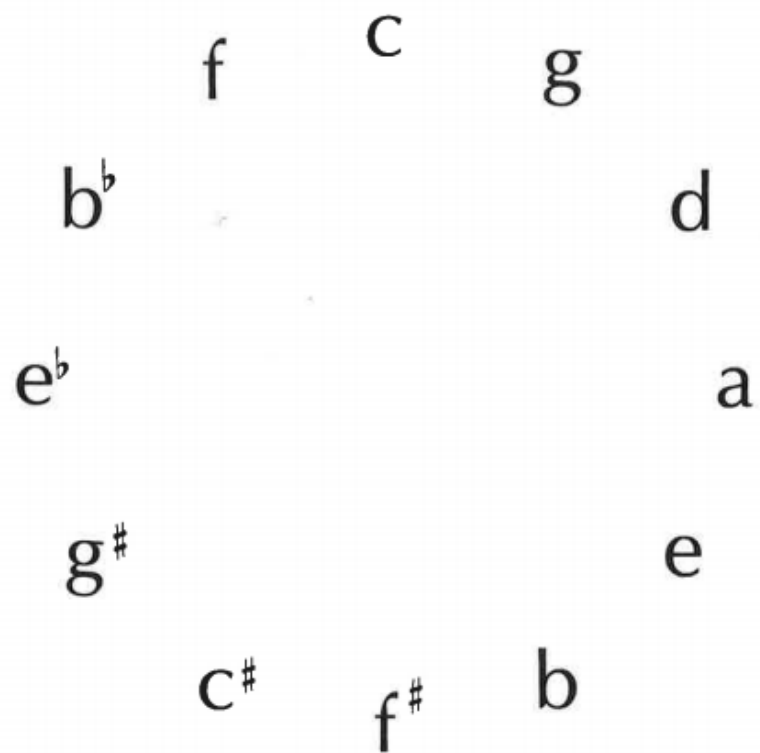


The Perception of Pure and Tempered Musical Intervals



Joos Vos

De waarneming van zuivere en ontstemde muzikale intervallen

Samenvatting

Zuivere intervallen worden gekenmerkt door een eenvoudige verhouding, $p:q$, tussen de grondfrequenties f_1 en f_2 van respectievelijk de laagste en de hoogste toon, zoals bijvoorbeeld 1:2 voor het octaaf, 2:3 voor de kwint en 4:5 voor de grote tert. Als twee gelijktijdig klinkende tonen, elk samengesteld uit een grondtoon en een serie harmonischen (boventonen), samen zo'n zuiver interval vormen, vallen bepaalde harmonischen van de hoogste toon [die met een frequentie van npf_2 Hz ($n=1, 2, \dots$)] samen met harmonischen van de laagste toon [die met een frequentie van mqf_1 Hz]. Voor de zuivere kwint, bijvoorbeeld, is de frequentie van de tweede (p -de) harmonische van de hoogste toon gelijk aan die van de derde (q -de) harmonische van de laagste toon.

Bij onzuivere (of: ontstemde of getemperde) intervallen wijkt de verhouding $f_1:f_2$ iets af van $p:q$, waardoor ook de frequenties van de zojuist genoemde harmonischen iets van elkaar verschillen. De interferentie van deze bijna samenvallende harmonischen leidt tot variaties in de omhullende van de tonen in het ontstemde interval. De diepte van deze omhullendevariatie wordt bepaald door de amplitudes van de interfererende harmonischen: als de amplitudes even groot zijn kunnen ze elkaar afwisselend volledig versterken en volledig uitdoven, zodat de diepte van de omhullendevariatie maximaal is; als de amplitude van de ene harmonische veel sterker is dan die van de andere, is het verschil tussen versterking en verzwakking, en dus de diepte van de omhullendevariatie, gering. De frequentie van de omhullendevariatie is voor het n -de paar van interfererende harmonischen gelijk aan $|npf_2 - mqf_1|$ Hz.

