V een virtuele FM-beiaardklok

complex FM met twee sets simple FM

De eenvoudigste vorm van complex FM is eenvoudigweg twee sets 'simple FM' bij elkaar mengen. Behalve dat dit de eenvoudigste wijze van 'complex FM' is biedt ze ook de grootste vrijheid m.b.t. de te vormen boventonen in een klank. Dat gaan we ontdekken aan de hand van een klanksimulatie van een beiaardklok.

boventoonkenmerken van de klokkenklank

Een van de eerste klokkenklanksyntheses met FM was de 'tubular bell' preset uit de Yamaha DX7. Deze klank is terug te herleiden tot een set 'simple FM' met c:m verhouding 1: 3.5. Volgens het bekende 'rekenkunstje' levert dat dan de volgende te vormen zijbanden (boventonen) op:

```
        (1+3.5=) 4.5 (+3.5=) 8 (+3.5=) 11.5 (+3.5=) 15 (+3.5=) 18.5 (+3.5=) 22
1
        (|1-3.5|=) 2.5 (+3.5=) 6 (+3.5=)  9.5 (+3.5=) 13 (+3.5=) 16.5 (+3.5=) 20
```

Alles netjes op volgorde gezet:

```
1       2.5     4.5     6       8       9.5     11.5    13      15      16.5    18.5    20
        22
```

Een spectrum met duidelijk een mengsel van enerzijds harmonische partialen (de gehele frequentie-verhoudingsgetallen) en anderzijds de niet-harmonische deelfrequenties, de (sinus)tonen met decimale getallen. Vanuit de psychoakoestiek weten we dat harmonische boventonen tenderen naar versmelting, *fusion*. De versmeltingsgraad neemt toe naarmate de (hele) verhoudingsgetallen van de samenstellende frequenties kleiner zijn en ze een aaneengesloten reeks vormen. In dit voorbeeld zullen de harmonischen in het spectrum, 1 6 8 13 15 20 22, niet echt versmelten tot een voor de waarneming hechte ondeelbare identiteit vanwege het ontbreken van de lagere harmonischen aan de ene kant en, aan de andere kant, de grote gehele verhoudingsgetallen voor de hogere boventonen. Ook het gegeven dat het geen aaneengesloten serie is draagt hier toe bij. Kortom het totaal levert een onmiskenbaar klokachtige klank, met kenmerken van versmelting: een duidelijke ondubbelzinnige toonhoogte-indruk. Maar ook met kenmerken van 'splitsing', *fission*: naast de eenduidige toonhoogte-ervaring, horen we ook nog een min of meer zelfstandige boventoon met daarbij een duidelijk waarneembare toonhoogte. Dat is in dit geval de eerste boventoon (2.5), die een grote deciem boven de grondtoon (1) ligt. Je hoort dat als een grote terts. Al met al kenmerken die we ook tegen komen bij de klank van beiaardklokken. Ook deze worden gekenmerkt door een mengsel van enerzijds (bij benadering) harmonische boventonen, en anderzijds boventonen die disharmonisch zijn.

de slagtoon

Een ander belangrijk waarnemingsaspect bij klokkenklanken is de zogenoemde slagtoon. Dat is de metaalachtige klank op het moment van de aanslag die de toonhoogte-indruk bepaalt. Opmerkelijk genoeg hoeft deze toonhoogtesensatie niet noodzakelijkerwijs overeen te komen met één van de partialen of de grondtoon. Het betreft een psychoakoestisch verschijnsel. Als we tegelijkertijd zuivere tonen, sinustonen, horen met eenvoudige, of bij benadering, harmonische frequentierelatie, zal onze waarneming een toonhoogtegewaarworing ondervinden op de groots gemene deler van deze verhoudingen. Als we nog even stil staan bij tabel 2, dan zien we dat het octaaf, de duodeciem en het trippeloctaaf, die op het moment van aanslag sterk klinken, een frequentierelatie vormen van 2 : 3 : 4. De toonhoogte die we nu ervaren is de (virtuele) 1, deze ligt dus één octaaf beneden de octaafpartiaal. Dit is dus de toonhoogte waarop we de klok ervaren.

