude Pythagoreërs bestaat niet.

### Geluid alleen in een elastisch medium

Een aangeslagen stemvork trilt; omdat hij zo is geconstrueerd exact 440 maal per seconde, overeenkomstig de internationaal afgesproken stemtoon a. Deze zuivere toon, die mathematisch als sinusfunctie wordt beschreven en die daarom ook sinustoon heet en een frequentie van  $f = 440\text{Hz}$  heeft, straalt de stemvork in de omgevende lucht af. Deze trilling breidt zich uit in de vorm van kogelronde golffronten, zo ongeveer als een reeks losse, gelijkmatig groeiende zeepbellen rond die stemvork.

Om de stemvork in trilling te brengen, moet hij worden aangestoten met een bepaalde kracht, of beter gezegd energie. Een deel daarvan wordt door de stemvork afgestraald. De energie is gelijkmatig verdeeld over het oppervlak van het kogelvormige golffront, dat met de verdere uitbreiding recht evenredig met het kwadraat van de straal  $r$  groeit.

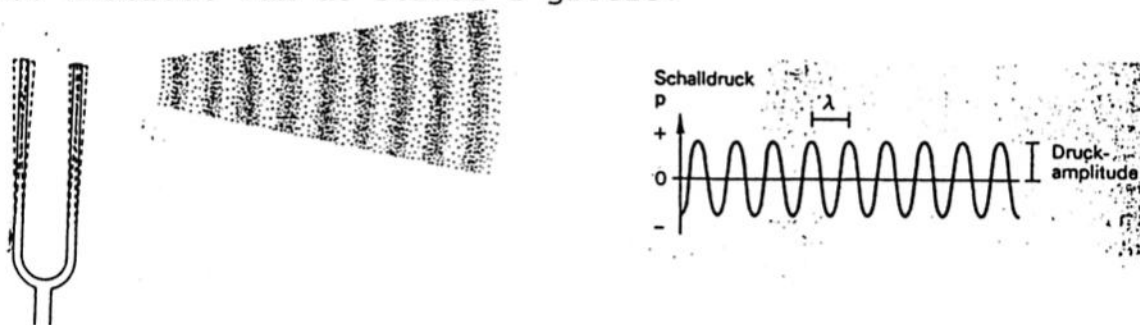


Fig. 1. Een eenvoudige "geluidszender". De trillende benen van een stemvork veroorzaken in de omringende lucht drukfluctuaties (verdunningen en verdichtingen van de moleculen) die zich in de gedaante van kogelvormige golven in de ruimte uitbreiden.

De zich uitbreidende energie, die per tijdseenheid door een

nader gedefinieerd vlak passeert - de geluidsintensiteit - neemt ten gevolge van deze energieverdeling over een steeds groter kogeloppervlak recht evenredig met  $1/r$  kwadraat af.

Conclusie: alle overigens nog voorkomende effecten zoals absorptie, reflectie, buiging en breking van het geluid buiten beschouwing latend, neemt de door een geluidsbron afgestraalde intensiteit (of simpel luidsterkte) omgekeerd evenredig af met de afstand tot de geluidsbron, totdat hij tot nul is gereduceerd en stilte heerst.

Wanneer de afstand tot de geluidsbron - dat wil zeggen de straal van de kogelvormige golf - maar groot genoeg is, dan heeft het oppervlak, waardoor de per tijdseenheid gemeten geluidsenergie passeert een verwaarloosbaar kleine kromming. We kunnen van een vlak spreken en dus ook inplaats van een kogelvormige golf van een vlakke golf, wat het verder rekenen vergemakkelijkt.

### Het biljardenspel van moleculen

De stemvork is door lucht omgeven. Nauwkeuriger geformuleerd worden voortdurend ontelbare zuurstof-, kooldioxyde-, stikstof- en andere moleculen door de stemvork aangestoten, waarna ze zo ongeveer als biljart- of tafeltennisballen reageren. De stootimpuls wordt doorgegeven; zo plant het geluid zich automatisch voort. Dit met een microfoon meetbare effect van een kinetisch proces komt neer op een reeks luchtdrukfluctuaties  $\Delta p$ . Deze zijn als het ware gemoduleerd op de vrij constante atmosferische luchtdruk, die de microfoon niet waarneemt, omdat deze aan beide kanten van het membraan gelijk is.

Een momentopname van de zich uitbreidende vlakke geluidsgolf geeft het volgende beeld te zien:

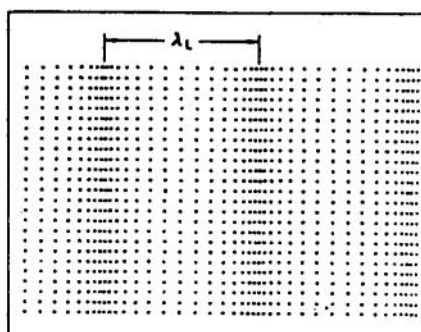


Fig. 2. Een zich in de lucht uitbreidende longitudinale golf. De afstand tussen twee verdichtingen, de plaatsen met maximale druk dus, noemen we golflengte,  $\lambda$ .

Op afstanden  $\lambda$  in de beschouwde uitbreidingsrichting treden verdichtingen van de lucht moleculen op en telkens in het midden daartussen verdunningen. Op de plaatsen waar verdichting optreedt, is de druk groter dan de atmosferische en op die waar van verdunning sprake is kleiner. Het verschil bedraagt  $\Delta p$ .

De afstand tussen twee opeenvolgende verdichtingen of verdunningen komt overeen met de golflengte  $\lambda$  van de geluidstrilling.

#### **Longitudinale golven lopen in de trillingsrichting**

Omdat de richting van de golfuitbreiding overeenstemt met de richting van de trilling, spreken we van een longitudinale golf. In gasen en vloeistoffen als medium komt uitsluitend deze golfsoort voor. De voortplantingssnelheid van het geluid in de ons normaal omringende atmosfeer bedraagt bij 20°C 343,8m/s. Gemakshalve wordt meestal met 340m/s gerekend.

De duur van een trilling, die zichzelf continu in dezelfde vorm herhaalt, en daarom een periodieke trilling genaamd, heet periode T. Gedurende de tijd T breidt de trilling zich over een afstand  $\lambda$  uit. Afstand gedeeld door tijd geeft de snelheid weer. Derhalve geldt:

$$\frac{\lambda}{T} = c$$

En omdat de periode niets anders is dan de omgekeerde waarde van de frequentie (dus  $T = 1/f$ ), volgt hieruit een baswisregel uit de akoestiek:

$$\lambda \cdot f = c$$

Derhalve bedraagt de golflengte van de 440Hz toon

$$\frac{340 \text{ m/s}}{440 \text{ Hz}} = 0,77 \text{ m}$$

#### **Geluid in niet-comprimeerbare media**

Geluid wordt niet alleen via gasen en vloeistoffen voortgeplant, maar ook via vaste stoffen. De voortplantingssnelheid van geluid is een materiaalconstante. In water van 15°C bedraagt deze ongeveer 1500m/s en in staal zelfs 5800m/s. In vaste stoffen treden behalve longitudinale golven ook transversale-, en buiggolven op. Bij transversale golven verloopt de trillingsrichting loodrecht op de uitbreidingsrichting.

- Een mooi beeld van een transversale golf is de golf, die over een gespannen rubber koord loopt, wanneer dat aan één uiteinde met een slag in trilling wordt gebracht. Transversale golven komen alleen voor in materiaal waarin stuwspanningen voorkomen.

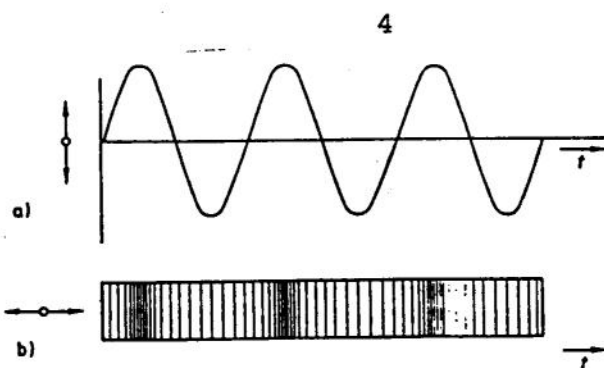


Fig. 2. a) Een transversale golf en b) een longitudinale golf

Nuttige conclusie: elke geluidsgolf is een ruimtelijke longitudinale golf.

Het zijn onder andere deze verschijnselen - plus resonanties in de mond/neus/keelholte - die maken, dat we tengevolge van beengleiding onze eigen stem heel anders "ervaren" als onze omgeving.

Elke trilling wordt door twee grootheden gekenmerkt, namelijk door zijn frequentie en zijn amplitude. Dit geldt ook voor geluidstrillingen, alleen noemen we daar de amplitude geluidsdruk.

#### Frequentie

De geluidsfrequentie geeft aan, hoeveel luchtverdichtingen en verdunningen per seconde op elkaar volgen. Veelvuldige drukwisselingen nemen we als hoge frequenties, als hoge tonen waar. De frequentie bepaalt dus de door het oor waargenomen toonhoogte. Het gezonde, jonge menselijke oor kan geluidstrillingen tussen ongeveer 16Hz en 20kHz als tonen herkennen. In de HiFi wereld gaat men gemakshalve van een bereik van 20-20.000Hz uit.

#### Het menselijk hoorbereik

Lang niet alle materiële trillingen kunnen als geluid worden opgevat. Alleen de door de mens hoorbare trillingen gelden als geluid en dus als tonen, klank of ruis. De waarneembaarheid van geluid hangt in de eerste plaats van de frequentie af. Hoorbaar zijn dus globaal frequenties tussen de 20 en 20.000Hz. Infrageluid onder de 20Hz ervaren we letterlijk als trillen en beven, ultrageluid boven de 20kHz (en wel tot 10MHz!) kunnen veel dieren nog wel horen: vandaar de Galton politiefluit voor honden, het voor ons deels onhoorbare gezang van een nachtegaal en de echo-plaatsbepaling door vleermuizen. Ultrageluid wordt wel gebruikt bij materiaalonderzoek, in de medische wetenschap en om kunstmatig materiaal te laten verouderen (whiskey).

Er zijn theorieën, die volhouden, dat de allerlaagste en -hoogste frequenties toch door bepaalde lichaamsdelen worden waargenomen en die dus ook invloed hebben op het waargenomen

klankbeeld.

### Klank en de subjectieve hoorbelevenis

De hoorbaarheid van tonen hangt van hun luidsterkte en frequentie af. De luidsterkte, waarbij een van nul geleidelijk luider wordende toon door een groep testpersonen net waarneembaar wordt, noemen we de gehoordrempel. Voor elke frequentie geldt een eigen gehoordrempel, zoals de onderste curve in onderstaande afbeelding met curven van gelijke luidsterkte (isofonen) laat zien.