Voor de luisteraar leidt de omhullendevariatie tot de waarneming van zwevingen of ruwheid. De zwevingssterkte neemt toe met de diepte van de omhullendevariatie, terwijl in de meeste gevallen een zwevingsfrequentie van $|pf_2 - qf_1|$ Hz in de waarneming zal overheersen. Naast zwevingen kan de met de ontstemming gepaard gaande verandering in de grootte van het interval worden opgemerkt. Bij niet-gelijktijdige tonen is dit zelfs het enige houvast voor het ontdekken van onzuiverheid.

In een muzikale context kunnen zowel de zwevingen of ruwheid, als de gewijzigde intervalgrootte van invloed zijn op de mate waarin deze ontstemde intervallen als onzuiver of vals worden ervaren. Bij het stemmen van toets-

instrumenten zoals bijvoorbeeld het orgel, het clavecimbel en de piano, is het onvermijdelijk dat er op z'n minst bij enkele intervallen onzuiverheden worden aangebracht. De keuze welke intervallen in welke mate ontstemd moeten worden hangt af van vele factoren, waaronder de muziek die moet worden gespeeld en het instrument dat daarvoor zal worden gebruikt. In de muziekgeschiedenis zijn dan ook vele stemmingsystemen voorgesteld.

De vraag die centraal staat in het hier beschreven onderzoek is hoe belangrijk de verschillen tussen deze stemmingsystemen nu eigenlijk voor de luisteraar zijn. Voor de discussie en de beoordeling van deze stemmingsystemen is het van belang te weten hoe gevoelig men voor ontstemming is. In de hoofdstukken 2, 3, 4 en 5 van deze studie gingen we allereerst na hoe goed men de zuivere intervallen kan onderscheiden van de ontstemde intervallen. We hebben ons hoofdzakelijk gericht op de zojuist beschreven intervallen met gelijktijdige samengestelde tonen, omdat de in het algemeen kleine verschillen tussen de stemmingsystemen bij deze intervallen nog het meest merkbaar zullen zijn. Tenzij anders vermeld, gebruikten we steeds tonen met 20 opeenvolgende harmonischen waarvan het geluidniveau gelijkmatig afnam met 6 dB per octaaf. Een dergelijke spectrale samenstelling lijkt op dat van tonen die door middel van een strijkstok in het lagere register van snaarinstrumenten ten gehore worden gebracht. In de experimenten werd de diepte van de omhullendevariatie gevarieerd door het aanbrengen van verschillen in het geluidniveau tussen de twee tonen. De onderscheidingsdrempel werd uitgedrukt in dit verschil of rechtstreeks in de diepte van de omhullendevariatie. De mate van ontstemming was een van de onafhankelijke variabelen en werd uitgedrukt in de eerder genoemde zwevingsfrequentie of in cents (de grootte van een octaaf is 1200 cents). De experimenten waarin de onderscheidingsdrempels werden bepaald werden aangevuld met onderzoek waarin zuivere en ontstemde intervallen werden beoordeeld: In hoofdstuk 6 onderzochten we het verband tussen ontstemming en subjectieve zuiverheid, en in hoofdstuk 7 bestudeerden we de subjectieve aanvaardbaarheid van stemmingsystemen in tweestemmige muziekfragmenten. Aan de experimenten namen uitsluitend muzikaal geschoolde proefpersonen deel.

In hoofdstuk 2 werd gevonden dat de onderscheidingsdrempel voor de zuiverheid van kwinten lager was dan voor grote tertsen (een lage drempel wil zeggen dat reeds een kleine diepte van de omhullendevariatie voldoende is voor het waarnemen van een verschil tussen een zuiver en een iets ontstemd interval; een lage drempel betekent dus een grote gevoeligheid voor ontstemming). In het algemeen was de onderscheidingsdrempel relatief hoog voor ontstemmingen tot ongeveer + 4 cents. Voor ontstemmingen tot ongeveer + 16