het spectrum van een beiaardklok

Onderstaand zien we de samenstellende partialen (van 1 tot en met 40) van een klok. Een aantal klokkenpartialen hebben vaste namen gekregen, ook deze zijn in de tabel opgenomen. Daarnaast zien we de aanvangssterkte bij de aanslag en geeft de rechter kolom een indruk van de

relatieve uitklinktijden. De sterkste boventonen zijn vetgedrukt, wat uiteraard al doet vermoeden, dat deze ook het belangrijkst zijn voor de identiteit 'klok'. Tabel 2 is een abstactie van tabel 1, alleen de belangrijkste partialen zijn hierin opgenomen. Als we op grote afstand zo'n klok horen is het nog steeds onmiskenbaar een klok, terwijl slechts de allersterkste partialen worden gehoord, de andere worden niet waargenomen omdat ze zich vanwege de grote luisterafstand, onder de gehoordrempel bevinden. Piet van Egmond maakte al in de zestigerjaren van de vorige eeuw klokkensimulaties met het orgel. In tabel 3 zien we dat hij daarvoor slechts vier orgelpijpen benutte, twee zeer boventoonarme registers, wijde open labialen, voor gondtoon en kleine deciem, en twee boventoonrijke registers, prestanten,voor het octaaf en de duodeciem (Dit naar mijn eigen gehoormatige analyse) Tezamen met de nagalm in de kerk en de speelwijze:
grondtoon en kleine deciem aangehouden en voorzien van tremulant en de prestanten ritmisch gespeeld als 'bim-bam' leverde dat, zeker in die tijd, spectaculaire resultaten op.

de FM-synthese-oplossing

De oplossing voor de virtuele FM-klok bestaat uit twee maal een set 'simple FM', die bij elkaar worden gemengd. Eén set met c/m verhouding 2.38 : 8.38 en nog een set met c/m verhouding 1 : 3. Als we de eerste verhouding, 2.38 : 8.38 terug rekenen naar 1, staat er dus eigenlijk 1 : 3.52. Dat lijkt wel erg veel op de c/m verhouding 1: 3.5 zoals we die al tegenkwamen in de DX7 'tubular bell'. Nou dat is ook zo. Beide spectra zijn bijna identiek, met dit verschil dat in de verhouding 2.38 : 8.38, de grote deciem in het spectrum, de eerste boventoon nu een *evenredigzwevende* kleine deciem (15 halve toonsafstanden hoger) vormt t.o.v. de grondtoon. In de verhouding 1 : 3.5 betreft het een *reine* grote deciem (16 halve toonsafstanden hoger). In de synthese-oplossing staat de carrier van dit 'simple FM' algoritme echter op de waarde 2.38. Dat betekent dat het gehele spectrum een evenredigzwevende kleine deciem naar boven is getransponeerd.
Tabel 5 laat zien welke boventonen dat volgens bovenstaand

rekenkunstje op levert.
Het andere 'simple FM' algoritme met c : m verhouding 1 : 3 genereert boventoonfrequenties zoals aangegeven in tabel 4. Alles tezamen levert dat een spectrum op dat een grote mate van overeenkomst vertoont met dat van de echte klok uit tabel 1.
De kwint ontbreekt weliswaar in de synthese, en inplaats van een b3 hebben we en ais3 in het spectrum. Valt dat op? Oordeel zelf maar, niet elk mens hoort precies hetzelfde.