Uit deze afbeelding blijkt, dat het menselijke gehoororgaan een allesbehalve lineaire geluidsontvanger is. Zijn grootste gevoeligheid bereikt het oor tussen de 2 en 5kHz. Het gevoeligst is het voor 4kHz tonen. Vergelijk de ooggevoeligheid met zijn maximum in het geel/groene gebied.

Voor hogere en vooral voor lagere frequenties onder de 250Hz wordt de gehoordrempel snel hoger. Een lage bastoon van 30Hz moet het oor met een ruim 50dB hoger geluidsdrukkniveau bereiken dan een 4kHz toon om net waarneembaar te zijn.

Deze "kromme" gevoeligheidslijn van het menselijk oor is het resultaat van een miljoenen jaren vergende evolutie en een duidelijke overlevingsstrijd. De mens, tot voor kort nog jager en gejaagde, kon beter overleven naarmate hij sneller op verraderlijk geritsel van bladeren en andere door roofdieren en vijanden veroorzaakte geluiden reageerde.

Anderzijds zorgde moeder natuur gelukkig ook, dat onze oren niet al te overgevoelig zijn, want dan zouden we het voortdurende ruisen van de moleculaire warmtebeweging, de Brownse beweging, hinderlijk waarnemen.

Ook de oplopende gehoordrempel naar de lage frequenties toe heeft een natuurlijke achtergrond. Als we niet daarmee gezegend waren, zouden we loopgeluiden en componenten van de windruis waarnemen.



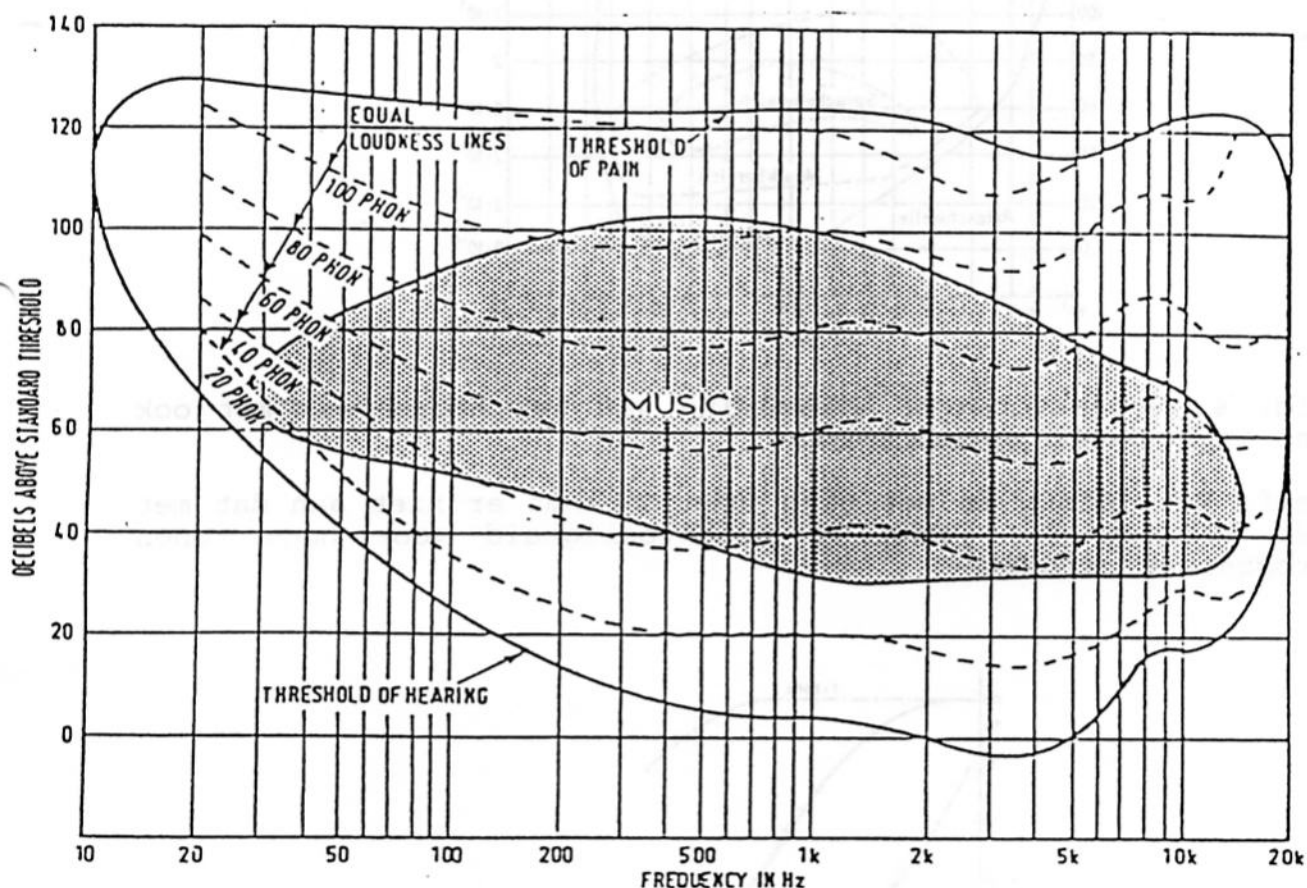


Fig. 3. Frequentie/amplitude diagram van het menselijk hoorbereik van 10-20.000Hz en 0-140dB. De subjectieve luidheid (in foon) gerelateerd aan de werkelijke geluidsdrukniveau's (in dB). De curven van gelijke geluidsdruk tussen de gehoordrempel en de pijngrens zijn ontleend aan Robinson & Dadson. Het "muziekdomain" geldt voor onversterkte akoestische muziekinstrumenten.

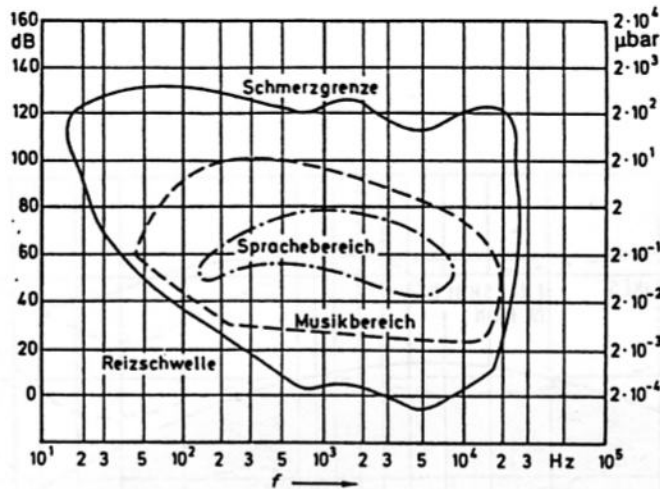


Fig. 4. Vereenvoudigde afbeelding van het hoorbereik met ook het ingetekende spraakdomein.

Zelfs wei zuinig is met zijn oren ontkomt er niet aan dat met het klimmen der jaren de oorgevoeligheid voor hoge tonen progressief afneemt.

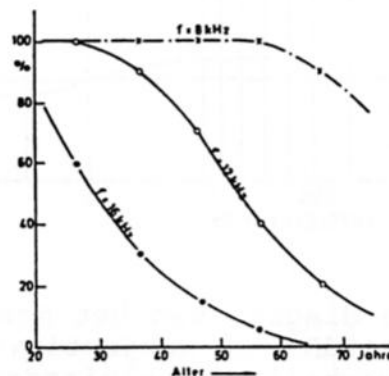


Fig. 5. Afname van de oorgevoeligheid voor hoge frequenties bij toenemende leeftijd.

### Geluidsdruk

Een geluidsgolf plant zich in een elastisch medium door periodieke verdichting en verdunning voort. Een verdichting van de materie komt overeen met een drukverhogen, een verdunning met drukverlaging ten opzichte van de normale druk in rusttoestand.

Bij de gangbare voortplanting van het geluid wordt de normale

luchtdruk in het ritme van de geluidsgolven periodiek veranderd. Deze wisselende geluidsdruk heet kortweg geluidsdruk en wordt met  $p$  aangeduid. De geluidsdruk  $p$  is dus een plaats- en tijdsafhankelijke wisselende druk.

Wanneer een geluidsgolf een hoge geluidsdruk opwekt, ervaren we dat als grote luidsterkte, d.w.z.: de geluidsdruk bepaalt de luidsterkte.

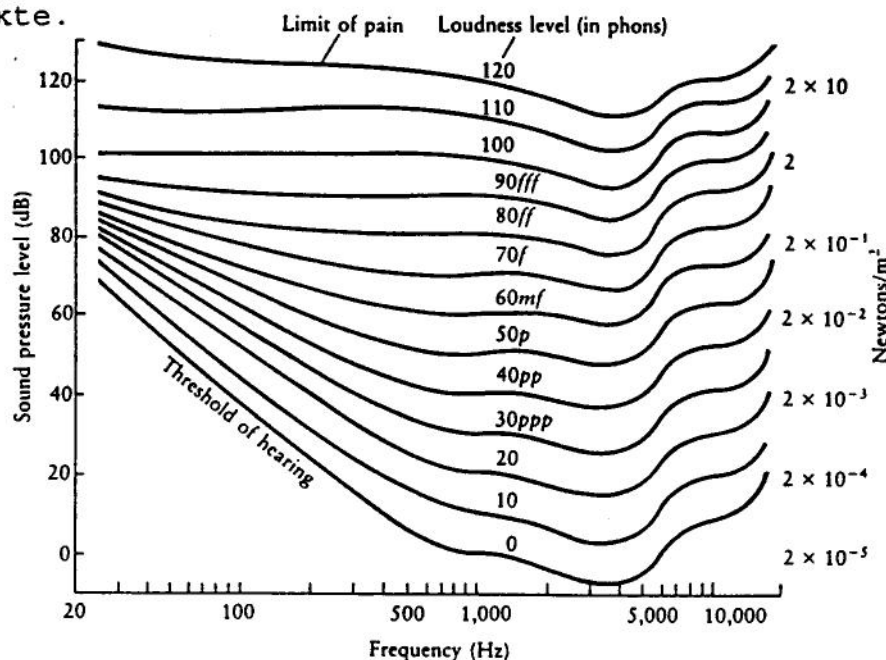


Fig. 6. Nogmaals dezelfde curven, echter nu gerelateerd aan de geluidsdruk (rechter y-as) en de muzikale sterktegraden van ppp tot fff.

Natuurkundig ligt vast, dat de druk aangeeft, hoe groot de kracht is, die loodrecht op een bepaald vlak werkt.

Als formule: 
$$\text{druk} = \frac{\text{kracht}}{\text{oppervlak}} \quad \text{of} \quad p = \frac{F}{A}$$

De eenheid van druk is Pascal (Pa), waarbij  $1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2}$

Vroeger werd ook de microbar nog gebruikt, waarbij  $1 \text{ Pa} = 10 \text{ microbar}$  en  $1 \text{ microbar} = 0,1 \text{ Pa}$ .

In de praktijk komt dit erop neer, dat wanneer bijvoorbeeld iemand normaal op 1m afstand van een microfoon spreekt, de



geluidsdruk op het microfoonmembraan 0,1Pa bedraagt. Nadert de stem tot op 10cm, dan loopt de geluidsdruk op tot 1Pa. Een gewoon gesprek levert ca. 0,2-0,3Pa op; een fortissimo bespeelde pauk komt tot ca. 100Pa.

### Dynamiek

Een ander belangrijk begrip is de dynamiek. Daaronder verstaat men het verschil in geluidsdruk tussen de zachtste en de luidste weergave. De dynamiekomvang van het menselijk oor bedraagt - zoals uit het verloop van de gehoordrempel en de pijngrens blijkt - 120dB, of in verhouding geplaatst 1:1.000.000. Het verschil tussen een nog net waarneembaar vallend blad en een startende straaljager. Elders is een tabel met dynamiekwaarden opgenomen.

### Voortplantingssnelheid van geluid

Geluid wordt voortgeplant in gassen, vloeistoffen en vaste stoffen. De voortplantingssnelheid hangt van de dichtheid van het medium af. Een paar voorbeelden:

| stof        | voortplantingssnelheid c in m/s |
|-------------|---------------------------------|
| glas        | 5.500                           |
| staal       | 5.000                           |
| metselwerk  | 3.500                           |
| hout        | 2.500                           |
| water       | 1.480                           |
| kurk        | 500                             |
| lucht       | 344                             |
| week rubber | 70                              |

Hoe geringer de dichtheid en hoe elastischer het medium is, des te langzamer kunnen namelijk de deeltjes (moleculen) het geluid als impuls doorgeven. Vandaar dus ook, dat het geluid niet in vacuum wordt voortgeplant.

In de akoestiek is natuurlijk vooral de voortplantingssnelheid van geluid in lucht van belang. Deze is o.m. afhankelijk van de temperatuur, het kooldioxydegehalte en de luchtvochtigheid.

| Temperatuur | snelheid c in m/s |
|-------------|-------------------|
| -30 °       | 302,9             |
| 0           | 331,8             |
| 10          | 338               |
| 20          | 344               |
| 30          | 349,6             |
| 100         | 390,0             |

### Golflengte

Wanneer een trilling zich door een medium als golf uitbreidt, treden op bepaalde punten op telkens gelijke afstanden dezelfde trillingstoestanden op, bijvoorbeeld de grootste dichtheid der lucht moleculen. Deze afstand is golflengte,  $\lambda$ , ge-

genaamd. Tussen de voortplantingssnelheid van lucht  $c$ , de golflengte  $\lambda$  en de frequentie  $f$  van een toon bestaat de volgende relatie:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

#### Golflengtes in het hoorbare gebied

| frequentie $f$ in Hz | golflengte $\lambda$ in m |
|----------------------|---------------------------|
| 16                   | 21,5                      |
| 100                  | 3,4                       |
| 800                  | 0,43                      |
| 1000                 | 0,34                      |
| 5000                 | 0,069                     |
| 10.000               | 0,034                     |
| 20.000               | 0,0172                    |

Deze lengteverschillen van hoorbare frequenties tussen 21,5m en 1,72cm zijn aanzienlijk en spelen onder andere een rol bij het construeren van luidsprekers. Wanneer een luidspreker het een conusdiameter van 35cm een 100Hz toon moet weergeven, dan is hij haast te klein ten opzichte van een golflengte van 3,4m. Wanneer hij echter een 10kHz moet reproduceren, is hij te groot ten opzichte van de golflengte van 3,4cm.

Zo ontstaan heel verschillende afstralvoorwaarden. Vandaar bijvoorbeeld, dat de taak van een dynamische luidspreker wordt verdeeld over twee of meer luidsprekerchassis, die elk een andere diameter hebben, maar meestal ook een verschillende vorm (konisch, halfbol), een andere ophanging en die uit verschillend materiaal bestaan.

#### Geluidsoorten

Elk voortgebracht geluid veroorzaakt bij de mens overeenkomstig zijn fysieke en psychische aanleg verschillende geluids-impressies. Terwille van geen grotere onafhankelijkheid van deze individuele impressies, zijn de diverse geluidsoorten nader ingedeeld en gedefinieerd. Volgens DIN 1320 en DIN 5488 moeten we onderscheiden tussen:

|                    |                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| toon:              | sinusvormige trilling binnen het hoorbereik                                                                                                                                                       |
| toonmengsel:       | een uit tonen van verschillende frequenties samengesteld geluid                                                                                                                                   |
| klank:             | hoorbaar geluid, bestaande uit grond- en boventonen                                                                                                                                               |
| harmonische klank: | hoorbaar geluid, dat bestaat uit een reeks deeltönen, waarvan de frequentie uit veelvoud van de laagste frequentie bestaat. Deze boventonen hebben eenvoudige relaties 2:1; 3:2; 4:3; 5:4 enz. Ze |

klankmengsel: kenmerken de muzikale intervallen: octaaf, kwint, kwart, terts. enz.  
 hoorbaar geluid, dat uit harmonische klanken van willekeurige grondtonen is samengesteld  
 ruis: klanksignaal, dat is samengesteld uit zeer vele niet-harmonische afzonderlijke tonen  
 knal: geluidsstoot met grote geluidsintensiteit  
 lawaai: elke vorm van hoorbaar geluid, die de gewenste stilte verstoort.

De zuivere, door de stemvork geproduceerde sinustoon (zie fig. 7) kan alleen met een toongenerator of een synthesizer langs elektronische weg worden voortgebracht.

De door de stemvork afgegeven druktrilling wordt gegeven door de formule

$$\Delta p = p_0 \sin 2\pi f \cdot t$$

waarin  $p_0$  de maximale drukamplitude en  $t$  de tijd uitdrukt. Maar dezelfde toon, gespeeld op een losse a-snaar van de viool ziet er heel anders, veel gecompliceerder uit. Grondtoon, golflengte en periodiciteit zijn onveranderd, maar de trilling zelf lijkt niet meer op het gelijkmatige beeld van een sinustoon (fig. 8).

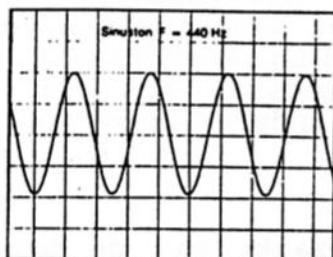
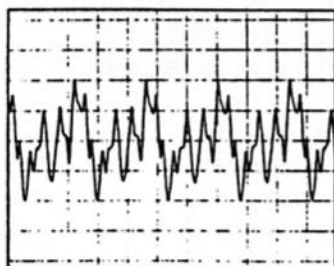


Fig. 8. Curve van een losse a-snaar (440Hz) van de viool.

Dat komt, omdat de viool meer dan een toon, een klank uitstraalt. De Franse wiskundige en ingenieur J.B. Fourier (1768-1830) toonde aan, dat elke klank, zolang deze periodisch is, in een oneindig aantal zuivere sinustonen kan worden ontleed.



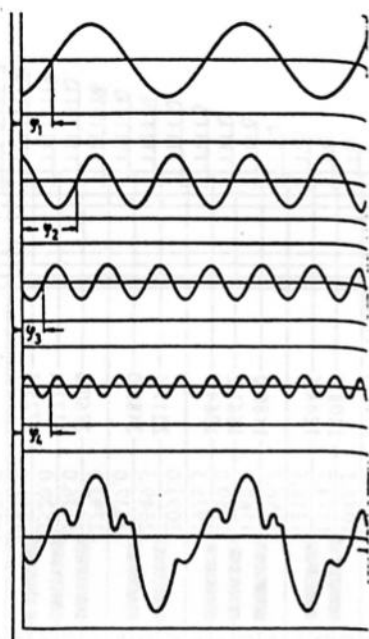


Fig. 9. Fourier analyse van een uit vier sinustonen bestaande klank. Bovenaan de grondtoon met de frequentie  $f$ , daaronder de boventonen met de frequenties  $2f$ ,  $3f$  en  $4f$ . De tijdverschuivingen  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  zijn faseverschuivingen t.o.v. het tijdstip 0.

De laagste in de klank vertegenwoordigde toon, in het algemeen de grondtoon, is verantwoordelijk voor de toonhoogte. Hij draagt de benaming deeltoon van de eerste orde. De frequenties van de hogere orde deeltonen, ook boventonen of harmonischen genaamd, zijn hele veelvouden van de grondtoonfrequentie. Hun amplitudes  $p$  worden kleiner naarmate ze van hogere orde zijn. Totdat ze tenslotte geheel verdwijnen.

Daarbij is het echter niet zo, dat de frequenties van de boventonen exact de reeks natuurlijke getallen doorloopt, dus bij een grondtoon met frequentie  $f$  simpelweg  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ , .... $nf$ .

In heel wat klanken domineren de even veelvouden van de grondtoon (hobo), in andere de oneven (klarinet in het lage register). Bij alle instrumenten treden in bepaalde frequentiegebieden formanten op (fig. 12b), opeenhopingen, clusters van boventonen. Het spectrum van de boventonen en de formanten bepalen goeddeels het klankkarakter en de klankkleur van de verschillende akoestische muziekinstrumenten en van de menselijke stem.

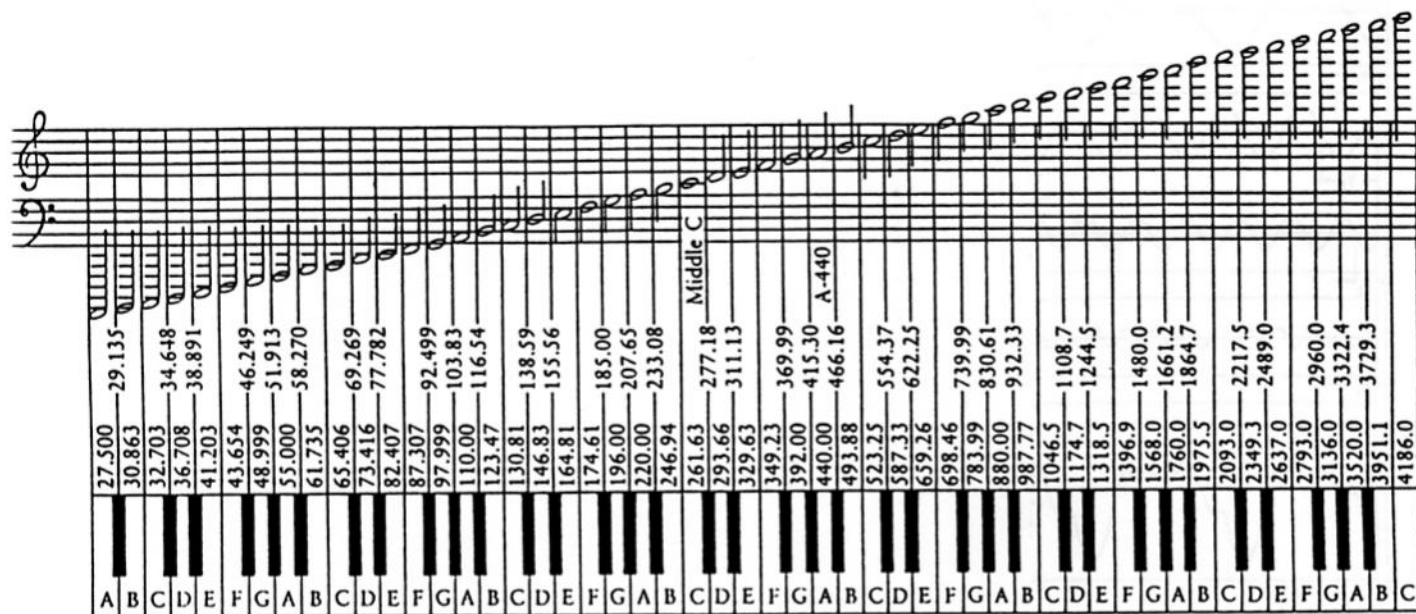


Fig. 10a. De relatie tussen toonhoogte en frequentie geïllustreerd aan de hand van de pianotoetsen.

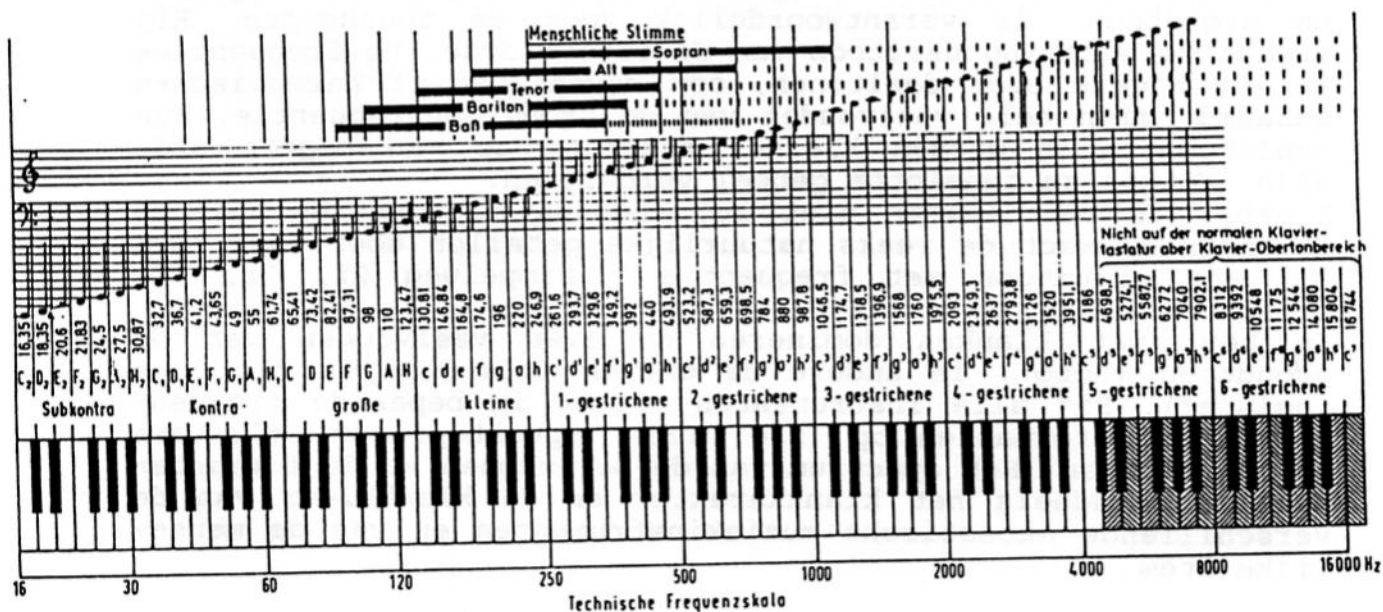


Fig. 10b. Dezelfde voorstelling, nu met ingetekende octaven en het bereik van de menselijke stemsoorten.



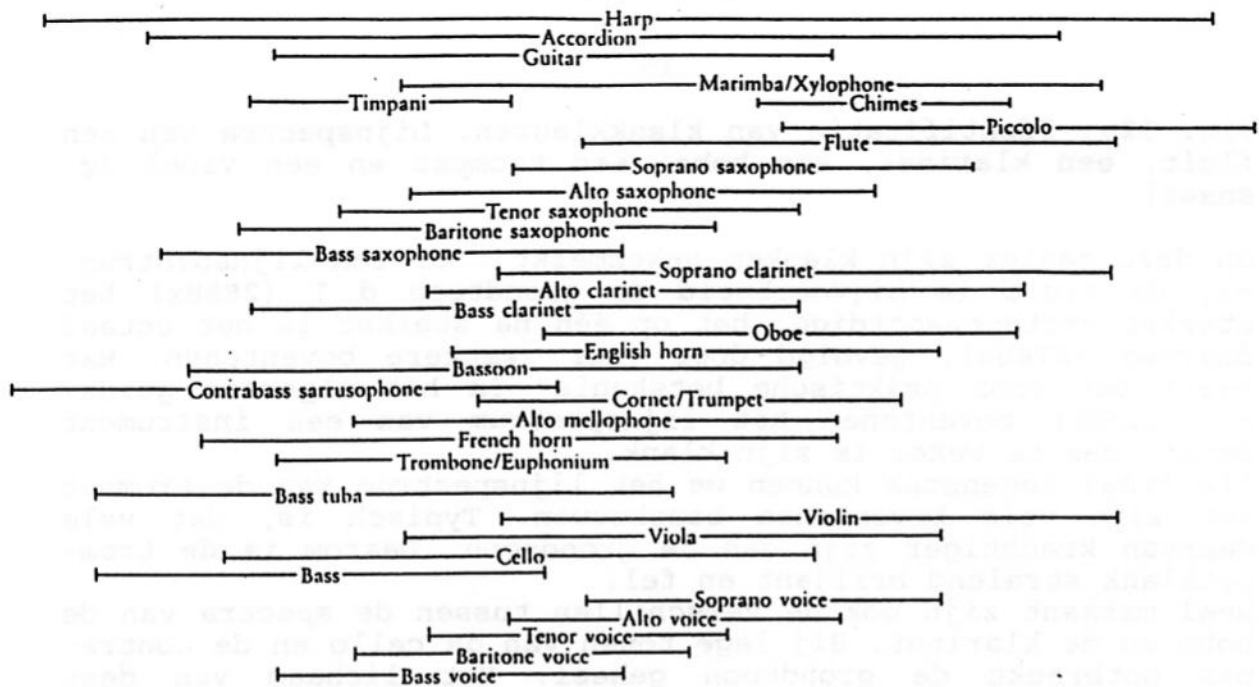


Fig. 11. Relatieve toonomvang van muziekinstrumenten en stemmen.

Bij ruis mankeert de belangrijke eigenschap van de periodiciteit; een nadere frequentie analyse van ruis levert daarom ook niet het duidelijke beeld van de fraaie reeks boventonen van muzikale klanken op.

**Spectra: identiteitsbewijzen van de instrumentale klankkleuren**  
Het resultaat van een frequentie analyse is makkelijk in een grafische voorstelling te vangen en wel in een coördinatensysteem met de frequentie in Hz op de x-as en de luidsterkte van de boventonen op de y-as. Elke boventoon verschijnt dan als een lijn.

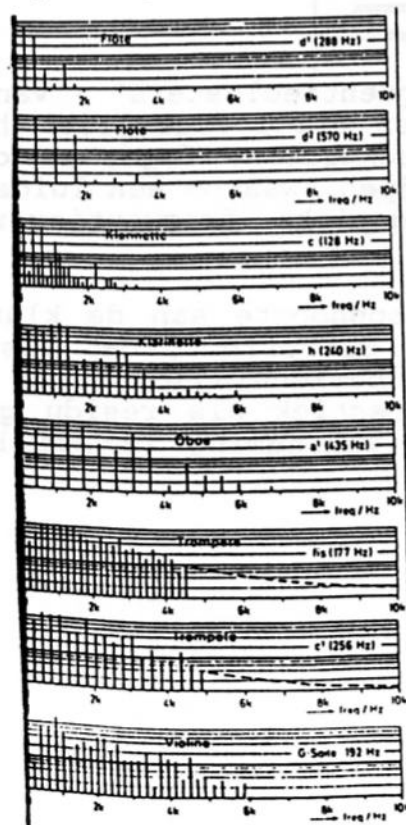




Fig. 12a. Identificatie van klankkleuren. Lijnspectra van een fluit, een klarinet, een hobo, een trompet en een viool (g-snaar).

Op deze manier zijn klanken gekenmerkt door een lijnspectrum. Bij de fluit is bijvoorbeeld de grondtoon d 1 (288Hz) het sterkst vertegenwoordigd; het op één na sterkst is het octaaf daarvan (576Hz), gevolgd door vier zwakkere boventonen. Wat heeft dat voor praktische betekenis? In het algemeen geldt: hoe minder boventonen het lijnspectrum van een instrument bevat, des te weker is zijn klank.

Als fraai tegenstuk kunnen we het lijnspectrum van de trompet met zijn vele boventonen beschouwen. Typisch is, dat vele daarvan krachtiger zijn dan de grondtoon. Daarom is de trompetklank stralend briljant en fel.

Heel markant zijn ook de verschillen tussen de spectra van de hobo en de klarinet. Bij lage tonen van de cello en de contrabas ontbreekt de grondtoon geheel. Het lichaam van deze instrumenten is in verhouding tot de golflengte van die lage tonen te klein, zodat het die lagen tonen met zijn eigenresonantie niet kan versterken.

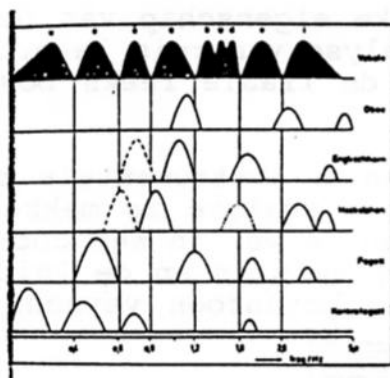


Fig. 12b. De formanten - "frequentieclusters" - van achtereenvolgens een aantal klinkers en enige dubbelriet houtblaasinstrumenten: hobo, althobo, heckelfoon, fagot en contrafagot. Deze kennis helpt om te begrijpen, waarom een luidspreker, die een tussen 1,2 en 1,8kHz gepiekt frequentieverloop heeft nasaal klinkt.

Niettemin kent het oor een toonhoogte aan de klank toe, die overeenkomt met de grondtoon. Dit effect, dat als een vanuit de luisterervaring ontwikkeld herkenningsfeit van hogere orde geldt, wordt in de psycho-akoestiek als residu genoemd. Een optische parallel van residu waarneming is het beeld op de volgende pagina:

# RESIDUAL TONHOË

Fig. 13. Zoals het oog de ontbrekende lijnen in het schriftbeeld automatisch aanvult, zo corrigeert het oor ontbrekende grondtonen.