cents werd de drempel lager naarmate de toonduur (0.25, 0.5 en 1 s) toenam. Voor ontstemmingen groter dan 32 cents en kleiner dan -32 cents waren de drempels voor de drie onderzochte toonduren ongeveer even laag. Aangezien het aantal zwevingen bij een langere toonduur groter is dan bij een kortere toonduur, leken de zwevingen bij deze grotere ontstemmingen niet meer van belang te zijn en zou het onderscheidingsvermogen op de waarneming van verschillen in intervalgrootte gebaseerd kunnen zijn. Uit een vergelijking van zwevingsdrempels en drempels voor het benoemen van de richting van de ontstemming (in termen van groter of kleiner dan het zuivere interval) met de onderscheidingsdrempel bleek echter dat ook bij grotere ontstemmingen de gevoeligheid voor zwevingen in de meeste condities bepalend voor de onderscheidingsdrempel is geweest.

In hoofdstuk 3 onderzochten we tot op welke hoogte de in hoofdstuk 2 verkregen onderscheidingsdrempels werkelijk door de interferentie van de bijna samenvallende harmonischen zijn bepaald. Hiertoe varieerden we de spectrale inhoud van de hoogste toon. De resultaten lieten zien dat voor ontstemmingen tot $+ 30$ cents de drempels voor de kwinten grotendeels door de interferentie van het eerste paar ($n=1$) bijna samenvallende harmonischen is bepaald. Bij grote tertsen was de interferentie van andere harmonischen echter ook van belang.

In hoofdstuk 3 beschrijven we verder een experiment waarin we in bovengenoemde condities (beide tonen ongeveer even luid) voor maximaal tot $+ 12$ cents ontstemde kwinten en grote tertsen de frequentie en de sterkte van de duidelijkst waargenomen zwevingen bepaalden. Dit deden we door proefpersonen deze zwevingen met behulp van twee sinustonen te laten nabootsen. Zij konden de zwevingsfrequentie aanpassen door de frequentie van een van de sinustonen te veranderen. De zwevingssterkte kon gevarieerd worden door het geluidniveau van deze sinustoon te wijzigen. Naast muzikaal interval waren het spectrum van de hoogste toon en de mate van ontstemming weer de onafhankelijke variabelen. In alle onderzochte spectrale condities bleken zowel voor de kwint als de grote terts de zwevingen met een frequentie van $|pf_2 - qf_1|$ Hz duidelijker te worden waargenomen dan veelvoudigen van deze frequentie. Verder vergeleken we de waargenomen zwevingssterkte en de onderscheidingsdrempel uit overeenkomstige spectrale condities met elkaar. Uit deze vergelijking bleek dat vooral bij de kwint de waargenomen zwevingssterkte en het onderscheidingsvermogen een duidelijk verband vertonen.

In de drie experimenten die in hoofdstuk 4 worden gerapporteerd, werd de onderscheidingsdrempel in ieder experiment bepaald voor 13 intervallen met

verschillende waarden van p en/of q . Uit de resultaten bleek dat er een eenvoudige relatie bestaat tussen de complexiteit van de frequentieverhouding en het onderscheidingsvermogen. Dit vermogen nam geleidelijk af met de som van p en q . In de door ons gebruikte samengestelde tonen zijn de hogere harmonischen zwakker dan de lagere harmonischen. Uit het experiment waarin alle harmonischen in de gebruikte tonen even sterk waren, bleek dat het geluidniveau van de interfererende harmonischen niet voor de gevonden relatie verantwoordelijk was. Het derde experiment, waarin het spectrum van de tonen werd gevarieerd, liet duidelijk zien dat de drempel voor alle 13 intervallen door de interferentie tussen bijna samenvallende harmonischen werd bepaald. Voor intervallen die bestaan uit tonen met een volledige serie harmonischen zou de onderscheidingsdrempel daarom in de diepte van de omhullende variatie uitgedrukt moeten worden. Een verdere analyse van de resultaten bracht aan het licht dat het verband tussen de complexiteit van de frequentieverhouding en de drempel waarschijnlijk het gevolg is van maskering van de interferentie tussen de bijna samenvallende harmonischen door met name de dichtstbijgelegen lagere harmonische.

