Voetmaten en harmonischen: op gespannen voet?

In de traditie komt het verleden weer tot leven. Bijvoorbeeld de aanduiding voetmaat, aangegeven door een getal met een komma in upper script erachter, geeft traditioneel de lengte -in het aantal voeten- aan van een orgelpijp. Echter ook nog op menige hard- of software synthesizer vinden we een fysieke knop of parameter waarbij we kunnen kiezen tussen bijvoorbeeld 16', 8' of 4'. Deze keuzemogelijkheid, leerde de ervaring, resulteerde in transposities van een octaaf. 16' klinkt een octaaf lager dan 8'. 4' een octaaf hoger dan 8'.

Hoe zit dat?
Uit de natuurkunde weten we dat de lengte van een trillende luchtkolom omgekeerd evenredig is met de periodiciteit van de trilling. Periodiciteit gedefinieerd als het aantal trillingscycli per seconde. Dit wordt uitgedrukt in hertz, afgekort Hz. Per definitie is 1 trillingsperiode per seconde gelijk aan 1 Hz. Verdubbelen we de lengte van de luchtkolom dan blijkt dat de periodiciteit wordt gehalveerd. Halveren we echter de lengte van de orgelpijp dan blijkt de periodiciteit met een factor 2 te zijn toegenomen. Onze waarneming herkent periodiciteits*verhoudingen*. Een factor 2 resulteert voor onze gehoor in een octaaf.

Het orgel
Het orgel behelst een meerstemmig toetsinstrument met voor elke toets minimaal één geheel zelfstandige toongenerator (het kleinste instrument in deze categorie is het 'Portatief'). Een zo'n reeks generatoren gekoppeld aan het klavier wordt register genoemd. Een orgel bestaat doorgans uit meerdere registers in diverse onderscheiden voetmaten. In de meeste gevallen kunnen deze registers naar wens worden in- en uitgeschakeld. Er kunnen op die manier meerdere onafhankelijke toonbronnen op één toets tot klinken worden gebracht.

Voetmaten
Het zogenoemde 8'-register produceert dezelfde toonhoogte als de vergelijkende toets op de piano. Bepalen we nu de lengte van de open pijp (open fluit) bij laagste de C-toets op het klavier, dan blijkt die ca. 240 cm te bedragen. Dit register deze verzameling fluitachtigen, wordt een 8'-register genoemd. Eén voet is gelijk aan 30 cm; 8' komt aldus overeen met 2,40 m. Een 4' klinkt zodoende een octaaf hoger dan men op grond van de toets zou verwachten.

Open en gedekte pijpen
Op een orgel treffen we naast open fluiten ook zogenoemde gedekte pijpen aan. Dit zijn fluiten waarbij de bovenkant van de buis is afgesloten. Bij gelijke lengte blijkt een gedekte pijp een octaaf lager te klinken dan een open fluit. Ook hiervoor vinden we de verklaring in de natuurkunde. Zonder hierop nu verder in te gaan waarom dat zo is, is het de gewoonte in de orgelwereld een register dat bestaat uit gedekte labialen, fluiten, de voetmaatnaam te geven van de open fluit die in toonhoogte gelijk klinkt. Ook al bedraagt de lengte van zo'n op gelijke toonhoogte klinkend gedekt register slechts de helft van de maten van die van de open fluiten, wordt het toch als 8' register betiteld.
De klank van de open pijpen bestaat uit een aaneengesloten harmonische reeks: zowel even als oneven harmonischen. Hoe enger de diameter hoe meer boventonen. Dat geldt ook voor de gedekte pijpen, met dat verschil, dat deze slechts oneven harmonischen produceren.