Ook ruis kan natuurlijk in een spectrum worden weergegeven. De frequenties liggen dermate dicht bij elkaar, dat geen afzonderlijke lijnen meer zijn te onderscheiden, maar dat een continue spectraalcurve, een omhullende ontstaat. De spectraalanalyse van de kleine trom levert bijvoorbeeld een ruisspectrum op. Men kan er dus ook geen bepaalde toonhoogte aan toekennen.

In het spectrum van een lage pianoklank komen behalve duidelijke lijnen ook twee ruiscontinua op: kennelijk een mengsel van lijn- en ruisspectrum.

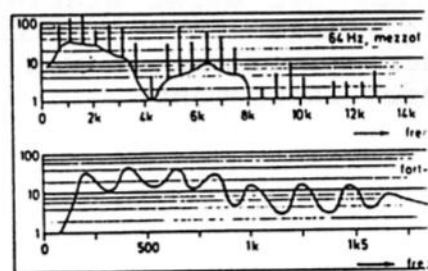


Fig. 14. Gemengd spectrum van van een 64Hz toon van een concertvleugel (boven) en ruisspectrum van een kleine trom (onder).

### Het verraderlijke ontstaan van klanken

Bij alle akoestische muziekinstrumenten wekt blazen, tokkelen, strijken, of slaan de klank op. Er is dus een of andere vorm van een mechanische stimulans nodig om de materie in trilling te brengen.

Vanaf het tijdstip van de eerste aanraking of aanzet tot de volledige ontwikkeling van een quasi stationaire klank verloopt een van instrument tot instrument verschillend korte tijdspanne, waarin de klank instabiel is. De boventonen ontstaan niet meteen alle tegelijk, maar in een bepaalde volgorde. Elke inzet heeft tijd nodig om zich tot de bedoelde klank te ontwikkelen.

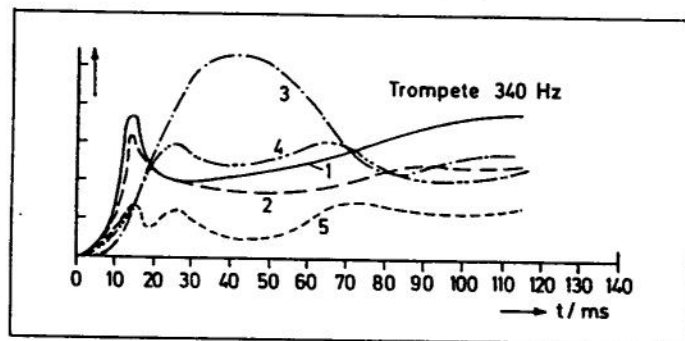


Fig. 15. Totstandkoming van grond- en boventonen bij een trompet, geblazen met een grondtoon van 340Hz.

Bij de trompet ontwikkelt de 3e harmonische zich binnen de 40ms, de grondtoon bereikt pas na 115ms een stabiele toestand. Bij de viool wordt het octaaf het eerst stabiel, terwijl de grondtoon ruim 90ms nodig heeft voor stabilisatie. Deze verschillen vormen een ander wezenskenmerk van de klankkleur en het klankkarakter van ieder instrument.

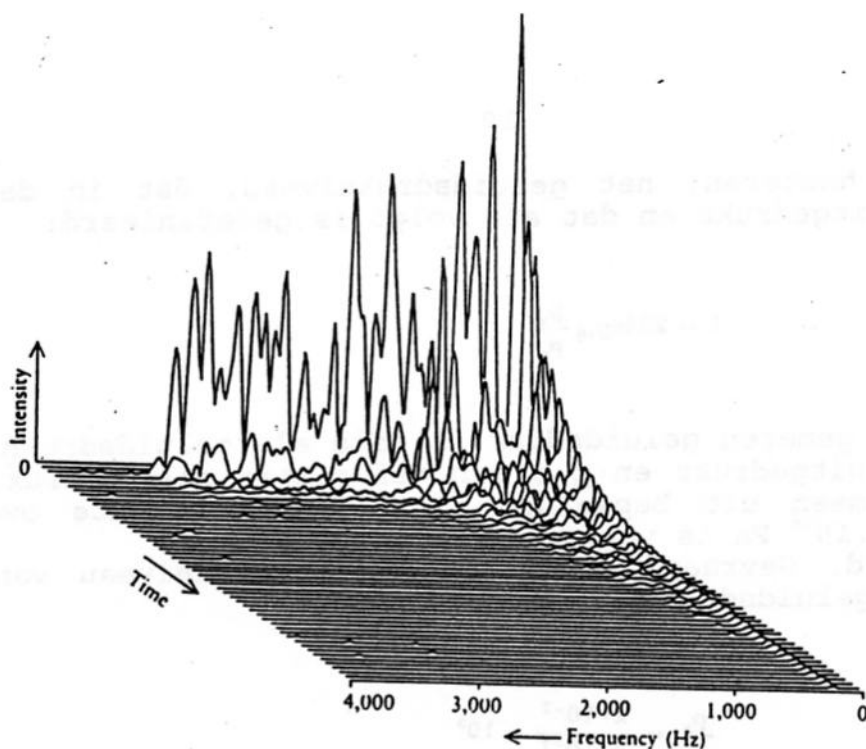


Fig. 16. Driedimensionaal klankspectrum van een tom-tom nadat deze is aangeslagen.

Een verdere complicatie is, dat veel muziekinstrumenten - met name strijkinstrumenten - eigenresonanties (kastresonanties) veroorzaken.

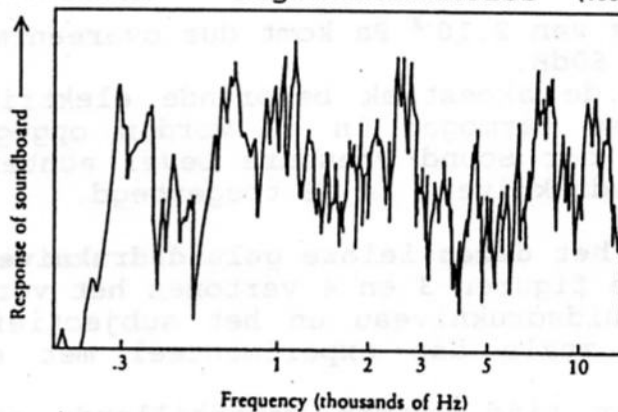


Fig. 17. De vioolkast resonanceert bij sommige frequenties heviger dan bij andere. Dit is het spectrum van een geluidsgolf, die ontstaat bij het in trilling brengen van de brug van een Guarneri met een sinusvormige trilling van constante amplitude en toenemende frequentie.

Op magneetband geregistreeerde continue tonen van een fluit en een hobo zijn ontdaan van hun inzet maar moeilijk van elkaar te onderscheiden.

#### Geluidsdruk, geluidsdrukniveau

De eenheid van geluidsdruk is net als bij andere druksoorten de Newton per vierkante meter ( $\text{N/m}^2$ ) of Pascal (Pa). In de akoestiek is het echter doelmatiger om een andere, dimensielo-

ze maat te hanteren: het geluidsdrukkniveau, dat in decibel (dB) wordt uitgedrukt en dat als volgt is gedefinieerd:

$$L = 20 \log_{10} \frac{p_x}{p_0}$$

waarin  $p_x$  de gemeten geluidsdruk is, die als geluidsdrukkniveau moet worden uitgedrukt en  $p_0$  een referentie geluidsdruk, die in het algemeen uit bepaalde, later verduidelijkte overwegingen bij  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa is vastgelegd.

Een voorbeeld. Gevraagd wordt het geluidsdrukkniveau van een toon met de geluidsdruk  $p_x = 2 \cdot 10^{-2}$  Pa.

$$\frac{p_x}{p_0} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-5}} = 10^3$$

$$L = 20 \log_{10} 10^3 = 60 \text{ dB}$$

Een geluidsdruk van  $2 \cdot 10^{-2}$  Pa komt dus overeen met een geluidsdrukkniveau van 60dB.

Omdat ook tot de akoestiek behorende elektrische grootheden als spanning en vermogen in dB worden opgegeven, wordt de afkorting SPL voor Sound Pressure Level achter de aanduiding van het geluidsdrukkniveau in dB toegevoegd.

#### **Luidsterkte en het dimensieloze geluidsdrukkniveau**

De curven in de figuren 3 en 4 vertonen het verband tussen het effectieve geluidsdrukkniveau en het subjectief ervaren luidsterkteniveau, zoals dat experimenteel met testpersonen is bepaald.

In de loop der tijd kwamen verschillende onderzoekers als Fletcher en Munson als eersten (1933), Robinson en Dadson (1956), Molino (1973), Zwicker (1982) en Betke (1991) als één der voorlopig laatsten (1973) tot ongeveer dezelfde uitkomsten.

Steeds diende een 1kHz toon met variabel geluidsdrukkniveau diende als referentie. De testpersonen moesten telkens aangeven bij welk geluidsdrukkniveau ze een toon met een andere frequentie even luid ondergingen.

Beide tonen bezitten dan per definitie hetzelfde geluidsniveau in phon (foon). Het resultaat van dit systematisch uitgevoerde onderzoek levert dus de curven van gelijke luidsterkte of isofonen.

De onderste curve is de gehoordrempel. Tussen 1 en 2kHz ligt de geluidsdruk van de gehoordrempel bij  $2 \times 10^{-5}$  Pa (of  $2 \cdot 10^{-4}$

microbar), het geluidsdrukkniveau bedraagt daar per definitie 0, want

$$20 \log_{10} 1 = 0.$$

Tussen  $2 \cdot 10^6$  en  $2 \cdot 10^7$  Pa treffen we boven in de grafiek de pijngrens aan: bij 1kHz en 20 Pa of 200 microbar. Geluidsdrukken van deze grootte (startende straaljager, ketelmakerij, maar niet zelden ook discotheken, popconcerten en house parties) veroorzaken oorpijn en op den duur bechadiging van het gehoororgaan. Daarop komen we later apart terug.

Als ontvanger heeft het gehoor een enorm geluidsdrukgebied in een verhouding van 1 staat tot 10 miljoen ter beschikking. De logaritmische omrekening en de vermelding in dB maken dat overzichtelijker en hanteerbaarder. Zo bezien variëren de voor ons belangrijke geluidsdrukkniveau's tussen de 0 en 140dB SPL.

Om een indruk te krijgen van diverse luidsterktes, kunnen de volgende voorbeelden dienen.

#### Luidsterkte van verschillende geluidsbronnen

| Geluidsoort<br>bij 1kHz in          | luidsterkte<br>foon | geluidsdruk<br>Pa   |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| gehoordrempel                       | 0                   | $2 \cdot 10^{-5}$   |
| zacht gefluister op 3m afstand      | 10                  | $6,4 \cdot 10^{-5}$ |
| bladgeritsel in zacht windje        | 20                  | $2 \cdot 10^{-4}$   |
| gefluister op 1m afstand            | 30                  | $6,4 \cdot 10^{-4}$ |
| rustig gesprek, zachte radio        | 40                  | $2 \cdot 10^{-3}$   |
| gemiddeld gesprek                   | 50                  | $6,4 \cdot 10^{-3}$ |
| kantoorlawaaï, luide muziekgw.      | 60                  | $2 \cdot 10^{-2}$   |
| verkeerslawaaï, erg luide muziekgw. | 70                  | $6,4 \cdot 10^{-2}$ |
| geschreeuw, luide fabriekshal       | 80                  | 0,2                 |
| persluchthamer                      | 90                  | 0,64                |
| motor zonder knalpijp               | 100                 | 2                   |
| startend vliegtuig op 5m afstand    | 110                 | 6,4                 |
| kanonschot                          | 120                 | 20                  |
| pijngrens                           | 130                 | 64                  |

#### Luidsterkte en luidheid als maat van gevoeligheid

Een verhoging van het geluidsdrukkniveau met 10dB c.q. een verhoging van het luidheidsniveau met 10 foon bij 1kHz wordt ervaren als een verdubbeling van de luidsterkte. Twee geluidsbronnen, die hetzelfde geluidsdrukkniveau presenteren (zeg 60dB) klinken echter niet tweemaal zo luid als eentje alleen. Het totale geluidsdrukkniveau bedraagt in dit geval:

$$\begin{aligned}
 &20 \log (2 \cdot 10^3) \\
 &= 60 \text{ dB} + 20 \log 2 \\
 &= 60 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 66 \text{ dB}
 \end{aligned}$$



Het geluidsdrukkniveau neemt dus slechts 6dB en niet 10dB toe, wat met een verdubbeling zou overeenkomen. De geluidsintensiteit, die recht evenredig is met het kwadraat van de geluidsdruk, neemt bij verdubbeling van de luidsterkte zelfs slechts 3dB toe. Deze intensiteit is recht evenredig met de geluidsenergie en de klankenergie.

Op grond van deze feiten ontstond de behoefte aan een schaal, die de verdubbeling van de getalswaarde ook laat zien in een verdubbeling van de luidsterkte ervaring, die dus overeenkomt met de luidsterkte. Daarvoor zorgt de ook empirisch vastgestelde, hieronder afgebeelde sone schaal.

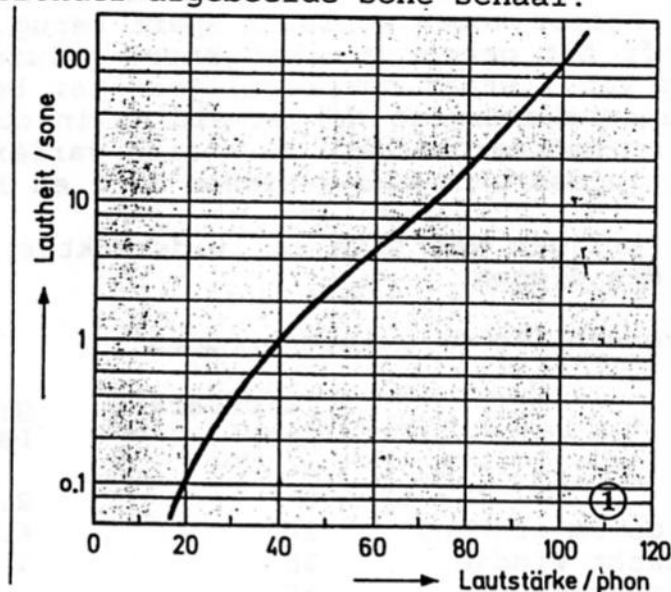


Fig. 18. Luidheid in sone en luidsterkte in foon. Bij luidsterktes boven de 40 foon betekent elke verdubbeling met 10 foon een verdubbeling van de subjectieve luidsterkte (luidheid).

Onderzoek toonde aan, dat het doelmatig is om een luidsterkte van 40 foon te koppelen aan 1 sone. Een dubbel zo sterk ervaren geluid komt dan overeen met een luidheid van 2 sone en een vier maal zo luid ervaren dito met 4 sone.

Ook deze relatie tussen luidsterkte en luidheid verloopt weer niet lineair. Bij geringe luidsterktes neemt de luidheidsindruk sneller toe dan bij grotere. Boven de 40 foon komt een toename van de luidsterkte met 10 foon overeen met een verdubbeling van de luidsterkte.

**Hoeveel violen spelen dubbel zo luid als een enkele?**

Eén viool produceert een luidsterkte van 60 foon, overeenkomstig 4 sone. Om de luidheid tot 8 sone te verdubbelen moet de luidsterkte van 60 tot 70 foon worden verhoogd. Daarvoor zijn tien alle even luid spelende violen nodig, want

$$60 \text{ Phon} + (10 \log_{10} 10) \text{ Phon}$$

$$= 60 \text{ Phon} + 10 \text{ Phon}$$

$$= 70 \text{ Phon.}$$

100 Violon zouden zo 16 sone en 1000 violon helemaal 32 sone genereren. Hieruit wordt één van de redenen duidelijk, waarom een vol bezet symfonie orkest bestaat uit 16 eerste en 14 tweede violon, 12 altviolon, 10 celli en 8 contrabassen.

1200 cent vormen een octaaf, het oor neemt al 5 cent waar. Belangrijk onder andere voor de werking van de volumeregeling op een versterker is het antwoord op de vraag, hoe groot de niveauverandering van de luidsterkte tenminste moet zijn, wil het menselijk oor dat waarnemen. Ook hier weer leerden proeven met testpersonen, dat geluidsdrukveranderingen van 12,2% of intensiteitsveranderingen van 25,9%, overeenkomend met 1dB net waarneembaar zijn. Dit geldt in elk geval voor de middenfrequenties en medium niveau's.

De schaalverdeling van geluidsdrukniveau's en luidsterkte ziet er in de praktijk ongeveer zo uit, dat de eenheid van 1dB of 1 foon net overeenkomt met de waarneembaarheidsdrempel van luidsterkte verschillen. Daarom ook hebben gecalibreerde volumeregelingen van versterkers doorgaans een logartithmische schaal.

Een andere gehoordrempel geldt voor de frequentieverschillen: hoe ver moeten twee tonen uit elkaar liggen opdat het oor ze als twee gescheiden tonen waarneemt? Een musicus noemt de frequentieverhouding tussen twee tonen een interval. Als de verhouding tussen de frequenties van twee tonen 2 : 1 bedraagt, is sprake van een interval van 1 octaaf. De onderverdeling van een octaaf in 1200 gelijke stapjes levert de cent op, de internationale eenheid van interval.

Het interval  $x$  in cent tussen twee tonen met frequenties  $f_2$  en  $f_1$  kan worden berekend met de formule:

$$2^{\frac{x}{1200}} = \frac{f_2}{f_1}$$

$$x = \frac{1200}{\log 2} \cdot \log \frac{f_2}{f_1}$$

dus:

Voor het octaaf volgt overeenkomstig deze formule met de waarde 2:1 voor  $f_2$  en  $f_1$  de met de definitie overeenkomstige waarde van 1200 cent, voor de zuivere kwint  $f_2 : f_1 = 3:2 = 702$  cent en voor de getempereerde halve toon  $f_2 : f_1 = 53:50$  ofwel 100 cent.

Een praktisch voorbeeld: een met 2 toeren per minuut of 6% te snel draaiende platenspeler transponeert de op een LP vastgelegde muziek met 100,9 cent ofwel een halve toon naar boven. Terug naar de vraag hoeveel cent een interval van verschillende frequenties moet bedragen om waarneembaar te zijn. In het bereik van 1050 tot 4200Hz - overeenkomstig een toonhoogtebereik van  $c^3$  tot  $c^5$  - is de oorgevoeligheid voor intervallen met 5 cent het grootst. Dit is slechts één vijfhonderste van een getempereerde halve toon!

Naar de lagere en hogere tonen toe neemt de gevoeligheid naar verwachting af.

Bij de C (65,4Hz) en de  $c^7$  (16.744Hz) bedraagt hij nog slechts 15,6 cent. Bij C moeten beide frequenties een onderlinge afstand van tenminste 0,6Hz hebben en bij  $c^7$  niet minder dan 150Hz.

#### **Gevoeligheid voor toonhoogtefluctuaties**

De bij HiFi weergave belangrijke gevoeligheid voor toonhoogtefluctuaties (zweving) hangt nauw met de intervalwaarneming samen. Alleen spelen hier nog twee andere invloeden een rol: de frequentie, waarmee de zweving wordt opgewekt (modulatiefrequentie) en de luidsterkte. Dat ook de frequentie van de fluctuerende toon (draagfrequentie) een rol speelt, zal duidelijk zijn.

Feldtkeller en Zwicker deden onderzoek naar dit verband.

Het oor is het gevoeligst voor zweving als de draagfrequentie 4Hz bedraagt.

Als de draagfrequentie  $f_0 = 3.000\text{Hz}$  met  $\pm 3\text{Hz}$  fluctueert, bedraagt de zweving

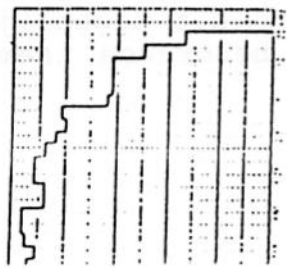
$$\Delta f/f_0 = \frac{6}{3000} = 0,2\%.$$

#### **Samenwerken van geluidsbronnen**

Wanneer twee of meer geluidsbronnen gelijktijdig actief zijn, is hun gezamenlijke intensiteit ongeveer gelijk aan de som van hun afzonderlijke intensiteiten. Dat is waarneembaar in de algemeen ervaren grotere luidsterkte. Bij twee even sterke geluidsbronnen, is de totale intensiteit dubbel zo groot en het geluidsniveau dus 3 foon hoger.

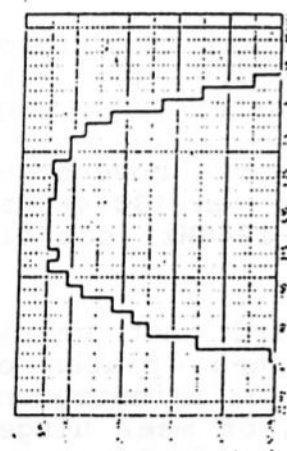
Maar bij gelijktijdige werking van meerdere geluidsbronnen van verschillende luidsterkte wordt de totale luidsterkte meestal wezenlijk bepaald door de luidste geluidsbron.

Eén van de consequenties hiervan is, dat men bij lawaai bestrijding het beste eerst met het luidste lawaai kan beginnen. Een andere is, dat het geen zin heeft om bij luidsprekerweergave de totale luidsterkte over meerdere luidsprekers met eenzelfde rendement te verdelen. De luidsprekers zullen onderling de geluidsenergie verdelen, die anders aan één van hen wordt toegevoerd.



