

Over de omslag

Lissajous figuur gegenereerd door een patch in max/msp (Jules Antoine Lissajous (1822-1880))  
De reproductie van de ruimtelijkheid van geluid.

Ruimtelijk horen, conventionele stereofonie en de nieuwe mogelijkheden van golfveld synthese  
naam/voornamen auteur: ten Berge, Fedde Baruch Salvador

studentnummer: 2030066

European Media Master of Arts - Sound & Music Technology

naam begeleider: Eelco Grimm

Hogeschool voor de Kunsten Utrecht / Utrecht School of Arts (NL)

Faculteit Kunst, Media & Technologie

6 augustus, 2007



## Voorwoord

De laatste jaren van mijn opleiding Audio Design aan de Hogeschool voor de Kunsten Utrecht (HKU) ben ik mij gaan interesseren voor de ruimtelijke reproductie van geluid. Ik heb mij verdiept in een reproductiesysteem dat de feitelijke ruimtelijkheid van geluid reconstrueert. Dit systeem, genaamd golfveld synthese (GVS), bleek een zeer relevant en uitdagend onderwerp om op af te studeren.

Maart 2007 ben ik begonnen met de voorbereidende fase van mijn project. Het werd duidelijk dat het realiseren van een fysieke GVS omgeving geen realistische doelstelling zou zijn binnen de gestelde tijd en het budget. Het resultaat van mijn onderzoek zou een hypothese worden van de toepassingmogelijkheden van GVS binnen artistiek en maatschappelijk kader.

Ik ben tevreden over de door mij geleverde scriptie waar ik met veel plezier aan heb gewerkt. Ik ben overtuigd van de relevantie van het door mij gekozen onderwerp voor de beroepsgroep van muziektechnologie en hoop met mijn bevindingen en aanbevelingen een nuttige bijdrage te leveren aan de ontwikkeling van een artistiek en maatschappelijk draagvlak voor GVS.

Wouter Snoei, (GVS systeem, 'Game of Life'), wil ik hierbij danken voor de keren dat ik hun systeem heb mogen ervaren. Gerard van Wolferen dank ik voor het delen van zijn inspirerende ideeën voor het toepassen van een GVS systeem in een maatschappelijke kader. Jorrit Tamminga wil ik bedanken voor het creëren van een draagvlak voor mijn ideeën. Eelco Grimm voor de begeleiding bij het onderwerp van mijn scriptie. Ten slotte dank ik alle mensen van wie ik inzichten en ondersteuning heb genoten tijdens mijn studiejaren aan de HKU.

Fedde ten Berge

6 augustus, 2007

## Samenvatting

Het onderwerp van deze scriptie is ruimtelijk geluid. Hoe ervaren wij mensen ruimtelijk geluid en hoe kunnen wij het geluid zodanig over luidsprekers reproduceren dat wij die ruimtelijkheid ervaren. Deze scriptie werkt toe naar de reproductie van ruimtelijk geluid door middel van golfveld synthese (GVS). De hoofdvraag is: Wat zijn de artistieke en maatschappelijke toepassingsmogelijkheden van golfveld synthese?

Voor het lokaliseren van een geluidsbron gebruiken we over het algemeen vier verschillende aanwijzingsmechanismen, zogenaamde lokalisatie cues:

- 1) Laterale cues, deze worden voornamelijk door het gehoor gebruikt om geluidsbronnen op het horizontale vlak te lokaliseren. Er wordt bij laterale lokalisatie hoofdzakelijk onderscheid gemaakt tussen 'interaural intensity differences' (IID) en 'interaural time differences' (ITD).
- 2) Afstand cues zijn de verschillende onafhankelijke mechanisme die door ons gehoor gebruikt worden om de afstand van een geluidsbron te bepalen.
- 3) Monaurale cues, dit zijn lokalisatie mechanismen die een geluidsbron lokaliseren door de filterende werking van ons lichaam en kleding voor dat het geluid onze oren bereikt.
- 4) Ruimtelijke cues, zijn de mechanismen die het geluid van een geluidsbron in relatie tot de akoestische eigenschappen van een ruimte analyseren.

Voor het reproduceren van geluid maakt men gebruik van een elektro-akoestisch systeem, bestaande uit een microfoon, een eventuele registratie, een signaalbewerking en (een) luidspreker(s). Elektro-akoestische systemen kunnen grofweg onderverdeeld worden in monaurale (MONO) systemen, stereofonische systemen en golfveld synthese (GVS). Voor stereofonie wordt in deze scriptie onderscheidt gemaakt tussen hoofdtelefoonstereo, luidsprekerstereo, multipel kanaal stereo en spatialisatie. Dit zijn reproductie systemen die zijn gebaseerd op de menselijke perceptie van ruimtelijk geluid. Deze systemen zullen in deze scriptie in historische perspectief worden geplaatst. Hun reproductie mogelijkheden en beperkingen worden uiteengezet. Tevens zullen suggesties worden gedaan ter optimalisatie van deze systemen.

GVS is in tegenstelling tot stereofonische reproductiemethoden gebaseerd op feitelijke reconstructie van ruimtelijk geluid. De fysische grondslag is gebaseerd op het principe van Huygens. De praktische implementatie van GVS is een 2D crosssectie van het aanvankelijke 3D concept.

Dit brengt vier hoofdzakelijke artefacten met zich mee:

- 1) Spatial Aliasing
- 2) Truncation Effects
- 3) Amplitude error
- 4) Spectrale error

Dankzij het vele onderzoek aan de TU-Delft zijn er nu in verschillende landen, instellingen bezig met de implementatie van het GVS concept. Niet al deze implementaties zijn volgens de TU-Delft een correcte benadering van de GVS theorie. Met het ontwerpen en realiseren van een GVS systeem gaat veel expertise, tijd en geld gemoeid.

De verschillende toepassingsmogelijkheden van het GVS concept stellen verschillende eisen aan de eigenschappen van het systeem. Voor een goede werking van een reproductie systeem voor ruimtelijk geluid is het van belang te begrijpen hoe wij de effecten van een dergelijk reproductie systeem met onze perceptie van ruimtelijkheid interpreteren. Het is dus zowel van belang kennis te hebben van de reproductie technieken van ruimtelijk geluid als van de menselijke auditieve perceptie van ruimtelijk geluid.

Maatschappelijke toepassingen stellen specifiekere eisen dan artistieke toepassingen. Wanneer men overweegt golfveld synthese te gaan toepassen in een maatschappelijk kader is het van belang een duidelijk doel voor ogen te hebben. Dit doel stelt immers eisen aan de eigenschappen van een GVS systeem. Daarnaast vereist het maatschappelijk toepassen een maatschappelijk inzicht bij ontwerpen van een concept, de maatschappij zal wellicht randvoorwaarden stellen aan het ontwerp, het is nuttig hiervan op de hoogte te zijn.

Golfveld synthese heeft de potentie te worden ingezet voor verschillende artistieke en maatschappelijke concepten. Het biedt een educatieve omgeving om te leren over muziektechnologie in het algemeen. Het kan ingezet worden in klankontwerp lessen, studio-technologie lessen en software-ontwerp lessen. Daarnaast zouden met het systeem zelf educatieve toepassingen voor bijvoorbeeld verstandelijk beperkten of slechtziende ontwikkeld kunnen worden. Hiervoor zou een experimentele GVS studio moeten worden ingericht. Daarnaast is het aan te bevelen bij de ontwikkeling van maatschappelijke toepassingen een aparte werkgroep met maatschappelijk affiniteit op te zetten.

## Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	8
1.1 Aanleiding tot het onderzoek.....	8
1.2 Doelstelling en vraagstelling.....	8
2. Richtinghoren.....	10
2.1 Laterale cues.....	10
2.1.1 Inter aural time difference.....	12
2.1.2 Inter aural intensity difference.....	13
2.1.3 Inter aural time difference envelope.....	14
2.2 Afstand cues.....	14
2.2.1 Absolute perceptie vs. relatieve perceptie.....	15
2.2.2 Daadwerkelijke bron vs. virtuele bron.....	15
2.2.3 Absoluut geluidsniveau.....	16
2.2.4 Inter aural intensity differences.....	16
2.2.5 Direct/galm ratio.....	17
2.2.6 Bewegingsparallax.....	17
2.2.5 Verrandering in spectrale inhoud.....	18
2.3 Monaurale (filter) cues.....	18
2.3.1 De pinna.....	19
2.4 Ruimtelijke cues.....	19
2.4.1 Het Haas-effect.....	19
2.4.2 Vroege reflectie en galm.....	20
2.4.3 Het Franssen-effect.....	22
3. Elektro-akoestiek.....	23
3.1 Monauraal (Mono).....	23
3.2 Stereofonie.....	24
3.2.1 Twee kanaal stereo.....	25
3.2.1.1 Hoofdtelefoon stereo.....	26
3.2.1.2 Luidspreker stereo.....	27
3.2.2 Multipel-kanaal stereo.....	28
3.2.2.1 Quadrafonie.....	29
3.2.2.2 ITU surround 5.1 (3/2).....	30
3.2.2.3 Spatialisatie.....	32

3.3 Golfveld Synthese.....	34
3.3.1 Fysische grondslag.....	34
3.3.2 Praktische concept implementatie.....	36
3.3.2.1 Spatial aliasing effecten.....	36
3.3.2.2 Truncation effecten.....	37
3.3.2.3 De amplitude error en spectrale error...	38
3.3.3 Luidspreker arrays.....	38
3.3.4 Synthese operator.....	39
3.3.5 Ruimte akoestiek.....	41
3.3.8 MPEG-4 & Het CARROUSO project.....	42
3.3.6 Bouwplan en begroting.....	43
4. Golfveld synthese: nu en in de toekomst?.....	44
4.1 Initiatieven.....	44
4.1.1 Golf veld synthese, TU Delft, Nederland.....	45
4.1.2 IOSONO GmbH, Fraunhofer, Duitsland.....	45
4.1.3 M3S Module, Sonic Emotion ag, Zwitserland.....	45
4.1.4 Wave Field Synthesis, Fouraudio, Duitsland.....	46
4.1.5 Wave Field Synthesis, IRCAM, Frankrijk.....	46
4.1.6 Wonder, Marije Baalman, Duitsland.....	47
4.1.7 192 speaker sensation, Game of Life, Nederland.....	48
4.2 Toekomstmogelijkheden?.....	49
4.2.1 Artistiek.....	50
4.2.1 Maatschappelijk.....	53
4.3 Conclusie & aanbevelingen.....	56
Literatuurverwijzing.....	60
Bijlage A: Documentatie ADSR panner.....	64
Bijlage B: Documentatie OCTA panner.....	66
Bijlage C: The Rayleigh 2.5D Operator Explained.....	68

# 1. Inleiding

In deze inleiding kunt u lezen over de context en relevantie van dit onderzoek. Het onderwerp van deze scriptie zal in vogelvlucht aan u voorgesteld worden. Daarnaast zullen de aanleiding, de doelstelling en de hoofdvraag worden geschetst en uitgewerkt. Het zal duidelijk worden hoe de scriptie is opgebouwd en hoe ik te werk ben gegaan.

## 1.1 *Aanleiding tot het onderzoek*

Bij geluidsreproductie is het er sinds de komst van de luidspreker van A. G. Bell eind 1870 om te doen geweest de reproductie zo realistisch mogelijk te maken. Daartoe was het niet voldoende om de tijd, de frequentie en de intensiteit van geluiden door middel van een microfoon en een luidspreker te reproduceren. Het meest essentiële aspect van geluid is immers de ruimtelijkheid ervan. De fascinatie van mensen voor geluid leidde zo al snel tot luidsprekeropstellingen. Geluidsreproductie op deze manier impliceert dat men het oorspronkelijke ruimtelijke karakter van geluid benadert, terwijl het slechts in zeer beperkte mate feitelijk wordt gereproduceerd. Een optimale perceptie van de gereproduceerde ruimtelijkheid van geluid bleef bij de stereofonie afhankelijk van de plek van de luisteraar binnen de opstelling, de 'sweetspot'.

Eind 1980, dus iets meer dan een eeuw na de komst van Bell's luidspreker, komt de Nederlandse natuurkundige A.J. Berkhout met een fundamenteel nieuw concept voor geluidsreproductie, genaamd golfveld-synthese (GVS). GVS is in tegenstelling tot alle andere methodes voor het construeren van de ruimtelijkheid van geluid instaat tot het reconstrueren van feitelijke ruimtelijkheid. Bij GVS is de perceptie van de ruimtelijkheid van het gereproduceerde geluid dardoor niet meer afhankelijk van de exacte locatie van de waarnemer. GVS maakt het mogelijk om geluiden op verschillende plekken in de ruimte met behoud van hun ruimtelijke eigenschappen, binnen en buiten het afluistervlak te lokaliseren. De GVS benadering maakt de ruimtelijkheid van geluid dus daadwerkelijk controleerbaar en manipuleerbaar.

Deze scriptie zal proberen inzicht te geven in de achtergronden en ontwikkelingen van geluidsreproductie en tevens aandacht besteden aan nieuwe artistieke en maatschappelijke mogelijkheden die beschikbaar zijn gekomen door de ontwikkeling van de golfveldsynthese.

## 1.2 *Doelstelling en vraagstelling*

De hoofdvraag luidt als volgt: Wat zijn de artistieke en maatschappelijke toepassingsmogelijkheden van golfveld synthese? Om inzicht te krijgen in het toepassen van de reproductie van ruimtelijk geluid wordt allereerst de vraag aan de orde gesteld hoe het komt dat wij de



geluids distributie over verschillende luidspreker systemen bestudeerd. Tevens heb ik zelf software ontwikkeld voor het aansturen van de luidsprekers. In de bijlagen zijn beschrijvingen van de verschillende tot stand gekomen software-applicaties die in de tekst worden vermeld terug te vinden.

Het golfveld synthese concept met al zijn mogelijkheden en beperkingen wordt aan het eind van dit hoofdstuk behandeld. Aan de totstandkoming van de informatie die in dit hoofdstuk te vinden is, is een diversiteit aan onderzoek voorafgegaan. De GVS literatuur is bestudeerd, er zijn interviews afgenomen, er zijn verschillende GVS huisvestende locaties bezocht en de open source software voor GVS is onder de loep genomen. Er zal uitgelegd worden dat er verschillende mogelijkheden zijn voor het implementeren en aansturen van GVS. De resultaten van het onderzoek zullen een antwoord geven op de vraag wat de beperkingen en mogelijkheden van golfveld synthese zijn.

In hoofdstuk 4 kom ik toe aan de hoofdvraag en dus aan de mogelijkheden voor artistieke en maatschappelijke toepassingen. Eerst heb ik gekeken naar de huidige toepassing van GVS, waarbij ik mij heb beperkt tot Europa<sup>1</sup>. Vervolgens heb ik mij de vraag gesteld welke toepassingen er nog meer mogelijk zouden zijn en wat de eisen zijn die dan zouden worden gesteld aan het ontwerpproces. Er wordt een idee geboden van de mogelijkheden die GVS in de toekomst kan bieden voor het creëren van virtuele auditieve ruimten en hoe deze zowel artistieke als maatschappelijke doeleinden zouden kunnen dienen. In de conclusie worden de resultaten van de drie voorgaande hoofdstukken en hun samenhang geëvalueerd.

