Bedrieglijke Boventonen

De grondtoon die er niet is, maar die je wèl hoort.
Eén spectrum: drie verschillende klanken; en waarom de omvang van een buisklokkenspel nooit groter is dan anderhalf à twee octaven.

the missing fundamental
De grondtoon ontbreekt, en toch hoor je hem! Dat zou zo maar kunnen. Bijvoorbeeld als je muziek afspeelt en luistert op je laptop of op de mini multimediaspeakertjes van je desktop computer. Dat je dat allemaal prima kunt horen, terwijl het formaat van de speakertjes, mini-mini, er al op duidt dat er helemaal geen of nauwelijks laag uit kan komen.

Toch hoor je hem: de ontbrekende grondtoon, *the missing fundamental*. Hoe dat komt? De grondtoon mag dan door de filterende werking (high pass) van de minispeakertjes zijn verwijderd, de hogere boventonen worden wèl weergegeven.

Bij klanken van blaas- en snaarinstrumenten betreft dat *harmonische* boventonen. Frequenties die een geheel veelvoud zijn van de grondtoonfrequentie. Door deze harmonische relatie vallen op bepaalde momenten de startpunten van deze sinustrillingen samen.

Laten we het onderstaande voorbeeld nemen van twee frequenties in de verhouding van 2 staat tot 3. Een kwintinterval dus. Het wordt wat inzichtelijker als we deze frequentieverhouding omlaag transponeren naar het tijddomein. We hebben dan deze twee tegelijkertijd klinkende frequenties, een *kwintinterval*, getransformeerd naar een ritme: *2 tegen 3* om precies te zijn zoals hieronder schematisch weergegeven:

```
(3)  x         x         x         x    (rechts)

(2)  x              x              x    (links)

(P)  x                             x    (r & l)
```

Van links naar rechts stelt de tijdas voor. De bovenste regel laat zien dat er drie gebeurtenissen (x) in dezelfde tijd gaan als twee ervan op de middelste regel. De onderste regel geeft aan waar beide samen komen.

Waar deze beide samen vallen ontstaat een nieuwe regelmaat, een nieuwe periodiciteit. Deze vind je op de *grootst gemene deler* (GGD) van de samenklinkende periodiciteiten (Jan Schouten, 1939). In dit geval van de verhouding 2 staat tot 3 wordt dat dus een 1. Als je dit ritme met beide handen speelt ontstaat die nieuwe periodiciteit waar beide handen samen tegelijkertijd een slagbeweging maken.

In het toonhoogtedomein wordt dit *periodiciteitstoonhoogte*, *virtual pitch*, *missing fundamental* of *resuduetoonhoogte* genoemd. Terug naar het klinkende voorbeeld van het kwintinterval: de virtuele toonhoogte-ervaring zal nu één octaaf lager zijn dan de laagste toon van de kwintsamenklank.

Mis-Fundament
Laad *Mis-Fundament*. In deze patch hoor je 8 diverse voorbeelden van virtual pitch, missing fundamental etc. Alle voorbeeldklanken zijn additief opgebouwd uit vier samenstellende frequenties die worden opgewekt met *4 OscC*'s. Deze worden in een mixermodule, *Mix4-1B*, gemend.

Als extra is er nog een vijfde oscillator *Osc-C* op de mixer aangesloten die je kunt gebruiken als referentie om te vergelijken. De samengevoegde oscillatorsignalen gaan naar een *FiltNord*-module in Low Pass mode. Dit filter wordt gestuurd door een decaying envelope, *EnvADR*. Dit simuleert een aangeslagen klank: Na de aanslag wordt de filterfrequentie omlaag gemoduleerd door de envelope output, met als resultaat dat eerst de hogere boventonen verdwijnen en de later de lagere.

Variaties 1 t/m 5 laten achtereenvolgens de missing fundamental horen opgebouwd uit respectievelijk steeds hogere opeenvolgende deelfrequentieverhoudingen.

Variations 6 en 7 geven voorbeelden van de missing fundamental opgebouwd uit slechts oneven harmonischen. Het laatste voorbeeld, *variation 8* laat horen dat de missing fundamental ook ontstaat zelfs als de samenstellende frequenties *quasi*-harmonisch zijn: de frequentieverhoudingen zijn een benadering van 2, 3, 4 en 5 (*1.9946, 2.9966, 4.0254 en 5.0397*).

Onze waarneming is kennelijk op zoek naar (bij benadering) harmonische frequentierelaties. Klanken opgebouwd uit (quasi)harmonischen resulteren in *fusion*, een ondeelbare identiteit met ondubbelzinnige toonhoogte, zoals dat het geval is met klanken van blaas- en snaarinstrumenten.

Aangeslagen buizen en staven: één spectrum, drie verschillende klanken, drie onderscheiden toonhoogtes!?
Het spectrum van een aangeslagen buis of staaf, de eerste zeven resonantiefrequenties: 1, 2.76, 5.40, 8.93, 13.34, 18.64, 31.87. Deze frequentieverhoudingen lijken op zich nogal willekeurig. Laad patch *Tube-Bar-Spectrum* en luister naar deze optelsom van frequenties.

Speel deze patch over minimaal vier octaven chromatisch omhoog en omlaag en verbaas je over wat er gebeurt met de toonhoogte- en timbrewaarneming. Klanken die een soort van metafoor zijn voor de afbeelding met dubbelzinnige visuele informatie: wat zie je: een oude heks of een jong meisje? Een soort klankkameleon lijkt het wel. Over de gehele omvang hoor je geen consistente toonhoogte en stabiel timbre. *Kameleontofoon* zou een aardige benaming zijn voor deze patch.