In de experimenten die in de hoofdstukken 2, 3 en 4 worden beschreven, werd de onderscheidingsdrempel slechts voor een beperkt frequentiegebied bepaald. Bij de kwinten en de grote tertsen, bijvoorbeeld, lagen f_1 en f_2 tot nu toe altijd tussen de "c" van het ééngestreept (C4 = 261.6 Hz) en het tweegestreept octaaf (C5). In hoofdstuk 5 gingen we na in hoeverre eerdere bevindingen ook geldig zijn voor het veel grotere frequentiebereik tussen C2 en C6. De resultaten lieten zien dat als de ontstemming uitgedrukt wordt in de zwevingsfrequentie, de onderscheidingsdrempel niet afhangt van de grondfrequenties van de tonen. Als de ontstemming wordt uitgedrukt in cents en we ons alleen richten op die condities waarin de mate van ontstemming gelijk is aan de in de belangrijkste stemmingsystemen voorkomende ontstemming, blijken de waarneembare verschillen tussen ontstemde en zuivere kwinten in toenemende mate onbelangrijk te zijn voor tonen met een grondfrequentie lager dan ongeveer C4. Voor tonen vanaf ongeveer C3 en hoger kunnen ontstemde grote tertsen onderscheiden worden van zuivere grote tertsen. Dit geldt zelfs voor de tertsen uit de Silbermann-stemming, die slechts 5.9 cents te groot zijn.

In hoofdstuk 6 bepaalden we de relatie tussen ontstemming en subjectieve zuiverheid voor kwinten en grote tertsen. Deze intervallen, die ook nu weer uit de eerder genoemde samengestelde tonen bestonden, werden geïsoleerd, d.w.z. in een niet-muzikale context, aangeboden. De beoordeling van de zuiverheid geschiedde m.b.v. een 10-puntsschaal en d.m.v. paarsgewijze verge-

lijkingen. Voor zowel de kwinten als de grote tertsen bleek dat de relatie tussen ontstemming en subjectieve zuiverheid door exponentiële functies kon worden beschreven. Kwinten met ontstemmingen tussen ongeveer -20 en +15 cents werden als zuiverder beoordeeld dan de in dezelfde mate ontstemde grote tertsen. Voor grotere ontstemmingen werden de grote tertsen iets zuiverder gevonden dan de kwinten. Dit was het duidelijkst bij de vergrote intervallen. Hogere zuiverheidsbeoordelingen werden verkregen wanneer de interferentie tussen op zijn minst de bijna samervallende harmonischen onmogelijk werd gemaakt, hetgeen bereikt werd door de even harmonischen van de hoogste toon te verwijderen. Deze verhoging was het sterkst bij de grote tertsen. Wanneer alle hogere harmonischen uit het spectrum werden verwijderd en de intervallen dus alleen uit twee gelijktijdige sinustonen bestonden, bleken de subjectieve verschillen tussen zuivere en ontstemde intervallen veel kleiner te zijn dan voor samengestelde tonen.

De grote verschillen in zuiverheidsbeoordelingen tussen de uit samengestelde tonen bestaande zuivere en ontstemde intervallen, kunnen grotendeels aan de aanwezigheid van zwevingen of ruwheid worden toegeschreven. Aangezien de bestaande modellen voor tonale consonantie/dissonantie ook op de waarneming van zwevingen en ruwheid zijn gebaseerd, hebben we de zuiverheidsbeoordelingen vergeleken met de dissonantie die voor de in onze experimenten gebruikte intervallen wordt voorspeld. De door het model van Plomp en Levelt (1965) voorspelde dissonantie komt niet in alle condities overeen met de verkregen zuiverheidsbeoordelingen. De voorspellingen door het model van Kameoka en Kuriyagawa (1969) komen in geen enkele conditie overeen met de beoordeelde zuiverheid. We brachten naar voren dat het voorspellend vermogen van de twee consonantiemodellen vergroot zou kunnen worden wanneer enkele principes die ten grondslag liggen aan bijvoorbeeld het luidheidssommatiemodel van Zwicker en Scharf (1965), in de modellen zouden worden opgenomen.

