

DE TOONHOOGTEGEWAARWORDING

door R. J. RITSMA *) en B. LOPES CARDOZO *).

534.321

Overzicht; sinustrillingen en samengestelde geluiden

De toonhoogtegewaarwording, die bij enigszins geoefende personen een verbluffende nauwkeurigheid kan hebben, berust op een mechanisme dat nog maar ten dele begrepen is. We willen in dit artikel een beknopte uiteenzetting geven omtrent de inzichten betreffende de toonhoogtegewaarwording die thans als vaststaand mogen worden beschouwd, en een aantal experimenten beschrijven waarop deze inzichten berusten.

Ter vermindering van misverstand, beginnen we met op te merken dat de waargenomen toonhoogte een subjectieve grootte is en derhalve met psychofysische methodes gemeten moet worden¹⁾. Ook mag de toonhoogte niet zonder meer geïdentificeerd worden met een geluidsfrequentie. Integendeel: het doel van onderzoek betreffende de toonhoogtegewaarwording is juist om te vinden hoe de waargenomen toonhoogte afhangt van de diverse parameters waarmee een bepaald geluid beschreven kan worden. Onderzoek hieromtrent is mogelijk dank zij het feit dat de toonhoogte een „ééndimensionele” grootte is: van twee tonen kan altijd worden vastgesteld of ze even hoog zijn, en zo neen, welke de hoogste is. Met behulp van deze eigenschap kan iemand de toonhoogte die hij aan een zeker geluid toekent, altijd vergelijken met die van een referentietoon, en aldus kan men de moeilijkheid omzeilen dat de toonhoogte, zoals elke gewaarwording, niet toegankelijk is voor directe waarneming.

Uit hetgeen volgt, zal blijken dat men verschil moet maken tussen geluiden die bestaan uit één enkele sinustrilling, en geluiden die een samengesteld spectrum vertonen. Bij de eerste mag men wél op de gebruikelijke wijze de frequentie als maat voor de toonhoogte beschouwen. Dit maakt het b.v. mogelijk een muzikale toonreeks te noteren als een reeks getallen. Een samengesteld geluid echter kan een toonhoogte hebben zodanig dat de frequentie van een even hoog klinkende sinustoon niet overeenkomt met een der in het spectrum voorkomende frequenties, noch daaruit eenvoudig afgeleid kan worden. Voorbeelden hiervan vindt men in de

slagtoon van kerkklokken en in de menselijke stem²⁾.

We zullen hieronder aantonen dat het laatstgenoemde verschijnsel niet verklaard kan worden uitgaande van de tot voor kort algemeen aanvaarde zg. plaatstheorie, en vervolgens aangeven in welke richting de oplossing waarschijnlijk gezocht moet worden. Eerst geven we aan de hand van *fig. 1* een korte recapitulatie van deze theorie³⁾.

In *fig. 1a* ziet men een schematische afbeelding van het menselijk gehoororgaan. Links de uitwendige gehoorgang, door het trommelvlies gescheiden van het middenoor, en rechts het binnenoor. Dit laatste bestaat uit een langwerpige ruimte (35 mm lang) die gevuld is met vloeistof en in de lengterichting in tweeën verdeeld door het cochleaire tussenschot, dat door geluiden in trilling gebracht wordt. Dit tussenschot bestaat o.a. uit het basilaire membraan waarin de zg. haarcellen van Corti liggen.

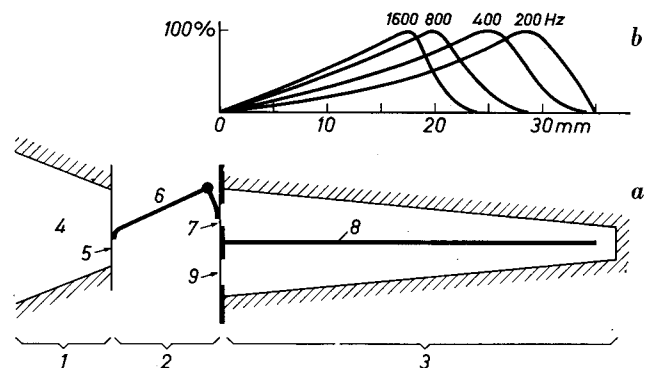


Fig. 1. a) Schematische voorstelling van het menselijke oor. Van links naar rechts ziet men het uitwendige deel van het oor (1), het middenoor (2) en het binnenoor (3). De luchttrillingen bereiken via de gehoorgang 4 het trommelvlies 5. De beweging hiervan wordt via de gehoorbeentjes 6 (schematisch getekend als hefboom met een lange en een korte arm) overgebracht op het ovale venster 7, dat het binnenoor afsluit. Door de vloeistof in het binnenoor beweegt zich diensgevolge een drukgolf, die het cochleaire tussenschot 8 in beweging brengt en zodoende de daarin gelegen uiteinden van de gehoorzenuw prikkelt. Het bij sinustonen van diverse frequenties behorende amplitudepatroon van deze beweging vindt men geschetst in (b). De top van zo'n curve ligt dicht bij het eind van het tussenschot naarmate de frequentie lager is. De voor het bewegen van 7 vereiste vloeistofbeweging is mogelijk door de aanwezigheid van het (elastische) ronde venster 9. In werkelijkheid is de ruimte 3 opgerold tot een spiraal (het zg. slakkenhuis).

*) Instituut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.

¹⁾ Zie het eerste artikel in dit nummer: J. F. Schouten, Philips techn. T. 24, 337-340, 1962 (no. 11/12).

²⁾ Zie b.v. A. Cohen, Het fonetisch onderzoek, Philips techn. T. 24, 348-353, 1962 (no. 11/12).

³⁾ Men vindt de plaatstheorie uitvoerig behandeld o.a. in H. Fletcher, Speech and hearing in communication, Van Nostrand, New York 1953.

Deze vormen de uitlopers van de gehoorzenuw en detecteren de uitwijking van het desbetreffende punt van het basilaire membraan. In werkelijkheid is het getekende deel van het binnenoor opgerold, het draagt daarom de naam slakkenhuis ⁴⁾. Volgens de plaats-theorie nu correspondeert, kort samengevat, ten eerste met iedere frequentie een bepaalde plaats op het cochleaire tussenschot, en, ten tweede, met iedere plaats een bepaalde toonhoogte.

Voor *sinustonen* kan men datgene wat gebeurt, inderdaad aldus schematisch samenvatten: dank zij de onderzoeken van Von Békésy ⁵⁾ weten we thans dat de lopende golven die via het ovale venster in de vloeistof van het binnenoor teweeggebracht worden wanneer een geluidstrilling het trommelvlies treft, sneller „gedempt” worden naarmate de frequentie hoger is; alleen golven met vrij lage frequentie „lopen door” tot het eind van het binnenoor. Men vindt dit geïllustreerd in fig. 1b, waar voor enige frequenties het verloop van de amplitude als functie van de plaats op het tussenschot (schematisch) is uitgezet. De zojuist genoemde, met een frequentie corresponderende, plaats op het cochleaire tussenschot kan geïdentificeerd worden met de abscis van de top van de desbetreffende kromme, d.w.z. met de plaats waar het tussenschot het sterkst wordt geëxciteerd. Men mag het binnenoor dus inderdaad opvatten als een frequentie-indicator.

Het blijkt dat men het binnen zekere grenzen zelfs mag opvatten als een frequentie-analysator: in beperkte mate is het oor in staat om in een willekeurig geluid de sinustonen waaruit dit is samengesteld, afzonderlijk te identificeren. Men kan dit b.v. constateren bij het volgende experiment. Beluistert men het samengestelde geluid dat wordt teweeggebracht door een periodieke impuls, dan ervaart men dit geluid bij de eerste kennismaking als één toon met een scherp timbre. Wordt een der lagere harmonischen uit het spectrum van zo'n impulstoon weggenomen (fig. 2), dan wordt het timbre nog iets scherper. Wordt vervolgens deze harmonische weer toegevoegd, dan hoort men hem, nu de aandacht op zijn bestaan gevestigd is, daarna als afzonderlijke toon.

Uit experimenten van het volgende type blijkt dat voor samengestelde geluiden de tweede bewering van de plaatstheorie — „met iedere plaats op het cochleaire tussenschot correspondeert een zekere toonhoogte” — niet opgaat. Men maakt b.v. een melodie

(zie fig. 3a) van tonen die op dezelfde wijze gegenereerd worden als hierboven. De toonhoogte wordt gevarieerd door de herhalingsfrequentie van de impulsen te variëren. Door middel van een filter echter worden van het geluidsspectrum van deze tonen alleen de componenten doorgelaten waarvan de frequenties tussen ca. 2000 en 3000 Hz liggen. Toch corresponderen de waargenomen toonhoogten met die van de in fig. 3a genoteerde noten, d.w.z. met de hoogte van sinustonen van ca. 200 tot 300 Hz.

Verschuift men bij een dergelijk experiment de ligging van het doorgelaten frequentiegebied (fig. 3b), dan ervaart de luisteraar de verandering van frequentiegebied slechts als een verandering van timbre, *niet* als een verandering van toonhoogte. De toonhoogten corresponderen steeds met die van de genoteerde noten.

In alle gevallen wordt dus een toonhoogte waargenomen gelijk aan die van een sinustoon met een frequentie die ver beneden de ondergrens van het doorgelaten gebied ligt, en die dus in 't geheel niet correspondeert met de geëxciteerde plaats van het cochleaire tussenschot.

Een samengesteld geluid dat zich aan het oor voordoet als een enkele toon waarvan de hoogte

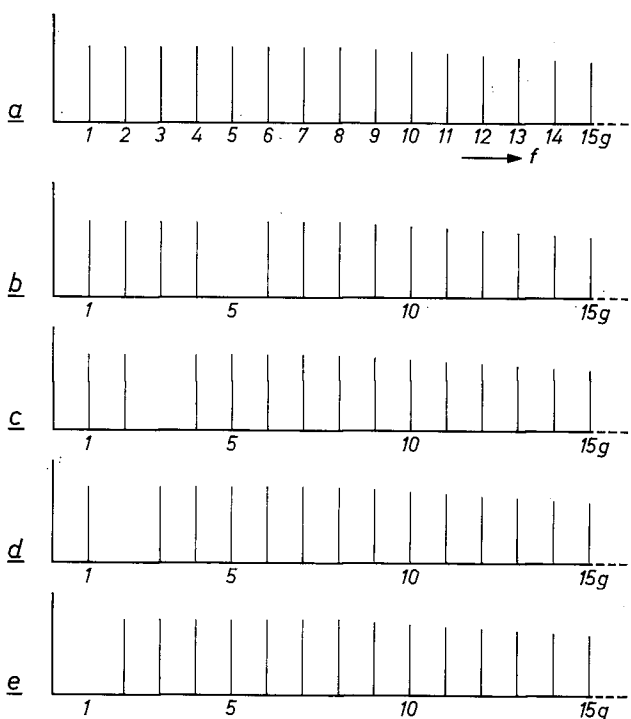


Fig. 2. a) Spectrum van een impulstoon, d.i. de toon die teweeggebracht wordt door een periodieke impuls van zeer korte duur. Uitgezet is de intensiteit der spectrumlijnen tegen hun frequentie (f) uitgedrukt als veelvoud van de grondfrequentie g . Het spectrum bestaat uit een zeer groot aantal ongeveer even sterke harmonischen.

b), c), d) en e) Hetzelfde na verwijdering van resp. de 5e, 3e, 2e en 1e harmonische. In alle gevallen correspondeert de toonhoogte met die van de grondtoon; er is alleen verschil in timbre.

⁴⁾ Zie voor een anatomische beschrijving b.v. E. G. Wever en M. Lawrence, *Physiological acoustics*, Princeton University Press, Princeton 1954.

⁵⁾ Zie G. von Békésy, *Experiments in hearing*, McGraw-Hill, New York 1960.

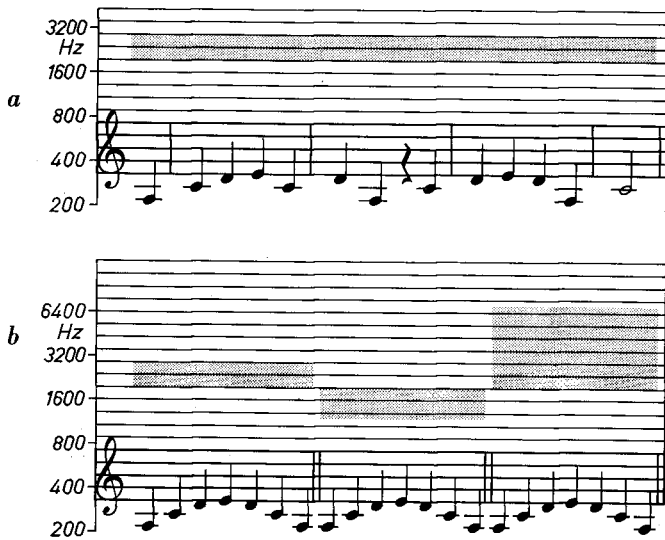


Fig. 3. a) Maakt men een melodie van impulstonen (herhalingsfrequentie 200-300 Hz) waarvan alleen de harmonischen die tussen 2000 en 3000 Hz liggen, worden doorgelaten, dan correspondeert toch de toonhoogte met die van de genoteerde noten. Het gebied van de doorgelaten harmonischen is de geschaduwde strook in het bij de notenbalk behorende hulplijnen-systeem. (Een notenbalk, plus hulplijnen, kan beschouwd worden als een rechthoekig coördinatensysteem met als ordinaat de logarithme van de met de toonhoogte corresponderende frequentie.)
 b) Bij verschuiving van het doorgelaten frequentiegebied (zie de diverse geschaduwde stroken) blijkt alleen het timbre van de tonen te veranderen, niet de hoogte.

niet correspondeert met een der aanwezige frequenties, noemen wij residu⁶⁾. Deze naam is ontstaan doordat het beschreven merkwaardige verschijnsel ten aanzien van de toonhoogte voor het eerst is waargenomen aan een impulstoon (zie boven) waaraan alle afzonderlijk waarneembare (lagere) harmonischen onttrokken waren; de resterende groep harmonischen mocht daar met recht „residu” heten. Later is gevonden dat een groep van slechts drie opeenvolgende harmonischen, b.v. de 8e, 9e en 10e het residu-effect reeds vertoont. We merken nog op dat het anderzijds niet noodzakelijk is dat alle afzonderlijk hoorbare harmonischen geëlimineerd zijn.

Nadere beschouwing van het residu-effect

Het bestaan van het residu-effect als zelfstandig fenomeen is lange tijd in twijfel getrokken. Men meende dat een toon van de waargenomen hoogte wèl reëel in het oor aanwezig zou zijn; deze toon zou niets anders zijn dan een verschiltoon, ontstaan door niet-lineaire vervorming in het oor. Ware deze verklaring juist, dan zou de plaatstheorie in volle omvang zijn geldigheid kunnen behouden.

⁶⁾ Zie J. F. Schouten, De toonhoogtegevaarwording, Philips techn. T. 5, 298-306, 1940.

Bij niet-lineaire vervorming kan men het verband tussen het ingangssignaal $V_i(t)$ en het uitgangssignaal $V_u(t)$ algemeen formuleren als:

$$V_u(t) = C [V_i(t) + \delta_1 V_i^2(t) + \dots] \dots \dots (1)$$

met constanten C, δ_1, \dots . Heeft men een ingangssignaal bestaande uit twee even sterke sinustrillingen:

$$V_i(t) = A(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t), \dots \dots \dots (2)$$

dan vindt men volgens (1) voor het uitgangssignaal (we stellen $C = 1$):

$$V_u(t) = V_i(t) + \delta_1 A^2 [1 - \frac{1}{2} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{2} \cos 2\omega_2 t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] + \dots$$

Het oorspronkelijke signaal wordt dus door de niet-lineaire vervorming o.m. „verontreinigd” met een trilling met frequentie $(\omega_1 + \omega_2)$ en een met frequentie $(\omega_1 - \omega_2)$. In de geluidsleer noemt men deze resp. de somtoon en de verschiltoon. Het bestaan van deze tonen is door musici reeds beschreven in het midden van de 18e eeuw (G. A. Sorge 1744; G. Tartini 1754).

Men kan tegen de verschiltoonhypothese een aantal onderling zeer verschillende argumenten aanvoeren:

- 1) Het residu-effect treedt óók op bij geluiden die zo zwak zijn dat niet-lineaire vervorming uitgesloten geacht moet worden.
- 2) De residutoon geeft met een sinustoon van ongeveer gelijke toonhoogte geen zwevingsverschijnselen.
- 3) Men kan de residutoon, in tegenstelling tot een even hoge sinustoon, niet overstemmen (zg. maskeren) door ruis waarvan het frequentiespectrum zich uitstrekt rondom de frequentie f_D die correspondeert met de waargenomen toonhoogte; wèl door ruis waarvan het spectrum de componenten van het residu omvat⁷⁾; zie fig. 4. III

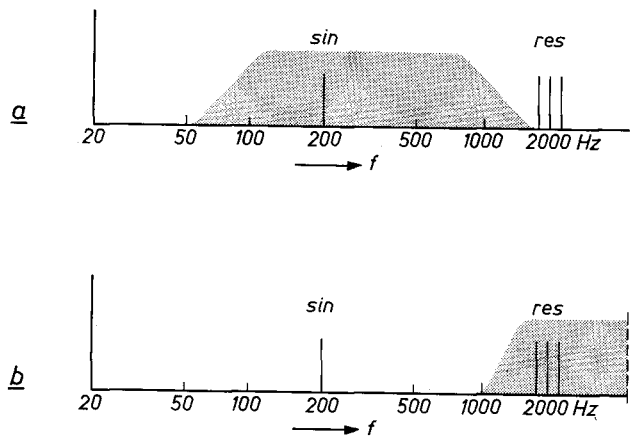


Fig. 4. Maskeren door middel van ruis toont aan dat de residutoon niet als verschiltoon in het oor ontstaat. Kiest men het ruisspectrum ongeveer als correspondeert met de schaduwpartij in (a), dan verdwijnt een sinustoon van 200 Hz (sin), maar niet de even hoog klinkende residutoon die afkomstig is van het complex res (frequenties 1800, 2000 en 2200 Hz). Kiest men het ruisspectrum als in (b), dan verdwijnt juist de residutoon en blijft de sinustoon hoorbaar.

⁷⁾ Dit is het eerst aangetoond door J. C. R. Licklider, J. Acoust. Soc. Amer. 26, 945, 1954.

- 4) Een onomstotelijk argument tegen de verschiltoonhypothese vindt men in het verschijnsel dat de residutoonhoogte niet altijd met de verschilfrequentie correspondeert. Men kan dit o.a. constateren bij een experiment van het volgende type.

Men gaat b.v. uit van een residu van drie componenten met frequenties 1800, 2000 en 2200 Hz, d.w.z. de 9e, 10e en 11e harmonische van 200 Hz. De toonhoogte correspondeert met 200 Hz ($f_p = 200$ Hz). Vervolgens verhoogt men alle frequenties met een gelijk bedrag, b.v. 10 Hz, en men herhaalt dit enige malen, b.v. tot ongeveer 1850, 2050 en 2250 Hz. Hoewel het frequentieverschil van de componenten bij deze operatie constant blijft (200 Hz), hoort men de residutoonhoogte stijgen. Als de frequenties de laatstgenoemde waarden bereikt hebben, is f_p gestegen tot bijna 205 Hz (fig. 5). Laat men op dezelfde wijze de frequenties afnemen, dan daalt de residutoonhoogte.

IV

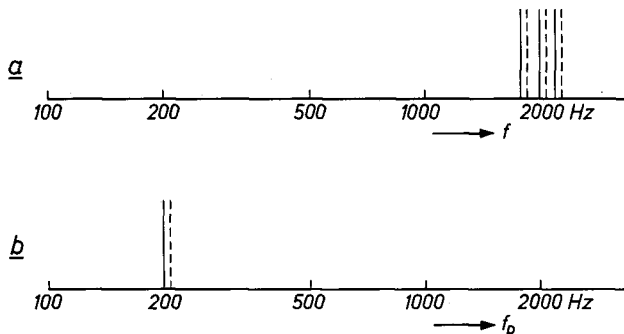


Fig. 5. Bij equidistante verschuiving van een complex (a) blijft de residutoonhoogte (dit is de in (b) uitgezette frequentie f_p van een even hoog klinkende sinustoon) niet constant, maar verandert evenredig met de middelste frequentie f van de component van het complex.

De toonhoogte van een complex van drie componenten

Het eenvoudigste complex waaraan het residu-effect kan worden waargenomen, bestaat uit drie sinustrillingen met gelijk onderling frequentieverschil. Afgezien van de luidheid en de onderlinge sterkteverhouding, die we beide even buiten beschouwing laten, kan men zo'n complex beschrijven met slechts twee parameters, de frequentie f van de middelste component en het frequentieverschil g . Proeven van het zojuist beschreven type hebben geleerd dat variatie van f bij constante g (equidistante verschuiving) de toonhoogte f_p evenredig met f doet veranderen⁸⁾. Dit wil echter niet zeggen dat bij toenemende f de toonhoogte voort-

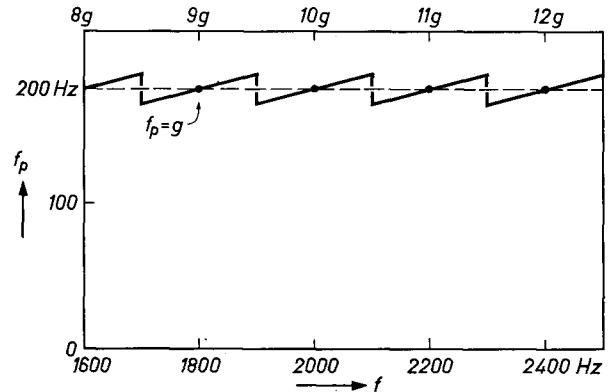


Fig. 6. Bij equidistante verschuiving van een complex van drie componenten (frequentie van de middelste f , frequentieverschil g) blijft f_p niet onbeperkt met f toenemen. Als f de afstand naar een volgend veelvoud van g ongeveer halverwege heeft afgelegd, maakt f_p een sprong zodat bij het bereiken van dat veelvoud f_p weer gelijk is aan g .

durend stijgt. Gaat men uit van een complex dat b.v., evenals in het boven beschreven experiment, uit een 9e, 10e en 11e harmonische bestaat ($f = 10g$), dan springt bij $f \approx 10,5g$ de toonhoogte omlaag⁹⁾. Bij verdere stijging van f stijgt f_p weer, om bij $f = 11g$ opnieuw de waarde g te bereiken. Aanvankelijk is $f_p = f/10$, na de sprong $f/11$ enz. Het verloop van f_p met f heeft dus het karakter van een zaagtand; de toonhoogte correspondeert slechts dan met het frequentieverschil ($f_p = g$) als f een geheel veelvoud van g is (fig. 6).

Men kan de evenredigheid tussen f_p en f op de volgende wijze verklaren uit de fijnstructuur van het akoestische signaal. Deze zag er bij onze proeven uit als geschetst is in fig. 7. Er is een trilling met frequentie f (de getrokken lijn) waarvan de amplitude met een diepte van 100% gemoduleerd wordt met de frequentie g (streeplijn); op deze wijze werd het

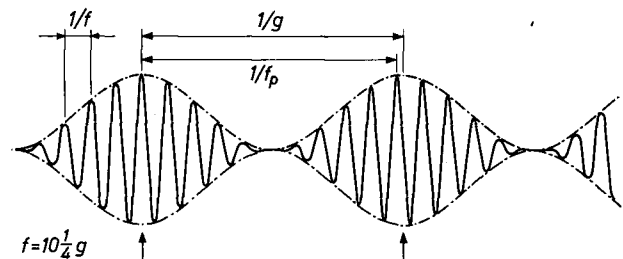


Fig. 7. Ter verklaring van het verschijnsel dat, bij equidistante verschuiving van een complex van drie componenten, de residutoonhoogte f_p evenredig varieert met de centrale frequentie f . Het geluidssignaal wordt voorgesteld door de getrokken lijn (sinustrilling met frequentie f , voor 100% gemoduleerd met frequentie g). Het oor leidt de toonhoogte weliswaar af uit de periodiciteit van het signaal, maar in die zin dat het als zodanig beschouwt de afstand van de pieken die binnen iedere periode $1/g$ het dichtst bij de toppen (zie pijltjes) van de streeplijn liggen. Deze afstand is uiteraard een veelvoud van de afstand $1/f$. Indien niet f tevens een veelvoud van g is (anharmonisch complex), verschilt f_p dus van g .

⁸⁾ J. F. Schouten, R. J. Ritsma en B. Lopes Cardozo, Pitch of the residue, J. Acoust. Soc. Amer. 34, 1418-1424, 1962 (no. 9 II).

signaal trouwens ook verkregen. Blijkbaar correspondeert nu de waargenomen toonhoogte met de periodiciteit van de amplitudemodulatie, met dien verstande dat het gehoor die afleidt uit de afstand van de pieken die het dichtst bij de toppen van de streeplijn liggen ⁹⁾. Deze afstand is uiteraard evenredig met de afstand $1/f$. In formule: $1/f_p = n/f$. Neemt f zover toe dat de afstand $1/g$ van de genoemde toppen beter benaderd wordt door op een naburige piek over te gaan, d.w.z. voor n een getal te kiezen dat één groter is, dan verspringt de toonhoogte. Deze redenering verklaart ook dat $f_p = g$ is wanneer f een geheel veelvoud van g is.

Het bovenstaande leidt tot de conclusie dat het orgaan dat de toonhoogte van complexe geluiden vaststelt, zich niet in het

mechanische deel van het oor bevindt, maar van neurale aard is; het moet zich bevinden in de gehoorzenuw of de hersenen. Blijkbaar is het niet zozeer een spectrograaf als wel een soort tijdmeter die de fijnstructuur van het signaal analyseert ¹⁰⁾.

Tot slot van dit hoofdstuk zij erop gewezen dat het residu-effect niet bij iedere willekeurige combinatie van frequenties optreedt ¹¹⁾. In fig. 8 zijn de grenzen van het zg. existentiegebied van het residu-effect voor een complex van drie componenten grafisch aangegeven. Langs de abscis is hier de frequentie f uitgezet, langs de ordinaat het quotient n van f en g . De hellende rechten zijn lijnen van constante g . We beschouwen voorlopig alleen de getrokken kromme $M = 100\%$. Bij de combinaties van f - en n -waarden

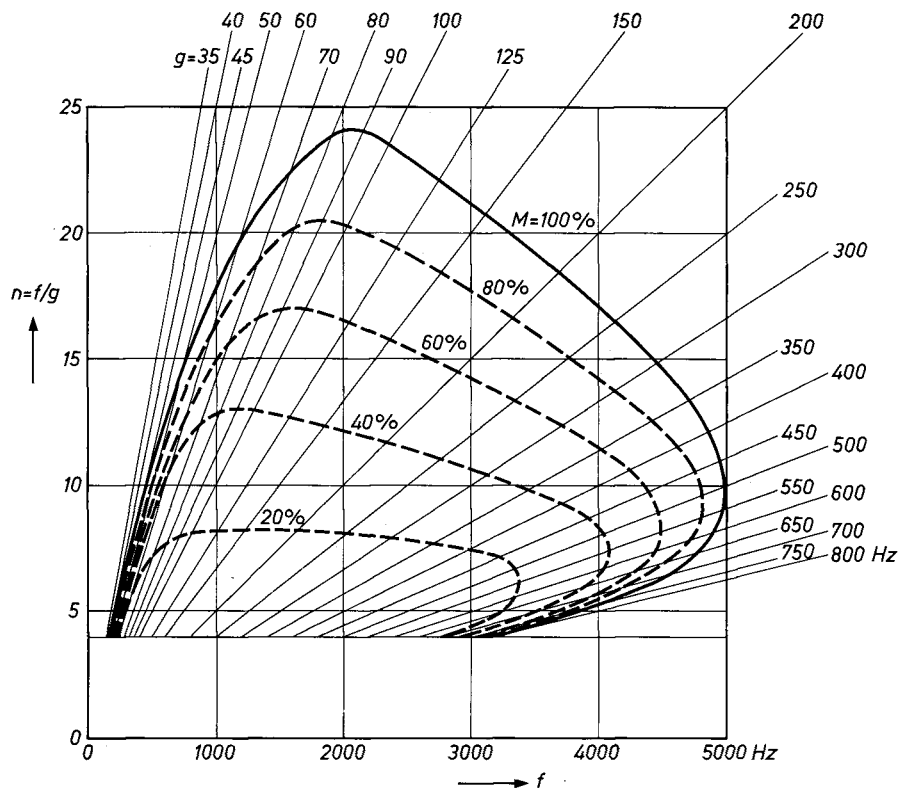


Fig. 8. Existentiegebied van de residu-tone van een complex van drie naburige harmonischen (frequentie van de middelste f , grondfrequentie g): de residu-tone wordt waargenomen in het gebied binnen de getrokken kromme. Maakt men de twee buitenste componenten zwakker (experimenteel: door de trilling f niet tot een diepte $M = 100\%$ te moduleren, maar minder diep), dan wordt het existentiegebied kleiner.

waarvan de grafische voorstelling binnen het door deze kromme omsloten gebied valt, is een residu-tone waarneembaar; daarbuiten niet. Hoewel de vorm van de curve wat de details betreft niet voor alle personen dezelfde is, geldt toch wel algemeen dat de hoogste f -waarde optreedt bij een n van ruim tien, en de grootste n -waarde bij $f = 2000$ tot 3000 Hz. De laagste g — d.i. dus tevens ongeveer de laagste f_p — is ongeveer 35 Hz, de hoogste ruwweg 800 Hz.

Experimenteert men met een qua frequenties identiek complex waarbij de componenten met de frequenties $(f-g)$ en $(f+g)$ minder sterk zijn, dan is het existentiegebied kleiner. Het trillingspatroon van zo'n complex is in principe gelijk aan dat van fig. 7, met dien verstande dat de modulatie diepte M kleiner is dan 100% . De streeplijnen in fig. 8 geven de grens van het existentiegebied voor de bijgeschreven waarden van M . Het kleiner worden van het existentiegebied met afnemende M verklaart waarom men de residu-tone op zeker ogenblik hoort verdwijnen wanneer men van een complex van drie componenten de twee buitenste in sterkte laat afnemen.

⁹⁾ Vgl. ook E. de Boer, On the „residue” in hearing, diss. Amsterdam, 1956.

¹⁰⁾ R. J. Ritsma, A model of human pitch-extraction based on additive correlation, Proc. 4th int. Congr. Acoust. I, Kopenhagen 1962, ter perse.

¹¹⁾ R. J. Ritsma, Existence region of the tonal residue I, J. Acoust. Soc. Amer. 34, 1224-1229, 1962 (no. 9 I).

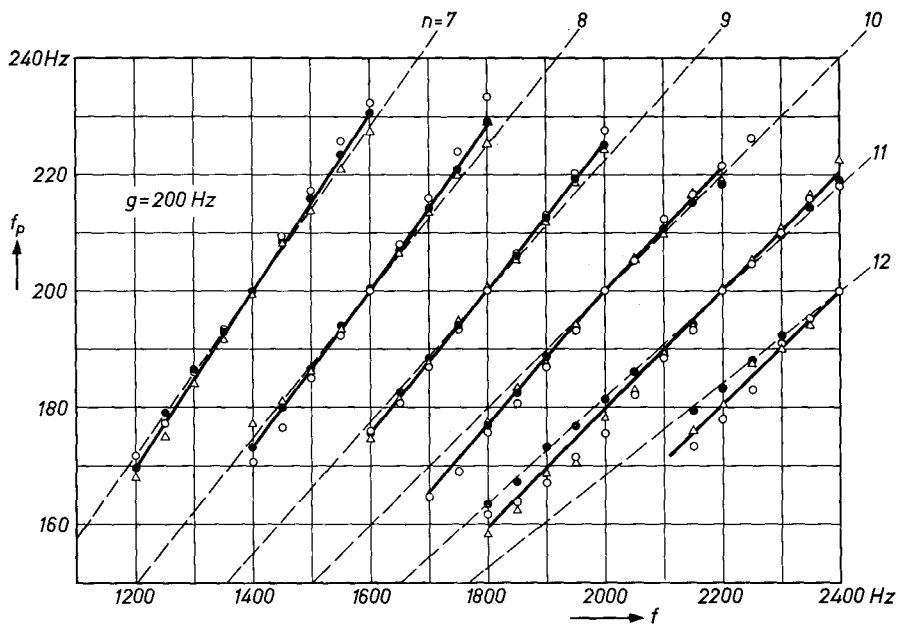


Fig. 9. Het veranderen van de toonhoogte f_p van een complex van drie componenten bij variërende centrale frequentie f kan, indien men zich daarop concentreert, nog enige tijd worden gevolgd voorbij de frequentie waarbij voor een argeloze luisteraar f_p een sprong maakt (vgl. fig. 6). Dit betekent dat de toonhoogte van zo'n complex niet ondubbelzinnig vastligt. In het geval waarop de grafiek betrekking heeft, kan men bij $f = 1800$ Hz aan het complex niet minder dan vier toonhoogten toekennen. (Volgens de hypothese omtrent het verloop van f_p met f (zie fig. 7) zou de verandering in f_p exact gelijk moeten zijn aan het n -de deel van die in f , en zouden de curven samenvallen met de streeplijnen. Zoals men ziet, is er een kleine systematische afwijking; een verklaring hiervoor is nog niet gevonden.)

De variatie van f_p met f bij equidistante verschuiving van een complex van drie sinustrillingen behoeft niet altijd te verlopen als geschetst is in fig. 6. Een proefpersoon die zich op het veranderen van de residutoonhoogte concentreert, kan de sprong in f_p uitstellen⁸⁾. In fig. 9 vindt men enige metingen hieromtrent in grafiek gebracht. Men ziet dat de frequentiegebieden waarvoor de diverse f_p - f -curven gelden, elkaar zover overlappen dat bij b.v. $f = 1800$ Hz aan f_p niet minder dan vier waarden kunnen worden toegekend. De toonhoogte die het menselijk gehoor aan een bepaald geluid toekent, wordt dus niet in alle gevallen ondubbelzinnig door de fysische parameters van het geluid bepaald. Men noemt dit de ambivalentie van toonhoogtegebaarwording.

Luistert men daarentegen argeloos naar een dergelijk complex dat equidistant verschoven wordt van b.v. $f = 10g$ tot $f = 11g$, en vergelijkt men de waargenomen toonhoogte niet geregeld met die van een referentietoon, dan maakt men de sprong, blijkens onze ervaring, onbewust. Men meent een toon te horen die voortdurend stijgt maar constateert na afloop van het experiment tot zijn verbazing dat f_p evenzeer gelijk is aan g als aan het begin.

Zoals men uit fig. 9 kan aflezen, is de verandering in f_p niet precies gelijk aan het n -de deel van die in f . De grootte van de afwijking blijkt af te hangen van de luidheid. Onderzoek omtrent de oorzaak van dit effect is nog gaande.

De toonhoogte van kortdurende geluiden

Tot nu toe hebben we alleen gesproken over geluiden die relatief lang aangehouden worden. Thans willen we iets zeggen over kortdurende geluiden.

Na de bovenstaande uiteenzettingen over de residutoonhoogte van een complex van drie componenten en de met f evenredige variatie daarvan bij equidistante verschuiving, ligt de vraag voor de hand hoeveel perioden $1/g$ het gehoor nodig heeft om de residutoonhoogte vast te stellen. Onderzoek in dit

instituut heeft geleerd dat dit er voor residutoonhoogten met f_p tussen 200 en 475 Hz steeds vier zijn. Bij een g -waarde van b.v. 200 Hz is dus blijkbaar het gehoor in staat om in 20 ms de toonhoogte vrij nauwkeurig vast te stellen.

Is bij het toekennen van een toonhoogte aan een residutoon het aantal perioden $1/g$ de bepalende factor, bij sinustonen is het de tijdsduur van de stoot. Een relatief lange stoot waardeert men duidelijk als toon. Wordt de duur verkort, dan verandert er aanvankelijk nauwelijks iets, maar bij een bepaalde kritieke waarde begint het geluid van karakter te veranderen: het gaat geleidelijk over van een toon

Va

in een tik. Metingen omtrent de toonhoogtegebaarwording van kort durende stoten kan men het beste doen door de proefpersoon twee even lange stoten van verschillende frequentie kort na elkaar aan te bieden. Men begint met een zeer klein frequentieverschil en laat dit geleidelijk groter worden. Men gaat daarbij na bij welk frequentieverschil de proefpersoon de beide „tonen” juist niet meer als even hoog beschouwt.

Vb

De resultaten van een dergelijk in dit instituut uitgevoerd onderzoek vindt men samengevat in fig. 10. Het betrof hier stoten van een sinustrilling van 1000 Hz waarvan het begin en einde ieder samenvielen met een nuldoorgang van de trilling¹²⁾. De grootte Δf is het zojuist genoemde kritische frequentieverschil en Δt is de duur van de stoot.