Diverse voetmaten
De bekendste registervoetmaten op pijporgels zijn wel 16', $5^{1/3}$', 8', 4', $2^{2/3}$', 2', $1^{3/5}$', $1^{1/3}$' en 1'. In deze volgorde treffen we ze ook aan op het bekende Hammondorgel. Waarom juist deze voetmaten: uitgedrukt in hele zowel als gebroken getallen. Dat heeft alles te maken met de geproduceerde trilling in zo'n pijp; dit betreft een zogenoemde periodieke complexe trilling. Elke complexe trilling bestaat uit een aantal deelfrequenties, sinusvormige trillingen ('de geluidsatomen'). Voor een complexe periodieke trilling geldt dat de samenstellende deelfrequenties zich verhouden als de volgende reeks: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8... Dit spectrum van frequenties wordt ook wel de grondtoon met z'n boventonen genoemd. De laagste

frequentie de ‘1’ is de grondtoon, de andere, de hele veelvouden ervan, zijn de boventonen. Deze reeks staat bekend als de harmonische serie, of ook wel natuurtonenreeks genoemd.

De relatie tussen voetmaten en harmonischen
Vergelijken we de voetmatenreeks 8’, 4’, $2^{2/3}$’, 2’, $1^{3/5}$’, $1^{1/3}$’, $1^{1/7}$’ 1’ met de volgende harmonische reeks: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan blijkt deze getalsmatig het spiegelbeeld te zijn van de voetmaatgetallen. In formulevorm voor een 8’-register: 8 gedeeld door het voetmaatgetal geeft het harmonische nummer. Bijvoorbeeld de $2^{2/3}$’ blijkt de derde harmonische van het 8’-register te zijn: $8:2^{2/3}=3$. Zo vinden we voetmaat voor de derde harmonische van een 16’-register door 16 te delen door 3, $16:3=5^{1/3}$. Bovenstaande voetmatenreeks blijkt dus niets anders voor te stellen dan een harmonische reeks. In plaats van direct de periodiciteitsverhoudingen aan te geven, verwijst ze naar de oorzaak ervan, de lengteverhoudingen van de trillende luchtkolommen.

De evenredigzwevende stemming
Voor meerstemmige toetsinstrumenten is de evenredigzwevende stemming, ook wel gelijkzwevende stemming genoemd, waarbij alle opeenvolgende halve tonen worden gedefinieerd in onderlinge frequentierelatie door de twaalfdemachtswortel uit 2 (1,059463094). Deze stemming is standaard geworden in de westerse muziekpraktijk. Stel dat we op een orgel twee registers hebben geselecteerd de 8’ en de $1^{3/5}$’. Spelen we nu bijvoorbeeld de tweeklank C-e^2, dan valt de 5^{de} harmonische van de 8’ *bijna* samen met de grondtoon van de e^2 die klinkt door de $1^{3/5}$’ voetmaat can de C-toets.

Discrepantie van inwendige stemming en uitwendige stemming
Omdat beiden niet precies dezelfde toonhoogte hebben ontstaat er een zweving in de samenklank. De oorzaak hiervan is de discrepantie tussen de harmonische stemming in de boventoonserie van de orgelpijpen, de inwendige stemming, en de uitwendige stemming, de frequentierelatie van de pijpen onderling volgens het evenredigzwevende principe. Zo’n zelfde soort zweving ontstaat ook bij de samenklank C-g. De 3^{de} harmonische van de orgelpijp op de C-toets is niet precies gelijk aan de 1^{ste} harmonische, de grondtoon, van de pijp op de g-toets. Slechts de octaafvoetmaten, 8’, 4’, 2’ enz. komen overeen met de harmonischen uit de boventoonreeks en zullen bij samenklinken niet resulteren in zwevingen.

Zwevingen
Zijn die zwevingen hinderlijk of juist aangenaam kan je je afvragen. Het antwoord is tweeledig. Dat kan beide het geval zijn. Het heeft alles te maken met de snelheid van zulke zwevingen. Vrij langzame zwevingen tot zo’n twee keer per seconde worden doorgaans als aangenaam ervaren. We interpreteren ze als een soort kooreffect. Het effect dat we waarnemen als bijvoorbeeld een aantal violen unisono, allemaal dezelfde tonen, spelen. Snellere zwevingen, tot plusminus zeven maal per seconde doen zich voor als een soort vibrato-effect. Zwevingen nog sneller uiten zich in toenemende mate als hinderlijk. Als er echter niet te veel te luide boventonen zijn en de snelheid van de zwevingen beperkt blijft is dat niet zo’n probleem.