klankanalyse van een beiaardklok

partiaal #		toonhoogte met offsetwaarde in cents	sterkte	uitklinktijd
1	**grondtoon**	**c1 +31**	**mf**	**100%**
2	**priem**	**c2 +31**	**f**	**55%**
3	**kleine terts**	**dis2 +40**	**ff**	**75%**
4	kwint	g2 +23	mp	20%
5	**octaaf**	**c3 +31**	**fff**	**30%**
6	grote deciem	e3 +58	p	
7	1e undeciem	f3 -34	p	
8	2e undeciem	f3 -14	p	
9	**duodeciem**	**g3 +9**	**ff**	**20%**
10		a3 +2	pp	
11		b3 +32	pp	
12	**dubbeloctaaf**	**c4 +91**	**f**	**15%**
13		cis4 +13		
14		cis4 +22		
15		d4 +45		
16		dis4 +29		
17		e4 +60		
18	**dubbelundeciem**	**f4 +56**	**mf**	**10%**
19		fis4 +57		
20		fis4 +64		
21		g4 +11		
22		g4 +31		
23		gis4 +65		
24		a4 +18		
25		**a4 +46**	**mp**	**7.5%**
26		ais4 -7		
27		ais4 +16		
28		ais4 +36		
29		b4-6		
30		b4 +53		
31		c5 -30		
32		c5 -11		
33		c5 +17		
34	**trippeloctaaf**	**c5 +82**	**mp**	**5%**
35		cis5 +12		
36		cis5 +37		
37		cis5 +58		
38		cis5 +60		
39		d5 -4		
40		d5 +29		

naar André Lehr uit: 'Leerboek der campanologie', Nationaal Beiaardmuseum, Asten, 1976 en CAMPANOLOGIE, Koninklijke Beiaardschool "Jef Denijn" Mechelen, Belgiè, 1996 ISBN 90-75832-01-X
(De analyse was gebaseerd op een klok met grondtoon gis +31. Voor het gemak, ter vergelijking met de andere tabellen, zijn alle partialen omhoog getransponeerd naar grondtoon c1)

de luidste en belangrijkste partiaaltonen van een beiaardklok en hun benamingen

grondtoon	c1
priem	c2
kleine terts	dis2
octaaf	c3
duodeciem	g3
dubbeloctaaf	c4
trippeloctaaf	c5

de tonen die Piet van Egmond gebruikte voor klokkensimulatie op het orgel (naar mijn eigen gehoormatige analyse)

grondtoon	c1	wijde open labiaalpijp
kleine deciem	dis2	wijde open labiaalpijp
octaaf	c3	prestantpijp
duodeciem	g3	prestantpijp

zijbandfrequenties zoals die worden gevormd door een simple FM-algoritme met een cm-verhouding c : m = 1:3

Ratio	offset (MIDI) note#.cents	nootnaam (+/- cent)	klokpartiaal
1	0	c1	**grondtoon**
2	12	c2	**priem**
4	24	c3	**octaaf**
5	27.86	e3 -14	**grote deciem**
7	33.69	ais3 -31	
8	36	c4	
10	39.86	e4 -14	
11	41.51	fis4 -49	
13	44.40	a4 +40	
14	45.69	ais4 -31	
16	48	c5	
17	49.05	cis5 +5	
19	51	dis5	
20	51.86	e5 -14	
22	53.51	fis5 -49	
23	54.28	fis5 +28	

zijbandfrequenties zoals die worden gevormd door een simple FM-algoritme met een cm-verhouding: c : m = 2.38 : 8.38 (= 1 : 3.52)

Ratio	offset (MIDI) note#.cents	nootnaam (+/- cent)	klokpartiaal
2.38	15	dis2	**kleine deciem**
6	31.02	g2 +2	**duodeciem**
10.76	41.13	f3 +13	
14.38	46.15	ais3 +15	
19.14	51.10	dis4 +10	
22.76	54.10	fis4 +10	
27.52	57.39	a4 +39	
31.14	59.53	c5 -47	
35.90	62	d6	
39.52	63.65	e6 -35	
44.28	65.62	fis6 -38	

literatuurbronnen

'Leerboek der campanologie',
André Lehr,
Nationaal Beiaardmuseum, Asten, 1976

CAMPANOLOGIE,
dr André Lehr,
Koninklijke Beiaardschool "Jef Denijn" Mechelen, Belgiè, 1996 ISBN 90-75832-01-X

Organizational Techniques For C : M Ratios In Frequency Modulation
Barry Truax
Computer Music Journal 1 (4) : 46-50

FM Theory & Applications
By Musicians for Musicians
Dr. John Chowning and David Bristow
1986 Tokyo
Yamaha Music Foundation
ISBN 4-636-17482-8 COO73