---

<sup>1</sup> *Ik weet dat er op ander plaatsen in de wereld ontwikkelingen op het gebied van GVS gaande zijn, bijvoorbeeld in Korea, Brazilië en de VS, maar gezien de beschikbare tijd is het mij niet mogelijk geweest om die bij het onderzoek te betrekken.*

## 2. Richtinghoren

Een luisteraar percipieert bij zijn auditieve waarnemingen niet alleen timbre, frequentie respons en dynamisch bereik, maar ook richting. Met andere woorden: hij is in staat geluid te lokaliseren. Hoe komt dat proces van lokaliseren precies tot stand en welke problemen kunnen zich daarbij voordoen?

Het zien van een object dat klanken voortbrengt in relatie met het horen ervan is vanzelfsprekend een belangrijke factor bij het lokaliseren. Als er mismatch ontstaat tussen de auditief waargenomen en visueel geobserveerde positie van een bepaalde geluidsbron, veroorzaakt dit cognitieve dissonantie. Dit probleem is bekend bij sounddesign voor beeld. Voor professionele sounddesigners is een verschil van  $4^\circ$  tussen beeld en gerelateerd geluid waarneembaar, voor de gemiddelde persoon kan dat verschil oplopen tot  $15^\circ$  (Kyriakakis, 199).

Voor de auditieve lokalisatie van een klankobject gebruikt de mens drie algemene 'aanwijzingen', 'cues',

- 1) laterale cues
- 2) afstand cues
- 3) monaurale (filter) cues
- 4) ruimtelijke cues.

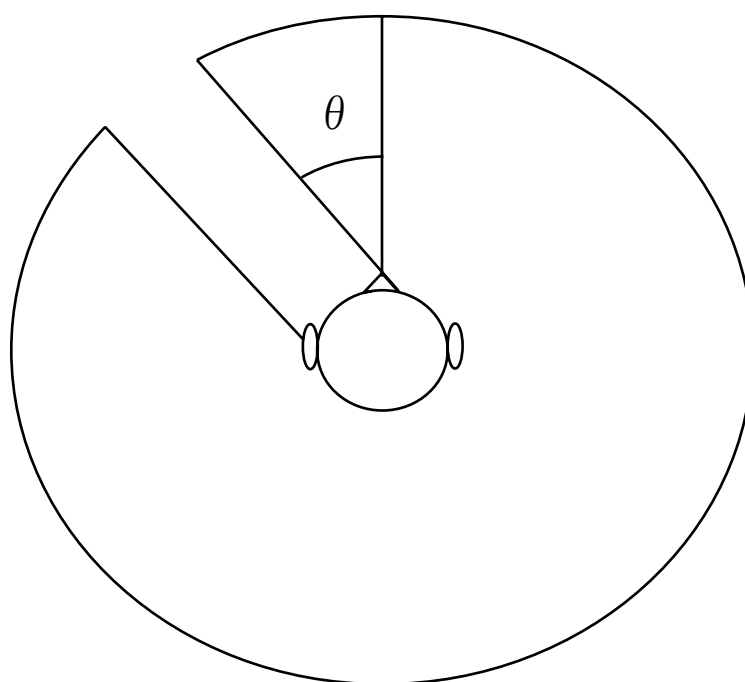
Dit hoofdstuk zal nader ingaan op deze verschillende 'cues' voor lokalisatie.

### 2.1 Laterale cues

Laterale lokalisatie is het vermogen van het gehoor om een geluidsbron te kunnen lokaliseren op het horizontale vlak. Enerzijds wordt lokalisatie mogelijk gemaakt doordat een mens twee oren heeft, die zich aan weerszijden van een hoofd bevinden, anderzijds levert de plaatsing van de oren aan weerszijden van het hoofd ook problemen in de lokalisatie op. Het is voor een mens mogelijk om verschil te horen tussen geluid dat recht van voren, van opzij of van achteren komt. De horizontale plaatsing van de oren maximaliseert deze verschillen. Als een geluidsbron niet recht voor of achter een luisteraar staat is er sprake van verschillen in luidheid en verschillen in aankomsttijd voor het linker- en het rechteroor. De verschillen in luidheid zijn bovendien frequentie-afhankelijk.

Het verschil in aankomsttijd is de meest belangrijke methode voor lokalisatie en wordt in het Engels aangeduid als 'interaural time difference' (ITD). De verschillen in luidheid worden aangeduid als 'interaural intensity difference' (IID).

Deze cues zijn vooral van toepassing op azimut lokalisatie en gelden in minder mate voor geluid wat zich boven of onder de luisteraar voordoet. Voor het lokaliseren van klanken in het verticale vlak gebruiken wij hoofdzakelijk monaurale (filter) cues. Azimut is de hoek van inval op een horizontaal vlak, links en rechts van de luisteraar. Bijvoorbeeld een azimut van  $90^\circ$  bevindt zich rechts van de luisteraar en een op  $-135^\circ$  linksachter de luisteraar. Dus links duiden we aan van  $0^\circ$  tot  $-180^\circ$  en rechts van  $180^\circ$  tot  $0^\circ$ . Het verticale vlak wordt aangeduid met de term 'elevation'. Een klankpositie recht boven de luisteraar wordt aangegeven met een elevation van  $90^\circ$  en onder de luisteraar met  $-90^\circ$ . Geluidsbronnen recht voor de luisteraar bevinden zich op  $0^\circ$  elevation en  $0^\circ$  azimut.



*Figuur 1: bolmodel voor het berekenen van 'inter aural time differences' en 'interaural level differences'.*

De afgelopen eeuw is er intensief onderzoek gedaan in de psycho-akoestische literatuur naar deze verschillen. Belangrijk is de theorie die wel wordt aangeduid als Lord Rayleigh's 'duplex theorie' van lokalisatie.

John Strutt Rayleigh was een Engelse natuurkundige die de basis heeft gelegd voor ons inzicht in wat wij laterale lokalisatie noemen, en in het bijzonder in de rol die het hoofd daarbij speelt. Wanneer ons hoofd niet tussen onze oren zou zitten, zou het eenvoudiger zijn om de perceptie-verschillen van beide oren te berekenen. Het wordt een stuk gecompliceerder doordat we wel een hoofd hebben. De geluidsgolven moeten afbuigen langs ons

hoofd voordat ze het tweede oor bereiken. Lord Rayleigh kwam rond 1900 met een model waarin er rekening mee gehouden werd dat het hoofd moet worden gezien als een bol, zoals in figuur 1. Dit bol-model bracht een aantal interessante met inzichten over IID's en ILD's aan de oppervlakte.

### 2.1.1 Interaural time difference (ITD)

Het verschil in tijd waarmee een klank bij onze oren aankomt, wordt door de hersenen gebruikt om de locatie ervan te bepalen. Gemiddeld is het kleinste verschil in aankomsttijd van een geluidsbron dat wij waar kunnen nemen ongeveer 30  $\mu\text{s}$  (Begault, 1994). Bij een temperatuur van 20 graden is dat ongeveer 1 cm verschil in weglengte. Als je nagaat dat één sample periode van een gewone CD (44.100 samples per seconde) 22.7 $\mu\text{s}$  duurt, dan is het vermogen tot lokalisatie van ons gehoor dus behoorlijk scherp. Of moeten we misschien veeleer concluderen dat de sample frequentie van een cd niet zo nauwkeurig is...?

Wanneer een geluidsbron zich rondom een luisteraar verplaatst, wordt het tijdsverschil tussen de oren eerst groter en daarna weer kleiner. Het maximale verschil dat kan ontstaan, hangt af van de breedte van ons hoofd. Onze hersenen kunnen het beste de frequentie van een klank lokaliseren waarvan de volledige golflengte groter is dan de afstand tussen de oren. Als beide even groot zijn, dan komt het geluid immers in fase aan bij beide oren. Het trommelvlies beweegt dan gelijktijdig in tegen-fase in de beide oren, waardoor ITD lokalisatie wordt bemoeilijkt. Ongeveer hetzelfde geldt voor een exacte tegen-fase in beide oren. Als de halve periode van een golflengte aankomt bij het tweede oor dan zou een geluid of van rechts of van links kunnen komen. Voor frequenties die kleiner zijn dan het tijdsverschil wordt het steeds lastiger om te lokaliseren, omdat dan altijd de kans bestaat dat de periode bijvoorbeeld precies na twee of drie keer de omloop, of in tegen-fase, bij het tweede oor aankomt.