¹²⁾ B. Lopes Cardozo, Frequency discrimination of the human ear, Proc. 4th int. Congr. Acoust. I, Kopenhagen 1962, ter perse.

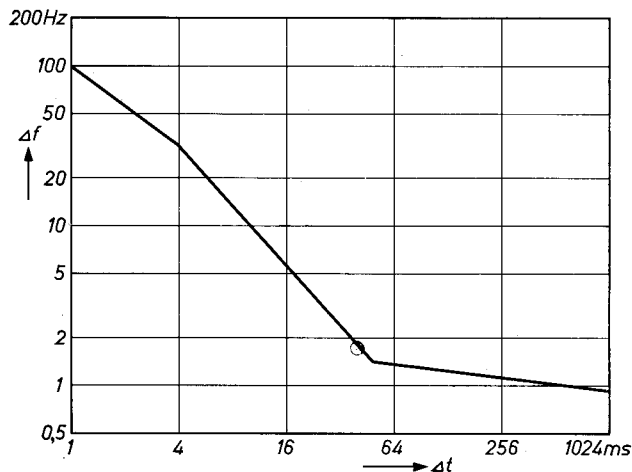


Fig. 10. De duidelijkheid waarmee men een korte sinusstoot als toon ervaart, hangt af van de duur Δt van de stoot. Laat men Δt afnemen, dan wordt de luisteraar steeds onzekerder omtrent de aan het geluid toe te kennen toonhoogte. De grafiek toont het resultaat van metingen waarbij de proefpersoon steeds twee toonstoten (1000 Hz) ter lengte Δt werden aangeboden, met een klein frequentieverschil dat langzaam werd opgevoerd. Langs de ordinaat is uitgezet het frequentieverschil Δf waarbij de proefpersoon de tonen juist niet meer als even hoog waardeerde.

Zoals men ziet, is Δf nagenoeg constant en zeer klein (≈ 1 Hz) zolang Δt langer is dan 50 ms. Verkort men Δt nog verder, dan neemt Δf toe, maar niet bijzonder sterk. Bij $\Delta t = 2$ ms is Δf nog niet groter dan 50 Hz, d.i. slechts $2\frac{1}{2}\%$ van f . Het menselijk gehoor is dus bij sinustrillingen — trillingen waarbij de periodiciteit identiek is met de reciproke frequentie — blijkbaar in staat een frequentieverschil van enkele procenten in enkele milliseconden vast te stellen. Men kan de grafiek van fig. 10 voor $\Delta t < 50$ ms met goede benadering beschrijven door de vergelijking $\Delta f \Delta t = \text{constant}$. De constante, die van persoon tot persoon wat verschilt, is van de orde van grootte van 0,1.

Tot slot nog enkele opmerkingen over grilliger klankcomplexen dan de besproken groepen van drie trillingen en over geluiden die na de inzet snel van karakter veranderen.

Wat betreft de stationaire harmonische complexen met méér dan drie componenten, kan gezegd worden dat de eigenschappen daarvan dikwijls kunnen worden afgeleid uit de vermelde eigenschappen van de besproken complexen van drie. Complexen waarvan de componenten niet equidistant zijn, zijn nog niet onderzocht.

Ook voor geluiden die na de inzet snel veranderen, vertoont onze kennis nog leemten. De grote betekenis van het inzeteffect ten spijt — een pianotoon die van zijn inzet is ontdaan, is als zodanig nauwelijks herkenbaar¹³⁾ —, is dit effect voor muziekinstrumenten nog niet uitvoerig bestudeerd. Wel wordt intensief onderzoek verricht aan de menselijke stem. Dit onderzoek moet echter in hoofdzaak gerekend worden tot de fonetiek.

Voorbeelden van de experimenten die in dit artikel met Romeinse cijfers (I t/m V) in de marge zijn aangeduid, zijn vastgelegd op een door het I.P.O. gemaakte grammofoonplaat¹⁴⁾. Met behulp van deze plaat kan de lezer de besproken eigenschappen van de toonhoogtegebaarwording zelf waarnemen.

¹³⁾ Vgl. b.v. de geluidsvoorbeelden bij het artikel: H. Badings en J. W. de Bruyn, Elektronische muziek, Philips techn. T. 19, 269-279, 1957.

¹⁴⁾ Men kan deze grammofoonplaat (die behalve de geluidsvoorbeelden toelichtingen in de Engelse taal bevat) gratis verkrijgen door inzending van de bon die zich aan het inlegvel met korte samenvattingen in dit nummer bevindt.

Samenvatting. Het welbekende verband tussen frequentie en toonhoogte van sinustonen geldt in vele gevallen niet voor complexe geluiden: een groep van drie (of meer) naburige harmonischen (frequenties $f-g$, f en $f+g$) heeft in een groot gebied van f, g -combinaties dezelfde toonhoogte als de grondtoon (residu-effect). Uit maskeringsproeven met ruis en uit het feit dat de toonhoogte verandert als men de drie componenten bij constante g in frequentie verschuift, blijkt dat de residutoon niet in het mechanische deel van het oor ontstaat maar van neurale oorsprong is. Uit de laatstgenoemde proeven blijkt verder dat de toonhoogte niet precies correspondeert met de periodiciteit van de omhullende van het signaal (frequentie g) maar wordt afgeleid uit de fijnstructuur ervan. Bij een korte stoot wordt de residutoonhoogte reeds gehoord als de stoot vier perioden $1/g$ lang is. Bij een sinusstoot is de duur de bepalende grootheid.