

Over sinustonen, formanten, spraakvocalen en zang...

G2Demo zegt *ah* en *oh*, krijgt pretenties: probeert te zingen en waant zich zelfs in Tuva en gaat op boventoonzangles.

Op de eerste plaats is dat te danken aan klankonderzoekers als Hermann von Helmholtz [i], Carl Stumpf, Wolfgang Köhler en Karl Erich Schumann [ii]. Zij ontrafelden de structuur van (spraak)klanken en kwamen zo de wezenlijke identiteit van de klinkers en medeklinkers op het spoor.

De fascinatie voor de menselijke stem is van alle tijden. Al in 1791 schrijft Wolfgang von Kempelen over een *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine*. Deze Hongaar bouwde een mechanisch model van het menselijke spraakorgaan dat volgens overlevering verbluffende resultaten opleverde.

Op deze link, www.ling.su.se/staff/hartmut/kemplne.htm, vind je een uitgebreide beschrijving met afbeeldingen van die sprekende machine. Klankregistratie bestond in die tijd uiteraard nog niet. Maar vanaf de dertiger jaren van de vorige eeuw was dat wel mogelijk. Op de volgende link, www.icsi.berkeley.edu/eecs225d/klatt.html van de universiteit van Berkeley is in 36 audio mp-3 voorbeelden de geschiedenis van de spraaksynthese compact samengevat.

sinustonen, de fundamentele bouwstenen van klank

Al in 1811 leverde Jean-Baptiste Joseph Fourier het wiskundige bewijs dat elke periodieke complexe trilling kan worden ontleed in een aantal fundamentele sinustrillingen van verschillende frequentie, onderscheiden amplitude en fase. Fouriers theorie werd door Hermann von Helmholtz betrokken op geluidstrillingen. Met zijn naar hem genoemde Helmholtz-synthesizer bouwde hij complexe trillingen op bestaande uit tien harmonische boventonen.

Op

http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Rudolf_Koenig_Apparatus/Fourier_Synthesis/Fourier_Synthesis.html, vind je afbeeldingen van dit instrument. Additieve synthese dus. Dat gebeurde helmaal mechanisch-akoestisch. Tien in de harmonische reeks gestemde stemvorken werden continu d.m.v. elektriciteit in trilling gehouden, op een vergelijkbare manier zoals nu bij de E-bow om gitaarsnaren in voortdurende trilling te houden.

Die stemvorken leveren slechts een heel zacht geluid op. Als je ze niet bij je oor houdt of met de onderkant op je schedel plaatst hoor je er vrijwel niks van. Elke stemvork was voorzien van een resonator in de vorm van een gesloten cilinder met aan de voorkant een klein gaatje. Door de inhoud van zo'n cilinder kan de resonantie worden afgestemd.

Nu, elke resonator was zo precies gelijk gestemd met de bijbehorende stemvork. Voor elk resonatorgaatje was een beweegbaar schijfje aangebracht waarmee het resonatorgaatje minder of meer kon worden afgesloten. Bij volledige afsluiting gebeurt er dus niets. Alleen de stemvork trilt, maar zo zacht dat je er geen last van hebt. Bij helemaal geopend gaatje evenwel ontstaat spontaan resonantie en de stemvorktrilling wordt aanzienlijk versterkt en heel duidelijk hoorbaar.

Waarom de stemvork als basis voor de klankopwekking kun je je afvragen. Het antwoord is heel eenvoudig. Als je een stemvork continu laat oscilleren volgens het E-bow principe wordt alléén de eerste trillingsmodus geactiveerd. Dat levert een heel mooie zuivere sinustrilling op.

Hermann von Helmholtz

In 1863 publiceerde hij *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. De leer van de toongewaarwording als fysiologische grondslag voor de theorie van de muziek (vert. EB). Met dit werk vestigde hij z'n naam als grondlegger van het moderne klankonderzoek. De mooie mathematische beschrijvingen van Fourier wekte hij tot leven in klinkend resultaat.

Helmholtz is ook de eerste die het begrip klankkleur een wetenschappelijk fundament geeft. Hij stelt twee theorieën op aangaande klankkleur: De *Relativ-* en de *Absoluttheorie*. De eerste theorie verklaarde de klankkleur van muziekinstrumenten, de tweede van de spraakklankers, de vocalen. En daar gaat het om in deze synthworkshop.