Een orgel met harmonische toongeneratoren
Bij een orgel dat is samengesteld uit toonbronnen met een harmonische boventoonstructuur zal er dus m.b.t. aanvaardbare zwevingen altijd een compromis moeten worden gezocht in de uitwendige stemming, daar de harmonische boventoonstructuur een gegeven is. Er zijn in de loop der tijd een groot aantal diverse stemmingen (temperaturen) ontwikkeld, die elk voordelen zowel als nadelen hebben.

Hammond: een orgel met toonwielen in evenredigzwevende stemming
Er van uitgaande dat de toonwielen pure (sinusvormige) frequenties genereren die zowel fungeren als grondtonen én boventonen is daardoor *de inwendige stemming identiek aan de uitwendige stemming*. De aparte registers als bijvoorbeeld kwint-, terts- en sptiemvoetmaten fungeren zo als quasi-harmonischen. Zo kan bijvoorbeeld de c1 toets ook worden gekoppeld aan het toonwiel een octaaf hoger. Deze koppeling wordt dan het 4’-

register. Verbonden aan het toonwiel een duodeciem hoger verkrijgen we een $2^{2/3}$'-register, enz.

Naast de standaardreeks voetmaten:
16' $5^{1/3}$' 8' 4' $2^{2/3}$' 2' $1^{3/5}$' $1^{1/3}$' 1'
treffen we op de Hammond H100 twee extra drawbars aan, die beide een combinatie van twee quasi-harmonischen vertegenwoordigen: de 7de (**$1^{1/7}$'**) en 9de (**8/9'**) combinatie, en een samenstel van de 10de (**4/5'**) en 12de (**2/3'**). Oplopend in de voetmaten-reeks zien we dat de afwijking toeneemt. De kwinten zitten er 1,9 cents naar boven naast, de 8/9' is 3,9 cents te hoog, de tertsvoetmaat $1^{3/5}$' 13,7 cents te hoog, de septiemvoetmaat $1^{1/7}$' wijkt nog meer af, deze is 31,2 cents te laag.

N.B Voor het gemak ben ik er van uitgegaan dat het hammondtoonwielorgel zou zijn opgebouwd uit toonwielen die in exact evenredigzwevende stemmingsrelatie staan. En dat die toonwielen eveneens exact sinusvormige signalen zouden produceren. Deze twee aannames zijn niet juist. In beide gevallen betreft het een benadering. De afwijkingen zijn echter dermate klein dat het voor de strekking van dit artikel niet relevant is. Net zo min dat ik er rekening mee houd dat de hoge voetmaten terug springen, repeteren genaamd. Ook dit is voor de teneur van het betoog niet van wezenlijk belang.
[1]http://www.dairiki.org/HammondWiki/GearRatio http://www.dairiki.org/HammondWiki/ToneWheel

De standaard Hammondvoetmaten

(quasi-harmonischen in de **e**venredig**z**wevende **s**temming met 8' als referentie)

Voetmaten	**16'**	**$5^{1/3}$'**	**8'**	**4'**	**$2^{2/3}$'**	**2'**	**$1^{3/5}$'**	**$1^{1/3}$'**	**1'**
quasi-harmonische	0.5	1.5	**1**	2	3	4	5	6	8
Interval in cents	-1200	-500	**0**	1200	1900	2400	2800	3100	3600
Offset in cents t.o.v. harmonische	0	1.9	**0**	0	1.9	0	13.7	1.9	0

Extra Hammond H100-voetmaatcombinaties

Voetmaten	**$1^{1/7}$'**	**8/9'**	**4/5'**	**2/3'**
quasi-harmonische	7	9	10	12
Interval in cents	3400	3800	4000	4700
Offset in cents t.o.v. harmonische	-31.2	3.9	13.7	1.9

basisvoetmaat (8') : registervoetmaat = harmonische
basisvoetmaat (8') : harmonische = registervoetmaat