In hoofdstuk 7 bestudeerden we de subjectieve aanvaardbaarheid van regelmatige 12-toons stemmingssystemen in tweestemmige muziekfragmenten. Deze fragmenten werden gespeeld volgens de Pythagoreïsche (ontstemming van de hoofdkwinten, A , is hier 0.0 cents), de gelijkzwevende ($A=-2.0$ cents), de Silbermann ($A=-3.9$ cents), de middentoon ($A=-5.4$ cents) en de Salinas stemming ($A=-7.2$ cents). In het eerste experiment werden ook nog twee stemmingen met $A=2.0$ en $A=-10.0$ cents opgenomen. De proefpersonen gaven voor ieder fragment op een 7-puntsschaal aan in hoeverre ze de uitvoering in een bepaalde stemming in zijn totaliteit bezien acceptabel vonden. Uit het eerste experiment bleek dat de gemiddelde aanvaardbaarheidsbeoordelingen van de fragmenten in de

Pythagoreïsche, gelijkzwevende, Silbermann en middentoonstemming vrijwel even hoog waren, terwijl de beoordelingen veel lager uitvielen voor $A=2.0$ en $A \leq -7.2$ cents. Dit werd bevestigd door de resultaten die voor een aantal fragmenten d.m.v. paarsgewijze vergelijkingen werden verkregen. De zojuist beschreven invloed van de verschillende stemmingsystemen op de aanvaardbaarheid was niet afhankelijk van het tempo (snel of langzaam) waarin de fragmenten werden gespeeld. In het tweede experiment werd de waarneming van zwevingen beïnvloed door in één van de twee condities de interferentie tussen op z'n minst de bijna samenvallende harmonischen onmogelijk te maken, wat werd bereikt door uit òf de laagste òf de hoogste toon van ieder interval de even harmonischen te verwijderen. Deze reductie in interferentie resulteerde in een verhoging van de aanvaardbaarheid. De aanvaardbaarheidsbeoordelingen in de verschillende stemmingen werden in verband gebracht met de in hoofdstuk 6 verkregen zuiverheidsbeoordelingen. Uitgaande van de volledige verzameling gepresenteerde muziekfragmenten, kon de aanvaardbaarheid uit zowel het eerste als het tweede experiment nauwkeurig worden voorspeld uit de som van de subjectieve zuiverheid van de uit gelijktijdige tonen bestaande kwinten en grote tertsen. De ontstemde intervallen in de gelijkzwevende stemming blijken in hun totaliteit bezien net zo acceptabel te zijn als die in de andere door ons onderzochte stemmingen met $-5.4 \leq A \leq 0.0$ cents. Dit zou kunnen verklaren waarom de gelijkzwevende stemming, die bovendien tegemoet komt aan voor de Westerse muziek van de laatste eeuwen zo belangrijke eis van onbeperkte modulatie, in de loop van de tijd algemeen is geaccepteerd.

De vruchtbaarheid van het hier beschreven onderzoek kan worden afgeleid uit de verbanden die we in een aantal fysisch verschillende condities gevonden hebben tussen de onderscheidingsdrempel voor zuivere en ontstemde intervallen, de zuiverheidsbeoordelingen van de geïsoleerd aangeboden intervallen en de aanvaardbaarheidsbeoordelingen van de in verschillende stemmingen uitgevoerde muziekfragmenten. In hoofdstuk 8 concludeerden we dat het zinvol is dit soort onderzoek voort te zetten. In dit hoofdstuk worden tevens enkele suggesties voor toekomstig onderzoek naar de waarneming van zuivere en ontstemde intervallen in een muzikale context gegeven. Een voorbeeld van zinvol geacht onderzoek is een nadere test van het in hoofdstuk 7 voorgestelde additiviteitsmodel voor het voorspellen van de aanvaardbaarheid van stemmingsystemen in meerstemmige muziekstukjes van uiteenlopend karakter.