Hij ontdekte door analyse en synthese-experimenten dat de klankkleur van klinkers wordt bepaald door bepaalde resonanties bij vast liggende frequenties, ongeacht de toonhoogte waarop zo'n klinker wordt gevormd. Neem bijvoorbeeld de klinker *aa*. Uitgesproken door achtereenvolgens een man, vrouw en kind, is zonder meer duidelijk herkenbaar als een *aa*.

Hoe dat komt zien we in de afbeelding *ah-spectrum*. Je ziet in dit plaatje de spectraalanalyse van de Engelse vocaal als in het woord *father*. Hierin kun je twee duidelijke resonantiemaxima onderscheiden, één bij 700 Hz en een ander bij 2600 Hz. Deze energiemaxima die ontstaan door resonantie worden *formanten* genoemd. Zo'n frequentiekenmerk, ofwel de *spectrum envelope* is één van de belangrijke identiteitskenmerken van een klank. Het gaat in dit voorbeeld om twee maal een gezongen *ah*-klank, één op de toonhoogte van 100 Hz, iets lager dan *a* in het groot octaaf, en in het andere geval gezongen op een toonhoogte van 220 Hz, dat is precies *a* in het klein octaaf. Nagenoeg één octaaf verschil dus.

Wat we zien is dat de bovenste analyse van de lage zangstem een twee maal zo hoge spectrumresolutie laat zien dan de onderste analyse. Niet zo vreemd natuurlijk, want de ene toon ligt een octaaf lager. In hetzelfde frequentiegebied vergeleken heeft de toon die een octaaf lager ligt twee maal zoveel harmonischen. Zo'n vergelijkbare analyse-uitkomst zouden we ook zien voor een gesproken Nederlandse *aa*, door een man, vrouw en kind.

De gemiddelde spreektoonhoogten voor mannen, vrouwen en kinderen, liggen zo ongeveer bij 100, 200 en 300 Hz. De overeenkomst is dus de spectrumomhullende, de

denkbeeldige lijn die sterkte van de harmonischen met elkaar verbindt. Welke boventonen in dat gebied vallen, hangt dus af van de spreek,- of zangtoonhoogte. Helmholtz' *Relativtheorie* werd later onderuit gehaald door Karl Erich Schumann, die aantoonde dat de Absolutheorie ook geldig is voor de klankkleur van muziekinstrumenten.

de enkele sinustrilling: vocaliteit, volgens Koehler en Kaegi

Een andere Duitse geleerde, Wolfgang Koeler, psycholoog en één van de grondleggers van de Gestaltpsychologie, hield zich bezig met de waarneming van enkelvoudige sinustonen, Hij komt tot de conclusie, dat sinustonen wel degelijk een klankkleurattribuut in zich meedragen.

Volgens Koehler zijn sinustonen op de volgende toonhoogten, c1, c2, c3, c4 en c5 duidelijk gerelateerd aan vocaalkleuren. En wel achtereenvolgens overeenkomstig met de klinkers, *oe*, *oo*, *aa*, *ee* en *ie*. Die overeenkomst is niet voor elk mens even duidelijk. Bij niet muzikaal ontwikkelde personen lijkt de verbinding tussen enkelvoudige sinustonen en vocaalkleuren het sterkst te zijn. In zijn boek, *Was ist elektronische Musik* uit 1967 stelt ook Kaegi dat de enkele sinustoon duidelijk is verbonden met vocaliteit [iii]. Hij komt tot de volgende relaties: *oe*-316Hz, *oo*-474Hz, *ò*-632Hz, *aa*-948Hz, *eu*-1264-Hz, *uu*-1580Hz, *è*-1896, *ee*-2212Hz en *ie*-2528Hz. Laad *Vocaliteiten.pch2* en luister naar de vocaliteitenreeksen van Koehler en Kaegi.

de formanten van vocalen en consonanten

Afhankelijk van hoe nauwkeurig je analyse is kun je in spraakklanken wel tot vier formanten ontdekken. Echter voor de vorming van de klinkers en medeklinkers zoals die van belang zijn voor de verstaanbaarheid kunnen die allen gevormd worden met de twee laagste formanten.