De interaural time difference kan worden weergegeven met het bolmodel van Rayleigh in de formule

$$d = (r * ((0.5\pi - \Delta \theta) + \sin(\theta))) / c$$

$d$  = ITD (sec.)

$c$  = geluidssnelheid (m/s)

$\Delta \theta$  = extra afstand rond het hoofd die ontstaat onder een bepaalde azimut ( $0.5\pi - \theta$ )

$r$  = halve afstand tussen de oren (m)

$\theta$  = azimut (rad.)

De maximum frequentie waarbij door ITD gelokaliseerd wordt kan worden weergegeven door de formule (Howard & Angus, 2001)

$$f = 1000 / (2r * \theta + \sin(\theta))$$

f = max. frequentie (Hz.)

r = halve afstand tussen de oren (m)

$\theta$  = azimut (rad.)

Dat betekent dus bijvoorbeeld dat iemand met een hoofd met een middellijn van 18 cm niet in staat zal zijn om geluiden met een frequentie van hoger 780 Herz, en die zijn oren horizontaal onder een hoek van 90 graden bereiken, goed te lokaliseren door ITD.

Voor het meten van de aankomsttijdsverschillen moet bovendien nog een onderscheid gemaakt worden tussen pulsen en periodieke geluiden. Bij een pulsachtig geluid wordt gekeken naar de onset-ITD en de offset-ITD. De onset-ITD is het verschil in aankomsttijd bij beide oren en de offset-ITD is het verschil in uitdooftijd tussen de oren. Bij een periodiek geluid vindt er een continue ITD plaats. De golfvormen die aankomen bij beide oren kunnen zodanig in tijd verschoven deze over elkaar passen. Deze constante tijdsverschuiving wordt 'interaural phase difference' (IPD) genoemd (Slis, 1996).

### 2.1.2 Interaural Intensity Difference (IID)

IID wordt veroorzaakt door ons hoofd. Geluid van rechts komt zwakker door in het linkeroor, omdat het hoofd het geluid afschermt. Dit wordt in verschillende literatuur hoofdschaduw genoemd (Blauert, 1983; Begault, 1994; Sliss, 1996)

Een object, bijvoorbeeld het hoofd, vormt een obstakel voor een geluidsgolf wanneer het hoofd groter is dan één derde van de golflengte van de geluidsgolf (Howard & Angus, 2001). Voor het hoofd van een mens wordt uitgegaan van een gemiddelde breedte van 18cm. Iedere frequentie boven een ondergrens van 637 Hertz ondervindt dus demping door het hoofd bij een azimut van 90 graden. Omdat een geluid met een frequenties van 637 Hz of hoger een één derde golflengte hebben van minder dan 6 cm. Voor lagere frequenties is IID geen ruimtelijke lokalisatie cue omdat laag frequente golven afbuigen om objecten die kleiner zijn dan eenderde van de golflengte. Naar mate de frequentie toeneemt neemt, wordt de afschermdende werking van het hoofd ten aanzien van het overstaande oor groter. Bijvoorbeeld 1 kHz wordt 10 dB verzwakt, 6 kHz ongeveer 20 dB en een golf van 10 kHz tot ongeveer 35 dB (Feddersen, 1957; Middlebrooks and Green, 1991; Begault, 1994).

Met deze gegevens kunnen we een formule opstellen die benadert welke frequenties wij lokaliseren door middel van IID onder een bepaalde azimut.

$$f = 1/3 * (c / (r * \sin((\theta + 0.5\pi) / 2) * 2))$$

f = frequentie waarbij diffractie optreed (Hz.)

c = geluidssnelheid (m/s)

r = halve afstand tussen de oren (m)

$\theta$  = azimut (rad.)

### 2.1.3 ITD Envelope Cue

Tot ongeveer 1960 werd aangenomen dat de duplex-theorie IID en ITD cues opereerde over exclusieve frequentie domeinen. Namelijk lager dan grofweg 1500 Hertz is het ITD domein en daarboven het IID domein. Later kwam men tot het inzicht dat tijd informatie ook functioneert bij hogere frequenties omdat timing verschillen in aankomst van het amplitude verloop (envelope) ook waargenomen kunnen worden (Leakey, Sayer & Cherry, 1958; Henning, 1974). In technische termen noemen we dit het moduleren van een dragende golf door een laagfrequente golfvorm, ofwel amplitude modulatie. Hierbij heeft de frequentie van de dragende golf geen enkele invloed op de lokalisatie, het is het verschil in aankomst tijd van het amplitude verloop wat ons in dit in staat stelt tot lokaliseren. Hier wordt in hoofdstuk 2.4.3 verder ingegaan.

## 2.2 Afstand cues

Auditieve lokalisatie is driedimensionaal, namelijk in de hoogte, in de breedte en in de diepte(afstand). Naast richtingbepaling door middel van laterale lokalisatie is het gehoor dus ook in staat de afstand van een klank te bepalen. De laatste jaren is er een toename in onderzoek naar de auditieve perceptie van afstand. Dit hangt samen met de commerciële interesse naar virtueel auditieve displays. Dit zouden bijvoorbeeld applicaties voor blinden kunnen zijn waarin zij puur auditief kunnen navigeren. Een goede werking van dergelijke applicaties moet niet alleen gebruik maken van het vermogen om klanken lateraal te lokaliseren, maar ook van het vermogen van mensen om de virtuele diepte of afstand van een klank waar te kunnen nemen (Speigle & Loomis 1993; Shinn-Cunningham, 2000). Bij het onderzoek naar de perceptie van afstand tot een geluidsbron worden verschillende experimenten gedaan die hoofdzakelijk worden onderverdeeld op basis van twee methodologische verschillen, namelijk de verschillen tussen een absolute en relatieve perceptie van afstand. Daarnaast blijkt er sprake te zijn van verschillen tussen het inschatten van de afstand van een virtuele geluidsbron over speakers en een daadwerkelijke geluidsbron. (Begault, 1994).

### 2.2.1 *Absolute perceptie vs. relatieve perceptie*

Lokaliseert men een geluidsbron door te vergelijken (bijv. een geluidsbron bevindt zich twee maal zo ver weg als een andere) dan hebben we het over relatieve lokalisatie. Lokaliseert men zonder enige referentie en puur afhankelijk van de eigenschappen van het gehoor zelf (bijv. een geluidsbron bevindt zich op twee meter afstand) dan hebben we het over absolute lokalisatie.

Absolute perceptie is dus het vermogen om de afstand van een geluidsbron in te schatten zonder cognitieve bekendheid met de betreffende geluidsbron te hebben en de relatieve afstand perceptie van een geluidsbron is de impressie van afstand die verkregen wordt doordat er op verschillende afstanden naar de klank geluisterd is (Begault 1994). Wanneer men een geluidsbron lokaliseert door het timbre van de klank te koppelen aan het luidheidniveau, noemen we dit dus ook relatieve afstandsperceptie. Bijvoorbeeld, men lokaliseert de afstand tot een ander persoon doordat er geschreeuwd of gesproken wordt op grote afstand.

### 2.2.2 *Virtuele geluidsbron vs. daadwerkelijke geluidsbron*

Voor wie geïnteresseerd is in toepassingsmogelijkheden van geluidsreproductie is vooral de vraag interessant hoe men de afstand van een virtuele geluidsbron zonder gecorreleerd visueel beeld bepaald. Wanneer een relatie bestaat tussen een visueel object en een virtuele geluidsbron dan beïnvloedt dat de auditieve perceptie van afstand. Dit effect noemt met ventriloquisme, omdat een buikspreker immers ook in staat is een geluid ergens te lokaliseren waar het niet werkelijk vandaan komt. In applicaties voor auditieve displays is het vanzelfsprekend in de eerste plaats wenselijk dat de lokalisatie van klanken niet afhangt van de waarneming van visuele objecten (Begault, 1994).

Voor het bepalen van een afstand van een klank wordt er onderscheid gemaakt tussen verschillende cues. De verschillende cues die in de bescheiden hoeveelheid literatuur genoemd worden zijn:

- Absoluut geluidsniveau
- Inter aural intensity differences
- Direct/galmend geluid ratio
- Bewegingsparallax
- Verandering in spectrale inhoud

### 2.2.3 Absoluut geluidsniveau (luidheid)

Luidheid is de meest primaire cue voor het bepalen van de afstand van een klank. Voor een rondom afstralende puntbron, zoals bijvoorbeeld het gezoem van een vliegje, geldt dat als zijn afstand tot de waarnemer verdubbelt, dat de geluidsenergie van zijn gezoem dan 6 dB afneemt. Voor een niet rondom afstralend object zoals een snelweg, wat in de natuurkunde een lijnbron heet, geldt een energie afname van 3dB per afstandsverdubbeling. Er is sprake van de 'omgekeerde kwadraat wet' : dus als de afstand van de waarnemer tot een puntbron c.q. drie maal zo groot wordt, verzwakt de geluidsenergie 18dB. Deze omgekeerde kwadraatwet is slechts een richtlijn. Onze perceptie van luidheid hangt even eens af van de energie per kritische frequentie band. Bijvoorbeeld lage frequenties zijn voor ons gehoor minder luid bij 80dB dan hoge frequenties op dat niveau. Voor deze frequentie afhankelijke luidheidsperceptie bestaat een grafiek voor gelijke luidheid, ook wel bekend als de Fletcher-Munson grafiek.

Hoewel het luidheids-niveau varieert met de afstand van een klank, kan luidheid de oren alleen van relatieve informatie over de afstand voorzien. Zoals bijvoorbeeld in een virtueel auditieve display zal een fluisterende stem zonder additionele ruimtelijke eigenschappen al snel dichtbij klinken. Loomis, Klatzky en Golledge (1999) bevestigen dat de absolute luidheid zich gedraagt als relatieve afstand cue bij het lokaliseren van klanken. Maar, zegt Shinn-Cunningham (2000) als de luisteraar bekend is met de luidheids eigenschappen van de klank zelf dan wordt de absolute luidheid als absolute cue gebruikt. In het geval van een virtueel auditieve display zou men dus het beste uit kunnen gaan van de bevindingen van Loomis, Klatzky en Golledge. Alleen in een 'natuurlijke' omgeving waar men bekend is met de klanken die men hoort is absolute luidheid een absolute cue.

### 2.2.4 Inter aural intensity differences

De hierboven beschreven "omgekeerde kwadraat wet" is dus in principe een relatieve cue voor geluid op enige afstand, maar de interactie met het hoofd (IID) is van belang voor klanken die zich binnen de straal van een meter van de luisteraar afspelen. Empirisch onderzoek naar overdracht van omgeving geluid aan het gehoor wijst uit dat de er sprake kan zijn van aanzienlijke verschillen in de luidheidsperceptie van het linker- en het rechteroor als de afstand tussen geluidsbron en waarnemer kleiner is dan een meter (Shinn-Cunningham, 2000). Deze ratio van verschillen kunnen wederom berekend worden volgens het bol-model van Lord Rayleigh. In tegenstelling tot de absolute luidheid cue is de IID ratio cue veel robuuster omdat deze alleen afhangt van de locatie van de klank en onafhankelijk is van het niveau van de geluidsbron. Maar wat zijn dan wel absolute afstand cues voor klanken op grotere afstand?



### 2.2.5 Direct/galm ratio

De direct/galm-ratio betreft het luidheidsverschil tussen het oorspronkelijke geluid en het geluid van de galm ervan. Voor ver afstaande geluidsbronnen die reflecteren in een ruimte is de luidheid van de galm grofweg onafhankelijk van de locatie van de geluidsbron. Dus voor een ver afstaande bron geldt dat de luidheid van het directe geluid relatief aan het galmende veld omgekeerd evenredig varieert met de afstand van de bron. Voor dichtbijstaande geluidsbronnen is het wel zo dat de galmende energie bij oren varieert met de locatie (Shinn-Cunningham, 2000). Dit komt doordat de luidheid van de eerst aankomende golffronten sterk afhankelijk is van de weglengte voor dichtbijstaande bronnen die via de vloer en het plafond de oren bereiken. Voor dichtbijstaande bronnen op één lijn met het middenvlak van het hoofd geldt dat beide oren dezelfde galm energie ontvangen, maar het totale energie niveau varieert met de afstand. Nochtans wanneer de geluidsbron lateraal gepositioneerd is, dan is de galm bij het verste oor in essentie onafhankelijk van de bronafstand. Dit betekende dat de direct/galm ratio als afstandscue zowel in het echte leven als in een virtuele realiteit bepalende bijdrage leveren aan onze perceptie.

### 2.2.6 Bewegingsparallax

Wanneer een luisteraar in beweging is ten opzichte van een geluidsbron vergroot dit de afstandsinformatie. Deze bewegingsparallax is een analogie met de visuele ruimte perceptie. Namelijk de afstand kan berekend worden door de hoek die gevormd wordt door twee rechte lijnen die vanuit een object getrokken zijn naar twee verschillende observatie punten. Dus als de luisteraar er van uit gaat dat de locatie van de geluidsbron stationair is, kan hij over de grootte van zijn verplaatsing de verandering in azimut aanvoelen dankzij zijn laterale lokalisatie mechanismen. In principe kan hij dus de afstand berekenen met

$$A = B \sin(\theta_2) / \sin(\theta_2 - \theta_1)$$

A = afstand (m)

B = geluidsbron

$\theta$  = azimut (rad.)

Het lokaliseren van een klank door enkel bewegingsparallax is alleen mogelijk wanneer de bron een stationaire locatie heeft. In het geval van bewegende klanken moet altijd een combinatie gemaakt worden van verschillende afstand cues (J. M. Speigle & J.M. Loomis, 1993)

### 2.2.7 *Verandering in spectrale inhoud (klankkleur/timbre)*

De ervaring die een luisteraar heeft met een bepaalde geluidsbron in een bepaalde ruimte is van significant belang in ieder model voor auditieve afstandsperceptie. Wanneer men een klank in een virtuele geluidsomgeving plaatst moet er beoordeeld kunnen worden wat de cognitieve associaties zijn met die klank. Wanneer een klank puur synthetisch is zal een luisteraar relatief meer tijd nodig hebben om ervaring op te doen met de veranderingen van de afstandcues over verschillende gesimuleerde afstanden. Het is bijvoorbeeld eenvoudiger om een fluisterende stem op 10cm van het hoofd te simuleren dan op 10m (Begault, 1994). De spectrale inhoud van een klank is onder andere gerelateerd aan de luidheid van de geluidsbron, de mens maakt dus fouten bij het inschatten van de afstand van luide en zachte klanken. Maar naast spectrale eigenschappen van de geluidsbron is de spectrale inhoud zelf onderhevig aan atmosferische condities, zoals de temperatuur en moleculaire absorptie van de lucht. In tegenstelling tot wat velen denken is de invloed op de perceptie van afstand van deze condities vrij nihil. Absolute luidheid, bekendheid met de geluidsbron en galm/direct cues zijn in verhouding van een veel grotere invloed op de afstandperceptie. De filterende absorptie van de lucht gaat met name op voor de vroege reflecties en de galm van een klank in een ruimte. Dit verschijnsel werkt in een veel mindere mate in op het directe geluid.

Binnen een bereik van grofweg een meter insinueert een toenemende nadruk op laag frequente geluidsenergie duidelijk de nadering van een geluid. Dit fenomeen noemt men klankverduistering: hoogfrequente geluiden worden als ze de waarnemer benaderen als het ware verduisterd door de nabijheid van geluiden met een lage frequentie. Jens Blauert (1983) stelt dat deze regel begint niet meer te gelden wanneer een geluidsbron buiten bereik van ongeveer 2 meter van de luisteraar komt. Wanneer een geluidsbron meer afstand begint te nemen worden in kleine mate de hoge frequenties geabsorbeerd onder invloed van de luchtvochtigheid en de temperatuur (Begault, 1994). Een en ander betekent dat het mogelijk is om in een virtueel geluidssysteem een zogenaamd 'low pass-filter' te implementeren om de suggestie van een grotere afstand te wekken: daarmee wordt dan de overmaat aan hoog-frequent geluid weggefilterd.

## 2.3 Monaurale (filter) cues

Mede voor het lokaliseren op het horizontale vlak maar met name belangrijk voor lokaliseren van geluidsbronnen op het verticale vlak zijn de monaurale lokalisatie cues. Met monaurale lokalisatie wordt bedoeld: de reflectie en de diffractie van geluidsgolven op het hoofd, de schouders, de torso, het type kleding en de pinna (oorschelp) die in combinatie met resonanties in de gehoorgang bij het trommelvlies van één oor aankomen. Het ef-

fect of karakter van deze objecten op geluidswaarneming wordt bepaald door de richting en afstand van waar af de klank daarop wordt geprojecteerd. Begault (1994) beschrijft dat het bovenlichaam en de schouders een grote invloed hebben op de klank kleur van frequenties tussen de 200 en 2000 Hertz. Zo geven schouders en bovenlichaam een boost van 4dB aan frequenties tussen 250 en 500 Hertz en een demping van 2dB tussen 800 en 1200Hz. Maar veel interessanter en voor de ervaring van klank veel belangrijker is het karakter van de pinna.

### 2.3.1 *De pinna*

Het is de unieke onregelmatig gevouwen vorm van het oor waardoor jij de klanken hoort zoals alleen jij ze hoort waardoor je de klanken hoort zoals je ze hoort. De grillige vorm geeft in het bijzonder een klank boven de 4 kHz, frequentie afhankelijke amplitudes en kleine vertragingen. In andere woorden, een klank uit verschillende richtingen wordt in de pinna verschillend gereflecteerd. Door zijn positie krijgt de klank een unieke kleur mee van het oor. Alle klanklocaties op het horizontale vlak en het verticale vlak worden in de pinna in hun eigen richting gereflecteerd, zou je kunnen zeggen. Het is dus zo dat de vorm van de oorschelp invloed heeft op de eigenschappen van de signaalinput en dus op wat de waarnemer hoort. Dit is de akoestische vingerafdruk waarmee ons gehoor onder andere de invalshoek berekent. Deze signaalverwerking wordt wiskundig omschreven in de 'head related transfer function'(HRTF).

## 2.4 Ruimtelijke cues

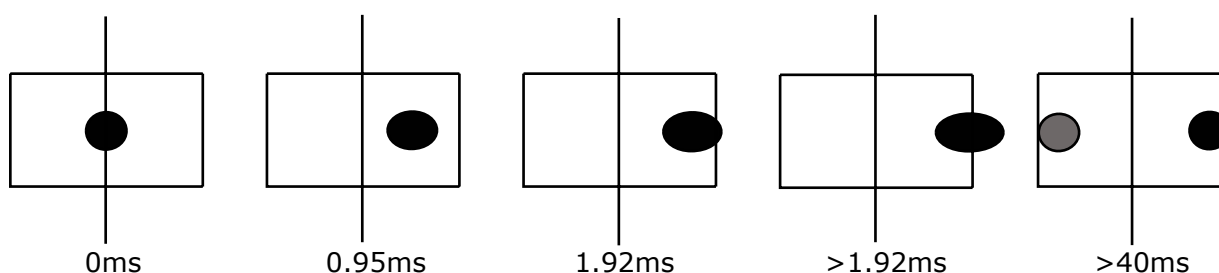
Naast de hierboven besproken cues voor geluidslokalisatie zijn er nog enkele andere psycho-akoestische effecten ontdekt die een bijdrage leveren aan het lokaliseren van geluid door een luisteraar. Deze zullen in de hiernavolgende drie paragrafen worden besproken.

### 2.4.1 *Het Haas-effect*

Het Haas-effect is een psycho-akoestisch effect dat gebaseerd is op het verschil in aankomsttijd van een geluid en de aankomsttijd van de reflecties van dat geluid in de ruimte waarin het ten gehore wordt gebracht. Het Haas-effect, ook bekend als de wet van het eerste golf front of het 'precedence effect', is vernoemd naar Helmut Haas die het beschreef in zijn doctorale verhandeling van 1951. Het verklaart dat wij geluid uit de directe richting van de bron waarnemen. De daaropvolgende eerste reflecties die bijvoorbeeld via de muren op een luisteraar afkomen, worden door het gehoor als één met het directe geluid beschouwd en niet als op zichzelf staande geluidsbronnen. Het Haas-effect treedt alleen op wanneer de reflecterende oppervlakte bij een geluidssnelheid van 344 m/s minder dan 10 tot 14 meter

van de luisteraar verwijderd zijn. Reflecties later dan ongeveer 40 ms worden, waargenomen als een echo. De reflecties van een puls worden eerder als echo waargenomen dan die van een periodiek klinkend geluid.

In de elektro-akoestiek wordt uitgebreid gebruik gemaakt van de mogelijkheden die Haas biedt. Bijvoorbeeld wanneer één geluidsbron over de twee luidsprekers van een stereo systeem wordt gereproduceerd en het signaal over de linker luidspreker een fractie vertraagd wordt, dan zal door het gehoor het signaal uit de linker luidspreker als een reflectie van de rechter luidspreker worden beschouwd en dus rechts wordt dus een fantoombeeld gelokaliseerd. De gewenste vertraging kan eenvoudig berekend worden door de gewenste afstand vanaf het midden tussen de luidsprekers te delen door de geluidssnelheid. De maximale vertragingstijd relateert zich tot afstand vanaf het midden tot de luidspreker. Wordt de vertragingstijd langer gemaakt dan de gerelateerde afstand dan zal het klankbeeld in eerste instantie breder worden. Wordt de vertraging groter dan de eerder genoemde 40ms dan wordt een echo waargenomen (Begault, 1994). Zie ook figuur 2.



Figuur 2: Perceptuele effect van een vertraging van 0-40ms op de linker luidspreker.

#### 2.4.2. Vroege reflecties en galm

Het Haas-effect leert dat wij het directe pad van een klank in een ruimte kunnen onderscheiden van het gereflecteerde geluid van die ruimte. Het directe pad waarover een klank bij de oren aankomt is het originele karakter van de geluidsbron. Het is de weg van de klank door het medium zonder omwegen naar onze oren. De langere paden, de klanken die via de muren onze oren bereiken, noemen we de vroege of eerst aankomende reflecties. De vroege reflecties of nog specifieker, de vertragingstijden tussen hen en het directe geluid correleren met de afstand van bron tot nabijgelegen muren of andere grote objecten tot de luisteraar. Wanneer de reflecties van een reflectie zich gaan opbouwen kan de vergelijking met een exponentiele decompositie van 'ruis' gemaakt worden (Begault, 1994), dit wordt over het algemeen galm genoemd. Zoals we gelezen hebben in hoofdstuk 2.1.1 kan ons oor een heel klein verschil in tijd waarnemen en is het dus aannemelijk dat de vroege reflecties niet gemaskeerd zijn voor het gehoor en bijdragen aan een ruimtelijke perceptie. Gemiddeld verstrijkt er ca. 60-100ms voor er reflecties van de eerste reflecties (galm) optreden.

Zoals de looptijden van de reflecties correleren met de afstand tot de objecten correleert de amplitude omgekeerd evenredig met de afstand tot de objecten. Recenter onderzoek binnen de psychoakoestiek zoals dat van B. Shinn-Cunningham (2003) wijst uit dat het gehoor ongevoelig is voor de fijne details in het patroon van vroege reflecties die de oren bereiken. Zij stelt dan ook voor om bij de creatie van virtuele ruimtes versimpelde galm modellen te gebruiken. Maar in veel bestaande akoestische modellen worden de afzonderlijke reflecties wel berekend. Dit wordt op een vergelijkbare wijze gedaan als bij het navolgen van lichtstralen waarbij de hoek van inval gelijk is aan de hoek van reflectie. Hier over meer in hoofdstuk 3.3.5. Met behulp van de stelling van Pythagoras ( $a^2 + b^2 = c^2$ ) kan de weglengte en bijhorende vertragingstijd ( $C = 344\text{m/s}$ ) berekend worden. Zoals eerder uiteengezet neemt de amplitude van het gereflecteerde geluid omgekeerd evenredig af met de afstand. Daarnaast wordt een fractie van de geluidsenergie, in Watt  $\text{p/m}^2$  geabsorbeerd door de reflecterende oppervlakte. Zaalakoestisch pionier Wallace Clement Sabine (1868-1919) ging er van uit dat een open raam een absorptie heeft van  $\alpha = 1$ : het geluid dat bij een open raam aankomt wordt in het geheel niet gereflecteerd, het verdwijnt naar buiten, wordt dus volledig geabsorbeerd. De absorptie coëfficiënt voor verschillende materialen is op te vragen. De exacte procedure voor het verkrijgen van absorptie coëfficiënten is beschreven in British Standard BS EN ISO 354:2003. Het reflecterende vermogen kan daarmee berekend worden.

$$\text{vermogen}_{\text{gereflecteerde}} = \text{vermogen}_{\text{invalende}} * (1 - \alpha)$$

De totale absorptie van een kamer is de som van absorptie van alle verschillende oppervlakten. Doordat we het volume en het absorberende vermogen van een ruimte kunnen berekenen kunnen we eveneens de galmtijd van die ruimte berekenen. Hiervoor gebruiken we in de meeste gevallen de metrische versie van Sabine's vergelijking.

$$T_{60} = 0.161V / S \alpha$$

T60 is een willekeurige referentie voor de duur die de galm nodig heeft om 60dB beneden het niveau van het directe geluid te komen. Van origine is de bedoeling van deze referentie om een waarde van 'relatieve stilte' aan te geven. Deze volstaat in de meeste gevallen. De tijd die de galm nodig heeft om tot een niveau beneden de ruisvloer te komen, gebruiken wij in psychoakoestisch opzicht om de grootte van een ruimte in te schatten (S. Hameed, 2004). Vanuit virtueel oogpunt, wordt de direct/galm ratio (D/G ratio) via een elektroakoestisch systeem vaak geïnterpreteerd als cue voor perceptie van ruimte. Dit is niet juist omdat deze D/G ratio alleen informatie bevat over de afstand van een geluidsbron in een

ruimte ten opzicht van een luisteraar. Als het niveau van de galm hoog is ten opzichte van het directe impliceert dat alleen dat de bron ver van de luisteraar verwijderd is. In virtuele audio displays is het dan ook verstandig om deze D/G ratio parameter alleen te koppelen aan de positionering van de geluidsbron positie en niet te integreren in een algoritme voor virtuele ruimte simulatie.

#### 2.4.3 *Het Franssen-Effect*

In 1960 werd door N.V. Franssen een ander opmerkelijk psycho-akoestisch fenomeen ontdekt dat samenhangt met geluidslokalisatie op basis van 'interaural envelope differences' IED (zie 2.1.3). IED is een lokalisatie mechanisme dat onder andere lokaliseren van geluid in reflecterende ruimtes verklaart. Het verschil tussen het amplitudeverloop van het directe geluid en dat van de langzaam opbouwende reflecties wordt 'envelope difference' genoemd. Een luisteraar lokaliseert een geluidsbron op basis van het directe pad en niet dat van de reflecties. Door het abrupte begin van het directe geluid kunnen wij bepalen dat het geluid uit die richting komt en niet uit de richting van de langzaam opbouwende reflecties. Het opvallende is dat de lokalisatie van het geluid niet alleen op basis van het tijdsverschil tussen directe geluid en de reflectie plaatsvindt, maar ook op basis van 'envelope differences'. Dit kon overtuigend worden aangetoond in een stereofonische luidsprekeropstelling. Wanneer een sinustoon abrupt wordt aangezet op luidspreker 1 en vervolgens langzaam wordt weggeschoven en over diezelfde periode langzaam wordt ingeschoven op luidspreker 2 waardoor dus als het ware kunstmatig een groep van langzaam opbouwende reflecties wordt gegenereerd - blijven de luisteraars het sinusgeluid uit de luidspreker 1 waarnemen. Zelfs wanneer de luidspreker ontkoppeld wordt en de luisteraars zien dit, dan blijven ze de ontkoppelde luidspreker als bronlocatie waarnemen (Hartmann, W. M., & Rakerd, B., 1989). Het Franssen effect is een heel sterk psycho-akoestisch fenomeen, dat zich dus voordoet ten gevolge van geluidslokalisatie op basis van 'interaural envelope differences'. De sterke auditieve illusie die optreedt als het Franssen effect wordt toegepast met behulp van een sinustoon is overigens wel veel minder sterk bij bijvoorbeeld roze ruis. Geluidsvoorbeelden zijn te vinden op: "<http://www.parmly.luc.edu/parmly/franssen.html>".

Voor andere, complexere geluiden zou dus dit simpele principe in beginsel al een mogelijkheid kunnen bieden tot zinvolle toepassing ten behoeve van het ruimtelijk ervaren van elektronische muziek. In bijlage A staat een beschrijving van een panning-effect gebaseerd op de ADSR (Attack-Decay-Sustain-Release) envelopes waarmee het Franssen effect gegenereerd kan worden. Het Franssen-effect is een interessant gegeven, omdat het dus binnen de conventionele stereofonie al een mogelijkheid impliceert tot een beperkte mate van manipulatie van geluidslokalisatie.

### 3. Elektro-Akoestiek

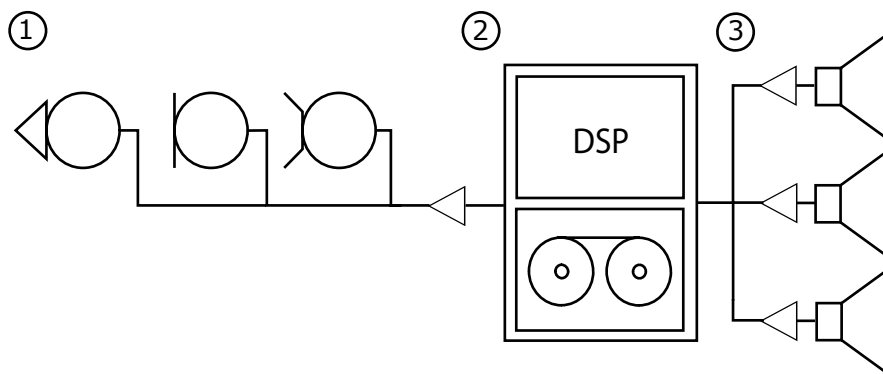
Nadat in het voorgaande hoofdstuk een overzicht is gegeven van cues voor geluidslokalisatie en bestaande inzichten in de psycho-akoestiek die verklaren hoe wij de ruimtelijkheid van geluid kunnen waarnemen, zal in dit hoofdstuk een overzicht worden gegeven van de elektro-akoestiek, dus van de manieren waarop men in de loop van de tijd de ruimtelijkheid van geluid heeft weten te reproduceren. Daarin zijn in grote lijnen drie manieren te onderscheiden:

- 1) monauraal (MONO)
- 2) stereofonie
- 3) golfveldsynthese.