Deze klanksimulatie is echter een natuurgetrouwe weergave van de eigenfrequenties van een aangeslagen staaf of buis met vrije uiteinden. Het enige verschil met de werkelijkheid is dat in deze synthese alle frequenties dezelfde amplitude vertonen. Bij het echte buisklokkenspel of staafspel hangt dat samen met de lengte van de staaf of buis en de toegepaste mallet: zacht-hard, groot-klein. Een grote zachte mallet zal voornamelijk de lage resonantiefrequenties activeren, een kleine harde mallet voornamelijk de hoger eigenfrequenties. Bij een heel lange buis zal het absolute frequentiespectrum (veel) lager liggen dan bij een heel korte buis of staaf.

Met opzet heb ik in de patch alle deeltonen dezelfde amplitude gegeven. Hierdoor wordt het des te duidelijker dat de luidheid van de deeltonen een belangrijke rol speelt in de toonhoogte- en het timbreperceptie van de klank. Kijk eens naar de afbeelding *isofonen*, dan zie je dat het gehoor het gevoeligst is voor frequenties tussen de 3000 en 4000 Hz. Dat betekent voor onze patch, dat afhankelijk van of we een hoge of lage toon spelen, bepaalde deeltonen in dit gevoeligste gebied vallen.

Voor een heel hoge toon gespeeld op onze virtuele kameleontofoon is dat de laagste eigenfreqentie de deeltoon die het luidst klink. Deze ervaren we dan ook als *'grondtoon'* en als toonhoogtebepalende.

Spelen we echter een heel lage toon op het virtuele keyboard dat zij het juist de hogere boventonen die in het gevoeligste frequentiegebied vallen.
Onderstaande tabel laat zien dat er min of meer drie verschillende waarnemingsmodellen een rol kunnen spelen, afhankelijk van welke deelfrequenties in het gevoeligste deel deel van de waarneming valt.

Eigenfrequenties van een staaf of buis met vrij trillende uiteinden

1	2.76	5.40	8.93	13.34	18.64	31.87

1) model Glockenspiel

1	2.76	5.40	8.93	13.34	18.64	31.87

Eigenfrequenties van een staaf of buis met vrij trillende uiteinden

1	2.76	5.40	8.93	13.34	18.64	31.87

2) model Ambigu

0.36	***1***	**2**	3.23	4.83	6.75	11.55

Eigenfrequenties van een staaf of buis met vrij trillende uiteinden

1	2.76	5.40	8.93	13.34	18.64	31.87

3) model Tubular Bells

0.21 0.6 ***V1*** 1.2 **2** **3** **4** **7**

Bij korte staven of buisjes zoals we die aantreffen bij de staafspelen uit het Orff schoolmuziekinstrumentarium interpreteren we de klank via het *'Glockenspielmodel'*. De laagste deeltoon fungeert als toonhoogte bepalende 'grondtoon'. De ander hogere boventonen spelen slechts een kleurende werking.

Nu het andere uiterste. Bijvoorbeeld het buisklokkenspel of de tubular bells uit het orkestinstrumentarium. De buizen zijn bij dit instrument relatief lang. De deeltonen die in het meest gevoelige frequentiegebied vallen zijn nu de partialen 4, 5, 6 en 7. Als we de frequentieverhoudingen van deze deeltonen wat nader bekijken zien we dat die *ongeveer* verhoudingen 2 : 3 : 4 : 7 vertonen. Bij benadering gehele veelvouden van een virtuele frequentie met verhoudingsgetal circa 4.5. Dat is dan ook de toonhoogte waarop we de klank ervaren (***v1***).

De andere deeltonen, nummer drie met verhoudingsgetal 5.4 ligt ongeveer een kleine terts hoger dan de virtuele grondtoon (4.5) (4.5 staat tot 5.4 is als ongeveer 5 staat tot 6, of vereenvoudigd 1 : 1.2. Deze kleine terts is een belangrijk kenmerk van de (beiaard)klokkenklank.

De tweede deeltoon uit het spectrum met verhoudigsgetal 2.76 blijkt zo ongeveer één octaaf lager te zijn dan de derde partiaal 5.40. Deze deeltoon ervaren we als de lage zoemende toon (een grote sext onder de toonhoogte bepalende) die ook in de echte klokkenklank voorkomt. Zij het dat die in de echte klok één octaaf lager is dan de *'slagtoon'*.

De laagste deelfrequentie van het buisklokkenspel is zo laag en zwak dat hij voor de waarneming is te verwaarlozen. Lang geleden bij experimenteren in het slagwerklokaal van het Rotterdams conservatorium, bleek dat je deze laagste deelfrequentie met moeite gehoormatig kon opsporen door met het oor heel dicht bij het uiteinde van de buis te luisteren.

Voor toonhoogtes gespeeld in het midden van ons virtuele toetsenbord is zowel het timbre als de toonhoogte nogal dubieus. Ik heb dit voor het gemak maar het *'Ambigumodel'* genoemd. In de patch *1Spectrum-3Timbres* zijn ter vergelijking de twee waarnemingsmodellen *Ambigu* en *Tubular Bells* zodanig getransponeerd dat de toonhoogte gelijk is met die van het *Glockenspielmodel*. Waarom de omvang van de tubular bells slechts maximaal twee octaven omvat zal nu wel duidelijk zijn. Maak je die omvang toch groter, dan zal het instrumentent zich onvermijdelijk transformeren tot *kameleontofoon*.

Ernst Bonis

Dit artikel werd eerder gepubliceerd in Interface 118 mei 2008.

Literatuur

Klank en Muziek
John Pierce
Natuur en Techniek
Maastricht 1986
ISBN 90 70 157 55 1

Science of Percussion Instruments
Thomas D. Rossing
World Scientific Publishing
Singapore 2000
ISBN 981-02-4158-5