De hogere formanten vertegenwoordigen de individuele kenmerken van de spreker en zijn in de patchvoorbeelden weggelaten. Laad de patches, *Vocalen(m).pch2*, *Vocalen(v).pch2* en *Vocalen(k).pch2* en vergelijk de gesynthetiseerde klinkerklankkleuren voor zowel een mannenstem (m), vrouwenstem (v) en kinderstem (k). Als je

patch *Consonanten.pch2* laadt kun je syntheses beluisten van de medeklinker: *s*, *sch* (a)*ch*, (i)*ch* en *f*.

Al deze synthesesvoorbeelden zijn gebaseerd op de formantgebieden zoals gedefinieerd door Dr. Werner Kaegi in *Was ist elektronische Musik*. In deze voorbeeldpatches speelt een eenvoudig automaatje een deuntje over twee octaven. Dat wordt opgewekt door een *LfoA* gevolgd door een *KeyQuantize* module en een *Glide*, die er een portamento-effect aan geeft.

Experimenteer met het uitzetten van het portamento-effect en met het uitzetten van de toonhoogtesturing op de *Pitch*-ingang van de *Excitation Oscillator*. Je zult bemerken dat naar mate het signaal statischer wordt, de sterkte van de formantwaarneming afneemt. Met de *Switch* module kun je inplaats van de *Excitation Osc* ook kiezen voor een *ruisinput*. Je verkrijgt dan de vocaalklankkleuren in fluisterversie.

De eigenlijke formanten worden gevormd door twee parallelle *FltNord* filters in band pass mode. Achter de *Excitation Osc* is een *Pulse* module geschakeld. Die zorgt ervoor dat de *ExcOsc* bij elke cyclus de instelbare pulsduur triggert. Dit is een wat vereenvoudigde voorstelling van het stembandsignaal. In werkelijkheid zijn dat een soort asymmetrische afgeronde driehoekpusjes met een vaste tijdsduur, Alleen de herhalingsperiodiciteit wordt gevarieerd door de *ExcOsc*. Zo'n signaal met een vaste pulsduur onafhankelijk van de herhalingsperiodiciteit zorgt ervoor dat er een vaste frequentiekaracteristiek in het signaal ontstaat. Een spectrale 'vingerafdruk', fixed spectrum envelope, zoals we die al tegen kwamen als bij de formanten. Laad *FixSpectrumEnv.pch2* en tweak de pulsduur van het stembandsignaal en hoor hoe de klankkleur verandert door verschillende pulsduurinstellingen.

spreken en zingen

We zijn het ons meestal niet bewust, maar spraak- en zangklanken zijn zonder uitzondering altijd voorzien van een rijke modulatie in toonhoogte. Zou die geheel en al afwezig zijn dan horen we klanken zoals bij een extreem

ingestelde *autotune* plug in.

Laad patch *Singer-Expr.pch2* en luister naar de acht verschillende variations. Laad vervolgens *Singer.pch2* en luister nu nog eens. Je hoort nu in principe twee maal de acht identieke voorbeelden. Nou ja, bijna identiek dan. In het eerste voorbeeld is alle fijnstructuurmodulatie weggelaten. Wat je hoort is slechts een statisch signaal, dat weliswaar een melodietje speelt en voorzien is van een vocaalformantstructuur, maar dat in de verste verte niets van doen heeft met zingen, laat staan met de eerste probeersels van een cursusje boventoonzang in Tuva. Maar daarover een andere keer.

Ernst Bonis

Dit artikel werd eerder gepubliceerd in Interface 111 september 2007.

literatuurbronnen

i

H. Helmholtz

Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik 1863

ii

P. H. Mertens

Die Schumannschen Klangfarbengesetze und ihre Bedeutung für die Übertragung von Sprache und Musik

1975 Frankfurt/M

ISBN 3 92011254 7

iii

Werner Kaegi

Was ist elektronische Musik

Orell Füssli Verlag

Zürich 1967

internetlinks

excellente tutorials over de menselijke stem
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/music/vowel.html>

Von Kempelens sprekende machine (1791)
www.ling.su.se/staff/hartmut/kemplne.htm

geschiedenis van de spraaksynthese in mp3-audiovoorbeelden.
www.icsi.berkeley.edu/eecs225d/klatt.html

www.kaegi.tmfweb.nl/hele_pagina.htm

over formanten
<http://en.wikipedia.org/wiki/Formant>

Hermann von Helmholtz
http://nl.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz