

SAMENVATTING

De wijze waarop gelijktijdig klinkende tonen door het oor worden waargenomen en onderscheiden, geeft de indruk dat hierbij zowel frequentieanalyse als periodiciteitsanalyse een rol spelen. Frequentieanalyse kan het feit verklaren dat we in staat zijn de door verschillende muziekinstrumenten geproduceerde tonen van elkaar te onderscheiden maar geeft geen antwoord op de vraag waarom ieder van deze tonen, gewoonlijk bestaande uit een aantal harmonischen, zich manifesteert als een eenheid met één bepaalde toonhoogte. Daarentegen heeft periodiciteitsanalyse geen moeite het laatstgenoemde verschijnsel te verklaren, maar geeft zij niet aan hoe gelijktijdige tonen afzonderlijk kunnen worden gehoord. Deze twee benaderingswijzen behoeven echter mijns inziens niet als onverenigbaar te worden beschouwd. De in deze studie beschreven experimenten werden uitgevoerd met het doel de rol van beide analysemethoden bij het horen vast te stellen alsmede de wijze waarop zij met elkaar zijn verbonden.

In de eerste plaats wordt de vraag behandeld in welke mate het oor in staat is de harmonischen van een samengestelde toon van elkaar te onderscheiden (Hoofdstuk 2). De experimenten toonden aan dat, zelfs

onder de gunstigste omstandigheden, niet meer dan de eerste vijf tot acht harmonischen afzonderlijk konden worden waargenomen. Deze grens van het frequentieanalyserend vermogen van het gehoororgaan komt overeen met de zgn. kritieke bandbreedte; harmonischen kunnen dus alleen onderscheiden worden wanneer hun onderling frequentieverschil groter is dan deze bandbreedte. Dezelfde grens werd gevonden voor de onderscheidbaarheid van de deeltönen van niet-harmonische series van tonen. Experimenten waarin het maskeringspatroon van een samengestelde toon werd gemeten, bevestigden deze betekenis van de kritieke bandbreedte.

Ten tweede wordt het optreden van combinatietonen bestudeerd (Hoofdstuk 3). Deze tonen worden in het oor gevormd bij aanbieding van twee luide tonen. Wanneer h en l de frequenties van de hoogste resp. de laagste van deze twee tonen voorstellen, dan blijken de belangrijkste combinatietonen $h-l$, $2l-h$ en $3l-2h$ te zijn. Experimenten waaraan 18 proefpersonen deelnamen, toonden aan dat de waarnemingsdrempel van combinatietonen, gedefinieerd als het minimale geluidsdruk-niveau van de primaire tonen t.o.v. de gehoordrempel, waarbij combinatietonen hoorbaar zijn, individueel sterk verschilt;

de gemiddelde waarnemingsdrempels lagen alle boven 40 dB. Combinatietonen kunnen niet worden verklaard op basis van frequentieanalyse of van periodiciteitsanalyse maar moeten worden toegeschreven aan niet-lineaire vervorming. Het feit dat de waarnemingsdrempel van combinatietonen bij kleine frequentieverschillen tussen de primaire tonen significant lager is dan bij grote verschillen, impliceert dat de vervorming niet kan worden voorgesteld door een frequentie-onafhankelijke niet-lineaire karakteristiek. Vergelijking van de vervorming in het oor met de vervorming die in geluidsweergaveapparatuur kan worden getolereerd voordat zij wordt waargenomen, geeft reden te veronderstellen dat de vervorming in het oor zo gering is dat bij gebruikelijke luisterniveaus van spraak en muziek geen combinatietonen worden waargenomen. Combinatietonen komen daarom niet in aanmerking ter verklaring van tonale consonantie en evenmin van het feit dat de toonhoogte van een samengestelde toon zonder grondtoon gelijk is aan die van de laatstgenoemde toon; gemiddeld waren geluidsdruk-niveaus van meer dan 50 dB boven de gehoordrempel vereist om de ontbrekende grondtoon in het oor opnieuw te introduceren.

Ten derde wordt, met het oog op de oorsprong van tonale consonantie, de interferentie van enkelvoudige tonen met een klein frequentieverschil onderzocht (Hoofdstuk 4). Onder tonale consonantie wordt hierbij verstaan het singuliere karakter van toonintervallen bestaande uit samengestelde tonen met eenvoudige frequentieverhou-

dingen als 1:2, 2:3, 3:4, enz. Experimenten toonden aan dat, over het frequentiebereik van 125 tot 2000 Hz, intervallen bestaande uit enkelvoudige tonen met een frequentieverschil groter dan de kritieke bandbreedte als consonant werden beoordeeld en als het meest dissonant bij frequentieverschillen van ongeveer een kwart van deze bandbreedte. Deze resultaten steunen de opvatting dat tonen interfereren wanneer het frequentieverschil kleiner is dan de kritieke bandbreedte, tot uiting komend in zwevingen bij zeer kleine frequentieverschillen en een ruwheidssensatie of dissonantie bij grotere verschillen. In dit opzicht sluiten zij aan bij de resultaten van Hoofdstuk 2. Door in aanmerking te nemen dat normaliter alle tonen in de praktijk uit een serie harmonischen bestaan, die eveneens aanleiding kunnen geven tot interferentie, wordt het verschijnsel van tonale consonantie verklaard op een wijze die als een bevestiging van de consonantietheorie van Helmholtz dient te worden beschouwd. Statistische analyses van composities van J.S. Bach en A. Dvořák, waarbij de interval distributies van gelijktijdige tonen werden berekend als functie van frequentie en aantal harmonischen, illustreren de belangrijke rol van de kritieke bandbreedte in de muziek.

Ten vierde komt het verschijnsel aan de orde dat twee enkelvoudige tonen ook bij veel grotere frequentieverschillen dan de kritieke bandbreedte kunnen interfereren (Hoofdstuk 5). Deze interferentie uit zich in zwevingen bij ontstemde consonanten. Voor toonintervallen met frequentieverhou-

ding $1:n$ ($n=2, 3, \dots$), iets ontstemd, worden deze zwevingen gewoonlijk verklaard als gevolg van door vervorming in het oor geproduceerde harmonischen. Het bleek dat combinatietonen of harmonischen niet de belangrijkste oorzaak van de zwevingen van ontstemde toonintervallen met frequentieverhouding $m:n$ ($m=2, 3, \dots, n-1$) kunnen zijn, daar de zwevingen niet verdwijnen wanneer de genoemde secundaire tonen worden gemaskeerd door ruisbanden. Experimenten waarin bij constante laagste toon het geluidsdrukkniveau van de hoogste toon werd bepaald, waarbij de zwevingen het duidelijkst te horen zijn, toonden aan dat dit niveau, ongeacht de frequentieverhouding, bij toenemend frequentieverschil tussen de tonen geleidelijk afneemt. Bovendien werd gevonden dat de zwevingen bij $1:3$, iets ontstemd, zich manifesteren in een zwakke toonsensatie met een toonhoogte die periodiek op een zaagtandachtige wijze verschuift (*sweep-tone effect*). Deze experimentele resultaten doen ten sterkste vermoeden dat de zwevingen, ook voor het geval $1:n$, niet een gevolg zijn van in het oor geproduceerde combinatietonen of harmonischen, maar te maken hebben met de periodieke veranderingen van de golfvorm van de gesuperponeerde sinusvormige trillingen. Dit houdt in dat enkelvoudige tonen, voornamelijk bij lage frequenties, ook kunnen interfereren bij frequentieverschillen die veel groter zijn dan de kritieke bandbreedte.

Ten vijfde wordt de vraag bestudeerd of de toonhoogte van samengestelde tonen gebaseerd is op de frequentie van de grondtoon

of op de periodiciteit van het geluid als een geheel (Hoofdstuk 6). Experimenten waarin werd beoordeeld de verandering in toonhoogte van een samengestelde toon waarvan de grondtoon naar een 10% lagere frequentie werd verschoven en alle andere harmonischen naar een 10% hogere frequentie, wezen uit dat voor frequenties van de grondtoon lager dan ongeveer 1400 Hz de toonhoogte veranderde overeenkomstig de harmonischen terwijl de toonhoogte bij hogere frequenties de grondtoon volgde. Dit geldt zowel voor tonen met harmonischen van gelijke amplitude als voor tonen met harmonischen waarvan de amplituden met 6 dB per octaaf afnemen. Dit resultaat steunt de opvatting dat de toonhoogte van samengestelde tonen niet op de frequentie maar op de periodiciteit is gebaseerd; het is redelijk te veronderstellen dat dit eveneens voor enkelvoudige tonen geldt.

De hierboven geschetste experimenten lichten ons in over de karakteristieken van het gehoororgaan als geheel; een vergelijking met de fysiologische gegevens kan ons een beter inzicht geven hoe tonen in feite door het orgaan worden gepercipieerd. Als inleiding hiertoe is een overzicht van de fysiologie van het oor gegeven (Hoofdstuk 7). Het blijkt dat de geschiedenis van de gehoortheorie, voorzover deze de waarneming van tonen betreft, hoofdzakelijk beheerst wordt door vier hypothesen die in moderne vorm luiden: 1. het binnenoor voert een frequentieanalyse van het geluid uit, op zodanige wijze dat lage tonen een trillingspatroon over de basilaire membraan met een maximum bij het helico-

trema tot gevolg hebben en hoge tonen met een maximum bij het ovale venster; 2. de toonhoogte is gebaseerd op de plaats van het maximum van het stimulatiepatroon; 3. de geluidoverdracht in het oor wordt gekenmerkt door niet-lineaire vervorming; 4. de toonhoogte is gebaseerd op de herhaalfrequentie van de in de haarcellen opgewekte zenuwimpulsen. De eerste drie hypothesen werden voor het eerst geformuleerd door Helmholtz, de laatste door Wundt. De fysiologische gegevens steunen hypothesen 1 en 3, terwijl zij geen van de alternatieven 2 en 4 uitsluiten.

Tenslotte worden de experimentele resultaten besproken in het licht van de fysiologische gegevens (Hoofdstuk 8). Zij bevestigen de hypothesen 1, 3 en 4 maar steunen hypothese 2 niet. Als alternatief voor de laatstgenoemde wordt de volgende hypothese voorgesteld: 5. de distributie van de stimulatie over de basilaire membraan bepaalt het timbre (klankkleur).

Op grond van de discussie in Hoofdstuk 8 wordt de perceptie van tonen als volgt beschreven. Bij een samengestelde toon vallen de individuele trillingspatronen van de harmonischen langs de basilaire membraan gedeeltelijk over elkaar heen, waarbij de eerste vijf tot acht harmonischen nog gescheiden maxima geven, maar de hogere niet. Dit heeft tot gevolg dat de periodiciteit van de geluidsgolf teruggevonden wordt in de golfvorm van de trilling van de basilaire membraan; deze periodiciteit wordt, tot een frequentie tussen 1400 en 4000 Hz, eveneens teruggevonden in het tijdspatroon van de

zenuwimpulsen. Het tijd-plaatspatroon van de zenuwimpulsen is de basis van de psychologische parameters toonhoogte, timbre en luidheid: toonhoogte wordt afgeleid van de herhaalfrequentie van de impulsen, timbre van hun distributie over de basilaire membraan en luidheid van het totale aantal zenuwimpulsen. Volgens deze opvatting is het zeer waardevol dat het frequentieanalyserend vermogen van het oor beperkt is, omdat het ons in staat stelt de samengestelde toon als een eenheid met één bepaalde toonhoogte waar te nemen; blijkbaar "overschaduw" deze toonhoogte de individuele toonhoogten van de eerste vijf tot acht harmonischen.

De experimentele resultaten betreffende combinatietonen en zwevingen worden in het kader van deze theorie verklaard. Combinatietonen zijn het gevolg van het optreden van niet-lineaire vervorming bij over elkaar heen vallende trillingspatronen van de basilaire membraan. Daarnaast verklaart dit over elkaar heen vallen de interferentieverschijnselen, niet alleen voor tonen met een klein frequentieverschil, maar ook voor tonen met een frequentieverschil groter dan de kritieke bandbreedte. De zwevingen van ontstemde consonanten en het *sweep-tone* effect worden beschouwd het gevolg te zijn van periodieke veranderingen in het tijdspatroon van de zenuwimpulsen.

Wanneer het gehoororgaan twee of meer samengestelde tonen worden aangeboden, kan ieder van deze tonen worden waargenomen wanneer zijn geluidsdrukkniveau over één of meer kritieke banden hoog genoeg is om niet door andere tonen te worden ge-

maskeerd. Op deze wijze kan ons vermogen worden verklaard om gelijktijdige tonen, zoals deze worden voortgebracht door muziek-

instrumenten en de menselijke stem, van elkaar te onderscheiden.

Tones produced by musical instruments and the human voice contain nearly always of a number of harmonics. The frequency of these harmonics are multiples of the frequency of the first harmonic or fundamental. In the first demonstration and a complex tone is built up by adding to a fundamental tone the second, third, fourth, fifth and sixth harmonics successively.



(Demonstration)

The ability to hear these harmonic separately is called in the first two (2) parts of the experiment described in Chapter 2. It is shown that this ability varies with the age of the subject. The critical frequency of the hearing is determined and is shown to be about 15,000 cycles per second. When the ear is stimulated by two tones, one of which has a frequency near the critical frequency, the other tone is heard. This is the phenomenon of the missing fundamental. It is shown that the ear is able to hear the missing fundamental even when the fundamental frequency is not present. This is the phenomenon of the missing fundamental.