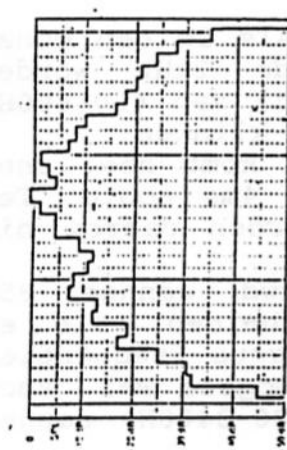
Van de Scherzo (Vivace)  
Scherzo (Vivace)

11-1904  
op. 70 - Scherzo (Vivace)  
CHOPIN



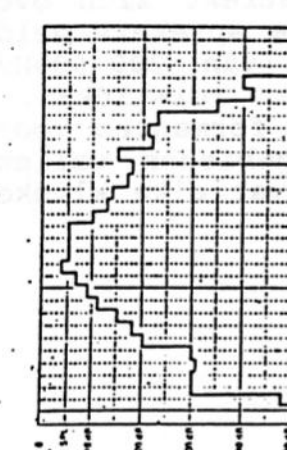
Karakteristiek voor piano in de midden-ligging.  
Accent op midden-tonen gebied...

Ludwig van Beethoven (1770-1827)  
Sonate No. 6 in F, op. 10 No. 2 - Allegro  
(gedeelte)  
ALFRED BRENDL, piano



3. ... laat-romantisch orkest met grote dynamiek en  
toonumfang. Sopraan en tenor geven extra  
accent in het middengebiet (700 - 2.000 Hz) ...

Giacomo Puccini (1858 - 1924)  
Tosca  
(Giacosa & Illica naar Sardou):  
2e akte: Vittoriale Vittoria!  
Tosca: MONTERRAT CABALLÉ, sopraan  
Cavaradossi: JOSÉ CARRERAS, tenor  
Scarpia: IRIGARAY WIXELL, bariton  
ORCHESTRA of the ROYAL OPERA HOUSE,  
COVENT GARDEN  
o.l.v. COLIN DAVIS



4. ... de inleide klank van het strijkwortel laat in  
een volmaakte akoestische balans ieder  
instrument tot zijn recht komen...

Frant Schubert (1797 - 1828)  
Strijkwortel in Es,  
op. posth. 125 No. 1, D. 87 - Allegro moderato  
(gedeelte)  
QUARTETTO ITALIANO  
Paolo Dorciani & Elisa Pegreffi, viool  
Piero Farulli, altviool  
Franco Rossi, violoncello



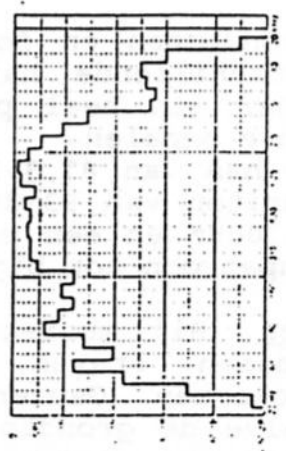
5. ... het 20-eeuws symfonie-orkest heeft een  
uitgebreid slagwerk-instrumentarium. Grote  
dynamiek en rijke kleurschakeringen...

Maurice Ravel (1875-1937)  
Rapsodie espagnole -  
Feria (gedeelte)  
CONCERTGEBOUWORKEST  
o.l.v. BERNARD HAITINK



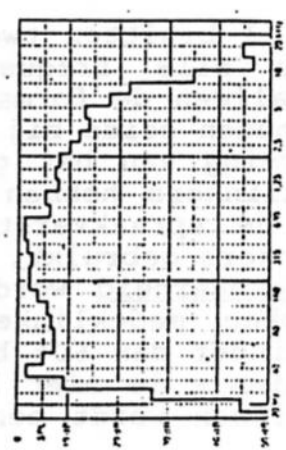
6. ... een vlak verloop in het  
n...  
luch (1635-1750)  
v.v. 1001 -

100, viool  
o.l.v. BERNARD HAITINK



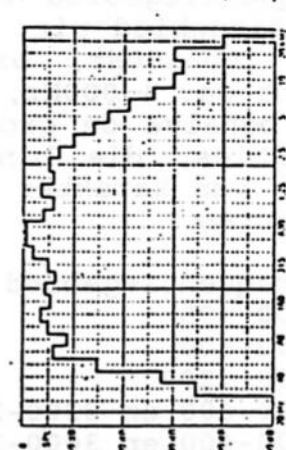
7. ... voorbeeld van zanger met dynamische  
begelijding, ver doorlopend in het lage-  
tonengebied tot onder 40 Hz (Grote trom) ...

Gustav Mahler (1860-1911)  
Des Knaben Wunderhorn  
Revelge (gedeelte)  
JOHN SHIRLEY-QUIRK, bas  
CONCERTGEBOUWORKEST  
o.l.v. BERNARD HAITINK



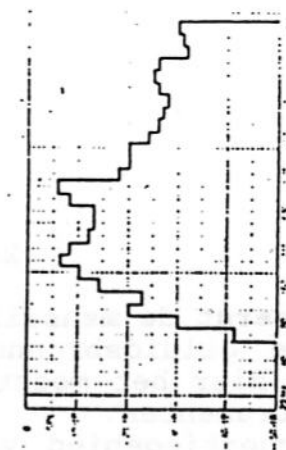
8. ... het pedaal is een essentieel element bij  
Dachs orgelwerken, het 32 voets register geeft  
zeer lage tonen, hier tot onder 30 Hz...

Johann-Sebastian Bach  
Orgelbüchlein - In d'r 1st Freude, BWV 615  
DANIEL CHORZEMPA aan het orgel van de  
Marekerk te Leliden



9. ... voorbeeld van milde en toch briljante klank  
van het romantische vioolconcert. Een  
regelmatige karakteristiek met een vloeiend  
verloop in de hogere frequenties...

Piotr Iljitsj Tsjajkowskij  
Vioolconcert in D, op. 35 -  
Allegro moderato (gedeelte)  
SALVATORE ACCARDO, viool  
BBC SYMPHONY ORCHESTRA  
o.l.v. COLIN DAVIS



10. ... de lagere harmonischen van de gitaar zijn  
relatief zwak, de hogere harmonischen lopen  
zeer hoog door tot 20.000 Hz...

Antonio Lauro (1917)  
El Marabino  
PEPE ROMERO, gitaar



**Geluidsbronnen: eerst de menselijke stem**

Van de ontelbare geluidsbronnen, waardoor we omgeven zijn, interesseren ons hier het meeste de menselijke stem en akoestische muziekinstrumenten.

Spraak. Het frequentiegebied van de spraak strekt zich over een ruim frequentiegebied uit. Voor mannelijke sprekers geldt een omvang van 100-300Hz, bij vrouwelijke van 200-600Hz. Klinkers komen tot ca. 4.000Hz, medeklinkers tot ruim 10kHz. In spraak komen behalve de grondtoon ook zg. formanten voor. Dat zijn frequenties, die binnen bepaalde gebieden vallen, zonder harmonisch van karakter te zijn. Zo bevat elke klinker zijn deigen formanten.

| Klinker | frequentiegebied in Hz |
|---------|------------------------|
| U       | 200-400                |
| O       | 400-600                |
| A       | 800-1200               |
| E       | 400-600 en 2200-2600   |
| I       | 200-400 en 3000-3500   |

De klinkers E en I bezitten twee formanten. Als in een opname/weergavecyclus alle frequenties boven de 2kHz worden weggelaten, zou alleen de formant in het bereik van 400-600Hz overblijven en zouden beide bij weergave als O klinken.

De volledige vorming van het gesproken woord komt heel snel tot stand. Medeklinkers hebben niet meer dan 4ms nodig. Ter beoordeling van de spraakverstaanbaarheid worden daarom bij voorkeur medeklinkers gebruikt.

Die spraakverstaanbaarheid wordt goed beschouwd, wanneer 85% van alle gesproken medeklinkers te onderscheiden valt en slecht als dat minder dan 60% betreft. De laagste frequentiegrens bij transmissie is niet kritisch, de hoogste wel. Voor gewone telefoonlijnen wordt een bereik van 300-3400Hz aangehouden.

Zang. Behalve grondtonen en formanten spelen bij het zingen van noten ookverschillende harmonischen op, die voor elke zangeres of zanger een heel persoonlijk karakter hebben en haar of zijn timbre bepalen.

Globaal gaat een bas van 87,3-360Hz met de meeste boventonen tot 1kHz, een bariton van 93-395Hz, een tenor van 130-480Hz, een alt van 170-700Hz en een sopraan van 240-1200Hz, ook elk met een boventoonpatroon tot bijna 16kHz.

Muziekinstrumenten. Bij muziekinstrumenten wordt het geluid opgewekt door snaren, staven, tongen, membranen, platen of trillende luchtkolommen. Gemeen hebben alle muziekinstrumenten, dat ze behalve de grondtoon ook een min of meer uitgebreide reeks boventonen produceren. Op die individualiteit is hun klankkarakter gebaseerd. Elders komen we op dit eigenlijk tot het vak Akoestiek van muziekinstrumenten behorende thema

terug.

Een leuk proefje is bijvoorbeeld om stapsgewijs de weergave van hoge tonen te blokkeren. Wanneer bijvoorbeeld bij een viooltoon alle frequenties boven 2kHz worden afgekapt, klinkt hij als een fluit.

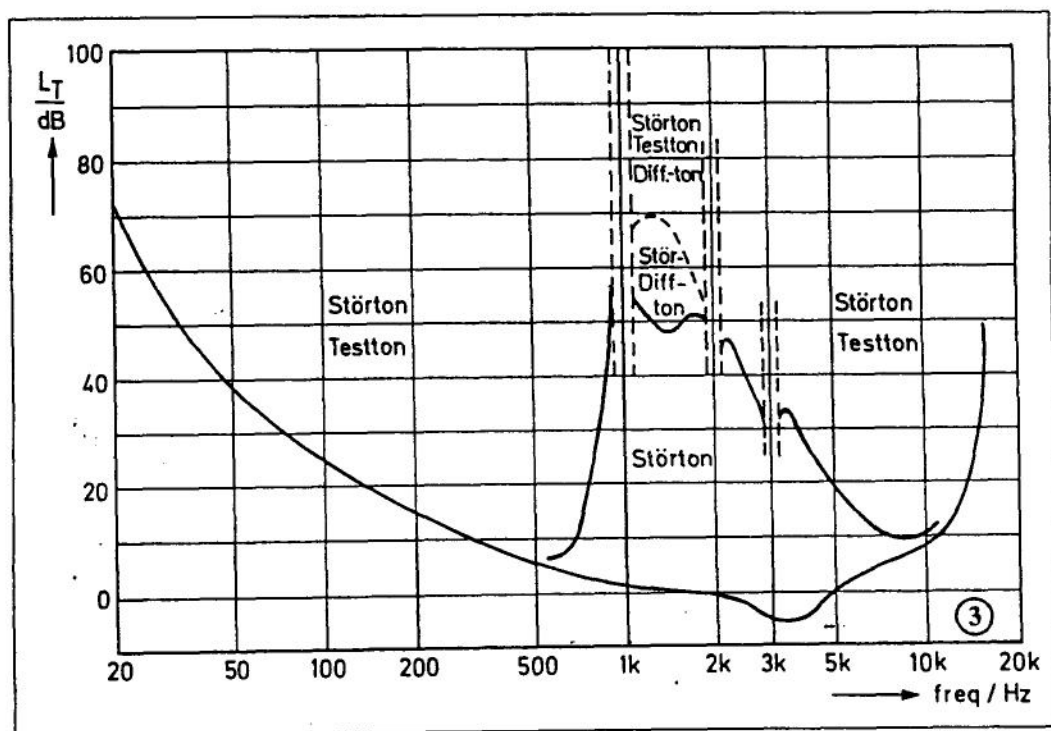
#### Maskering van een toon door een andere of door ruis

De ervaring van alledag leert, dat een luid geluid een zachter geluid geheel of gedeeltelijk kan maskeren. Eén van de redenen om in een discotheek het geluidsvolume tot de pijngrens te verhogen zou kunnen zijn, dat daardoor niemand de moeite hoeft te nemen om conversatie te voeren.

Maar dit maskeringseffect, waarop in het hoofdstuk over Datareductie uitvoerig wordt teruggekomen, speelt ook bij subtielere zaken een grote rol.

Componisten en arrangeurs, die melodieuze instrumenteren moeten hiervan goed op de hoogte zijn, willen ze voorkomen, dat bedoelde effecten helemaal niet hoorbaar zijn.

Het bij HiFi weergave nog zinvolle pianissimo bereikt dan een natuurlijke grens, als de zachtste toon om zo te zeggen onder de deken van het omgevingslawaai, de gehoordrempel of de ruis verdwijnt.



In bovenstaande afbeelding (fig. 19) is te zien, hoe de gehoordrempel quasi verandert wanneer een testtoon met varia-



bele frequentie gelijktijdig met een 80 foon luide stoortoon van 1kHz klinkt. In het frequentiegebied tot 500Hz is de testtoon hoorbaar zolang hij boven de gewone gehoordrempel uitkomt. In het gebied tussen 500Hz en 1kHz wordt hij gemaskeerd door de 1kHz stoortoon. Wil hij weer wel hoorbaar worden, moet hij met 50dB worden versterkt. Dat is ook tussen 1 en 2kHz het geval.

Een verdere bekrachtiging van de testtoon in dit frequentiebereik maakt niet slechts deze testtoon hoorbaar, maar ook een verschiltoon, waarvan de frequentie onder die van de stoortoon ligt. Pas boven een nieuwe, veel hogere drempel, komt naast de stoortoon ook de testtoon weer te voorschijn, samen met de verschiltoon.

Wanneer de testtoon en de stoortoon samenvallen of wanneer deze een twee- of drievoudige waarde bereikt, dan treedt over een breed bereik zweving op. Pas bij frequenties boven de 10kHz verdwijnt de maskering van de testtoon door de stoortoon geheel. De gehoordrempel verloopt daarboven ook weer normaal. Witte ruis, zoals die bijvoorbeeld optreedt bij uitgeschakelde muting tijdens FM stereo-ontvangst, wanneer tussen twee zenders wordt afgestemd, kan ook maskering veroorzaken. Ook versterkerruis kan een aanleiding hiertoe vormen. Gelukkig doet zich ook het omgekeerde voor en maskeert een luide toon of klank zachte ruis, brom of rumble. Dit effect wordt dankbaar benut in diverse ruisonderdrukkingssystemen.

#### **Richtkarakteristiek: het oor kan geluidsbronnen lokaliseren**

Anders dan het oog, dat slechts een beperkte gezichtshoek ter beschikking staat, neemt het oor geluid uit alle richtingen waar. Binauraal - met twee oren - horen maakt het mogelijk om vast te stellen, waar het geluid vandaan komt: de richting van de geluidsbron is vast te stellen, zodat we ons in de ruimte kunnen oriënteren.

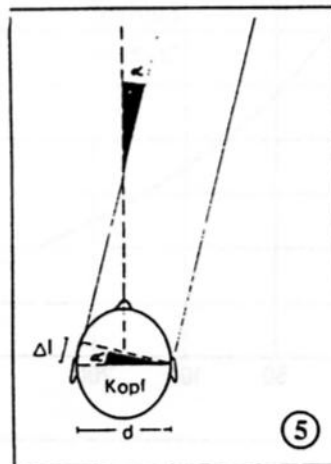
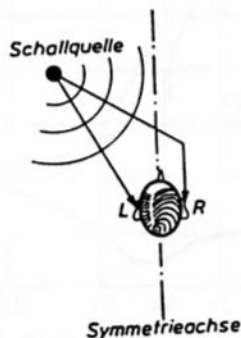


Fig. 20. Ontstaan van looptijdverschil bij het ruimtelijk horen van geluid, dat onder een hoek  $\alpha$  aankomt.

Een oorzaak van dit vermogen is in fig. 20 aangegeven. Van een onder een hoek  $\alpha$  ten opzichte van de blikrichting gesitueerde geluidsbron moet het geluid ten opzichte van het afgewende oor een afstand ter lengte van  $\Delta l$  meer afleggen dan ten opzichte van het toegewende oor. Daardoor bereikt het met een tijdsinterval  $\Delta t$  later het afgewende oor.

Afgezien van de intensiteitsvermindering tengevolge van de grotere afstand en de afscherming van het afgewende oor door het hoofd bedraagt het looptijdverschil

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c}$$

bij tot de lokalisatie van de geluidsbron ( $c$  = de voortplantingssnelheid van geluid). Voor een hoek  $\alpha = 30^\circ$  en een onderlinge oorafstand  $d$  van 17cm geldt  $\Delta l = d \cdot \sin \alpha = 0,085m$ , waaruit op zijn beurt het looptijdverschil volgt

$$\Delta t = \frac{0,085 \text{ Meter} \cdot \text{Sekunde}}{340 \text{ Meter}} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ Sekunden}$$

Het menselijk gehoor gebruikt deze gegevens en zet ze om in een waarnemingshoek. Deze gave werkt tot  $3 \cdot 10^{-5}$  s, overeenkomstig een lokalisatiehoek van  $3^\circ$ .

Het ruimtelijk horen en waarnemen berust daadwerkelijk op de gelijktijdige verwerking van niveau- en looptijdverschillen. Naar de wet van het eerste golffront situeert het oor het geluid uit de richting van de eerstaankomende geluidsgolf zodra de looptijd van het geluid uit bijvoorbeeld de beide luidsprekers de luisteraar met meer dan 1ms verschil bereikt. Dit zou betekenen, dat het verschil in afstand van de stereo luisteraar tot de beide luidsprekers niet meer dan 34cm mag bedragen. Gelukkig wordt de geluidsvertraging van het ene oor door de niveauvermindering aan het andere gecompenseerd (en omgekeerd).

Met name aan dit effect is te danken, dat bij stereofonisch luisteren de bruikbare luisterzone niet puntvormig is.

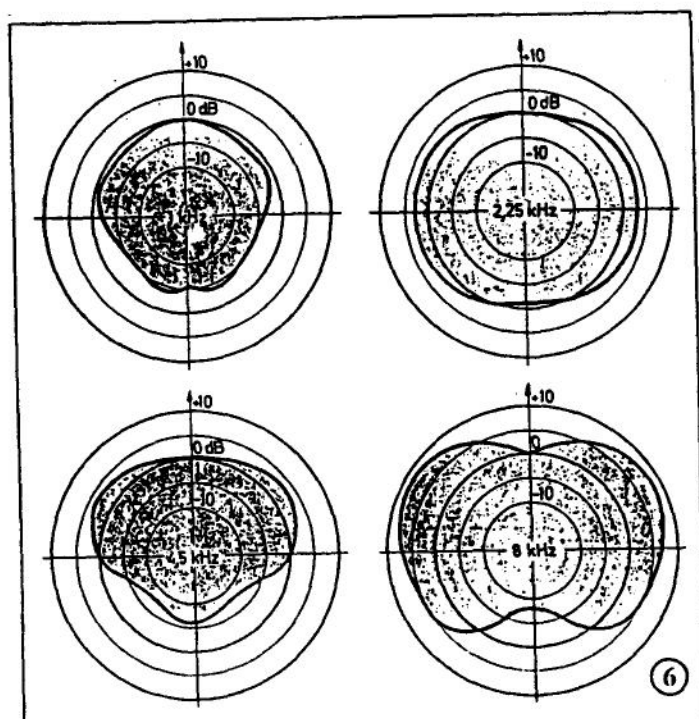


Fig. 21. Richtkarakteristiek van het oor bij binauraal horen van vier frequenties. Bij 1kHz reageert het oor het gevoeligst op geluid, dat uit de blikrichting komt. Komt dat geluid van achter op de orden, dan is van ca. 5dB verzwakking sprake. Bij 2,25kHz ligt de richting van de grootste gevoeligheid opzij. terwijl deze zich bij 4,5kHz en hoger weer naar voren verplaatst.

Het is aan de oorschelpen te danken, dat van achter binnenkomend geluid tot 15dB zwakker wordt waargenomen, behalve in het bereik rond de 2kHz, waar vermoedelijk buigingseffecten rond de oorschelp de demping verhinderen. Deze frequentie-afhankelijke richtingskarakteristiek (afscherming van het oor) leidt bij het horen van het origineel tot duidelijke klankkleurverschillen en ondersteunt het richtinghoren aanzienlijk.

#### Bewondering voor het oor

Alles bijeen beschikt het menselijk oor ook over een verrassend groot oplossend vermogen voor de invalrichting van het geluid. In een bereik van een hoek van  $\pm 45^\circ$  ten opzichte van de blikrichting zijn stapjes van elk  $3^\circ$  vastgesteld; in het bereik van  $45^\circ$  tot  $90^\circ$  stapjes van  $4,5^\circ$ . Niet minder goed is het oplossend vermogen in het tijdsdomein: om zich op een richtingsverandering tussen twee geluidsbron-

nen in te stellen, heeft het oor ongeveer 150ms nodig; op een richtings verandering tussen voor en achter reageert het met een vertraging van 250ms. Dat komt overeen met de duur van heel korte muzieknoten.

Dat de mens zo ook in ruimtelijk opzicht complexe muziekstructuren van bv. een groot symfonie orkest kan analyseren, is natuurlijk prachtig, maar niet zo verwonderlijk, want deze kunstmuziek is volgens onze eigen maatstaven - o.a. de eigenschappen van het gehoor - geschapen. Ook hier is het gevaarlijk oorzaak en gevolg te verwisselen.