Hammond Console (A, B, C) Factory Presets Upper Manual

Preset Key	**Drawbar settings**	**Name**	**Loudness**
C	-	-	No sound
C#	005320000	Stopped Flute	pp
D	004432000	Dulciana	ppp
D#	008740000	French Horn	mf
E	004544222	Salicional	pp
F	005403000	Flutes 8' & 4'	p
F#	004675300	Oboe	mf
G	005644320	Swell Diapason	mf
G#	006876540	Trumpet	f
A	327645222	Full Swell	ff
A#	Upper Left Drawbars		
B	Upper Right Drawbars With Percussion		

Hammond Console (A, B, C) Factory Presets Lower Manual

Preset Key	Drawbar settings	Name	Loudness
C	-	-	No sound
C#	004545440	Cello	mp
D	004423220	Flute & String	mp
D#	007373430	Clarinet	mf
E	004544220	Diapason, Gamba & Flute	mf
F	006644322	Great without reeds	f
F#	005642200	Open Diapason	f
G	006845433	Full Great	fff
G#	008030000	Tibia Clausa	f
A	427866244	Full Great with 16’	fff
A#	Upper Left Drawbars		
B	Upper Right Drawbars		

Populaire Hammond drawbar-registraties

Name	Drawbar settings		Percussion	
Blues solo	888000000	3rd	fast	soft
Solo	800000300	2nd	slow	soft
Bossanova solo	800800000	2nd	fast	soft
Blues strings	800000888	off		
Blues horns	880080888	off		
Strings 8’	004688888	off		
Open flute	008300000	off		
Stopped flute	008030000	off		
Clarinet 8’	005070300	off		
Trumpet 8’	006876540	off		
Stopped flute	005320000	off		
Auger	888110000	2nd	fast	soft
A whiter shade of pale	688600000	2nd	fast	soft

Liist van orgel-vulstemmen op het pijporgel (naar Wikipedia)

Voetmaat	Klinkend op toets C4	Naam
$6^{2/5'}$	E4	Gross Tierce
$5^{1/3'}$	G4	Quint
$3^{1/5'}$	E5	Gross Tierce, Tierce
$2^{2/3'}$	G5	Nasard, Twelfth
$1^{3/5'}$	E6	Tierce
$1^{1/3'}$	G6	Larigot
$1^{1/7'}$	Bb6	Septième
8/9’	D7	None
8/13’	A7	Tredezime
8/14’	Bb7	Septième
4/19’	Eb8	Mollterz (Minor third)
1/6’	G9	Quadragesima

Yamaha DX-synthesizers

De DX-serie synthesizers van Yamaha bieden behalve uitgebreide FM-synthesemogelijkheden ook een modus voor additieve synthese. Dat is voor de 6-operator-instrumenten algoritme 32 en voor de 4-operatorinstrumenten algoritme 8. Deze operatoren fungeren als een mix van sinusgeneratoren en kunnen worden aangwend als voetmaten t.b.v. orgelregistraties. Onderstaand vind je een vergelijkingstabel van drawbar-volumestanden gerelateerd aan de overeenkomstige operator output levels.

Hammond drawbarvolume versus Yamaha synthesizer operator output level

Drawbar volume	DX1/7/5/TX7/DX7II/TX802	DX11/TX81Z/V50/DX100
1	71	62
2	75	66
3	79	70
4	83	74
5	87	78
6	91	82
7	95	87
8	99	92

References

Hammond H100, Klaus Wunderlich
https://www.youtube.com/watch?v=8vqc1GBdJcs
https://www.youtube.com/watch?v=MonlsxNMPv8

Organ/Keyboard Drawbar Basics
https://www.youtube.com/watch?v=FeRTwh9oXxo

List of organ stops
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pipe_organ_stops

Basic Theatre Organ Registrations Tutorial by Tom Horton
https://www.youtube.com/watch?v=jTLkGZu2Bh8

Guide to the cinema organ by Tom Horton
https://www.youtube.com/watch?v=LEKIDS3B-O8