Deze zullen achtereenvolgens in dit hoofdstuk worden besproken. Incidenteel zal ook al worden verwezen naar de implicatie van de verschillende vormen van elektro-akoestiek voor artistieke en maatschappelijke toepassingsmogelijkheden.

#### 3.1 Monauraal (MONO)

In november 1877 kwam Thomas A. Edison met de fonograaf. De fonograaf kan via één kanaal geluid opnemen en afspelen. Ongeveer gelijktijdig zorgde de ontwikkeling van de telefoon door Alexander G. Bell en Thomas A. Watson voor het ontstaan van de eerste elektronisch-akoestische transmissie. Deze ontwikkelingen samen vormde de basis voor het eerste elektronisch-akoestische systeem. Dit is een geluidsreproductieketen bestaande uit een (voorversterkte) microfoon (1), een eventuele registratie (2) en een versterkte luidspreker (3) (zie: figuur 3). Alle vormen van hedendaagse elektro-akoestische systemen zijn meestal voorzien van 'digital signal processing' (DSP). Een DSP wordt bijvoorbeeld gebruikt om een klank die door een microfoon is opgevangen met een computer te kunnen bewerken, dit kan realtime gebeuren maar ook na eventuele registratie.



*Figuur 3: Schematische tekening voor geluidsreproductie.*

Mono geluid is een reproductie van een geluid via één kanaal waarbij het geluid door één versterker over één of meerdere luidsprekers wordt weergegeven. Wanneer meerdere luidsprekers met het zelfde signaal worden gevoed, hebben we het over multipel-kanaal mono. Het geluid wordt in iedere richting gelijk gedistribueerd vanuit één of meerdere punten in die ruimte. Als er sprake is van slechts één luidspreker wordt de ruimtelijke perceptie van de geluidsbron bepaald door de akoestiek van de ruimte. De individuele speaker kan dan worden gezien als een puntbron in een ruimte. Wanneer twee luidsprekers met één identiek signaal worden gevoed zal het voor een luisteraar die midden voor de luidsprekers staat, lijken alsof de geluidbron zich tussen de luidsprekers bevindt. Dit psycho-akoestische fenomeen wordt fantoomlokalisatie genoemd. Je kunt je dit voorstellen als een geluidsbron die zich achter een muur bevindt, waarbij de speakers het geluid produceren dat zich langs weerszijden van de muur op de luisteraar projecteert.

### 3.2 Stereofonie

De meeste principes van stereofonie zijn ontdekt rond 1930 van de vorige eeuw dankzij de onderzoeksinspanningen van A. D. Blumlein. Het woord stereofonie komt voort uit het Griekse woord stereos, wat vast lichaam of driedimensionaal betekend. Stereofonie beperkt zich niet tot de twee-kanaal-luidspreker opstelling, ook binaurale technieken voor hoofdtelefoon en 'surround' systemen vallen onder de noemer stereofonie. Al aan het einde van de 19e eeuw, in de vroege dagen van de fonograaf, werd met stereo geëxperimenteerd. Clément Ader ontwikkelde in 1880 een verbetering voor de telefoon van Bell en Watson en bewerkstelligde een telefoonnetwerk in Parijs. Hij introduceerde in 1881 tijdens de 'Paris International Electrical Exhibition' de eerste vorm van stereofonie. Ader maakte gebruik van telefoontransmissie door twee carbon microfoons van een telefoon op het podium van Opera Parijs 'Palais Garnier' te verbinden met setjes van twee telefoonontvangers in een aantal kamers van een nabij gelegen Palais de l'Industrie. Dit stelde luisteraars in die kamers tot hun verrassing in staat om niet alleen het geluid van de opgevoerde opera te horen, maar ook een indruk te krijgen van de globale positie van de acteurs op het podium: het geluid van een zanger links op het podium leek uit ook in de kamers waar het geluid werd ontvangen van links vóór de luisteraar te komen etc. Het wetenschappelijk tijdschrift de 'Scientific American' schreef hier in die tijd het volgende over:

*We will now consider the new acoustic effect that Mr. Ader has discovered, and applied for the first time in the telephonic transmission at the Electrical Exhibition. Every one who has been fortunate enough to hear the telephones at the Palais de l'Industrie has remarked that, in listening with both ears at the two telephones, the sound takes a special character of relief and localization which a single*



*receiver cannot produce. This phenomenon is very curious, it approximates to the theory of 'binaural audition', and has never been applied, we believe, before to produce this remarkable illusion to which may almost be given the name of 'auditive perspective'.*

Het was A.D. Blumlein die ongeveer 50 jaar later in Engeland met zijn onderzoek naar microfoontechnieken voor stereoreproductie voor het eerst inzag dat het mogelijk was geluid voor een luisteraar te lokaliseren was op het horizontale vlak tussen twee speakers door een gewogen combinatie van tijd- en intensiteit- verschillen tussen het geluid uit elk van beide speakers. H. Fletcher, J.C. Steinberg en W.B. Snow bij Bell Laboratories in de Verenigde Staten stelden al in 1934 een andere benadering voor. Optimale geluidsreproductie vergde volgens hen een muur van geluid, waarbij een oneindige rij microfoons gebruikt zou moeten worden om een geluidsveld over een theoretisch oneindige rij speakers te reproduceren. Dit komt overeen met het principe van Huygens, hetzelfde principe waar golfveld synthese op gebaseerd is. Hierop wordt in hoofdstuk 3.3 van deze scriptie nader ingegaan. Theoretisch gezien was dit een interessante benadering, maar vanuit economische overwegingen zou een praktische implementatie een veel kleinere set-up vereisen, gezien de hoge kosten van het vereiste grote aantal speakers.

In 1934 presenteerde A.C. Keller in samenwerking met de componist Leopold Stokowski het Philadelphia orchestra over driekanaal-stereo. Het signaal werd hierbij in Philadelphia door drie microfoons opgepikt, die verspreid voor het orkest stonden opgesteld, en over een breedband telefoonlijn verzonden naar drie corresponderende luidsprekers in Washington, D.C..

### 3.2.1 Twee kanaal stereo

Bij 2 kanaal stereofonie wordt over het algemeen onderscheid gemaakt tussen twee vormen: luidsprekerstereo en hoofdtelefoonstereo. Deze systemen zijn gebaseerd op stereo-projectie. Stereo projectie is een dubbele projectie die correleert met de waarneming van twee dezelfde zintuigen, m.a.w. de ogen of oren, waarbij een perceptie van ruimtelijkheid ontstaat. Stereografische projectie voor de ogen en stereofonische projectie voor de oren hebben dus gemeen dat ze beide een onafhankelijke linker en rechter input nodig hebben. Voor beeld gebruikt men bijvoorbeeld polaroid brilletjes om stereografische beeld projectie op een scherm drie dimensionaal waar te nemen. Voor een stereofonische projectie van geluid gebruikt men twee luidsprekers of een koptelefoon. Om ruimtelijkheid auditief te kunnen waarnemen moeten voor luidsprekerstereo en hoofdtelefoonstereo verschillende reproductiemethodes worden gebruikt. Voor hoofdtelefoon-stereotoepassingen worden door middel van binaurale-synthese via een afsluitende hoofdtelefoon alle ruimtelijke eigenschap-

pen van geluid aan het gehoor gepresenteerd. Om het principe van hoofdtelefoonstereo te begrijpen verwijs ik terug naar het hoofdstuk 2.3.

Hieronder in 3.2.1.1 zal ik uitleggen hoe dit principe vertaald kan worden in binaurale-synthese technieken voor geluidsreproductie door een hoofdtelefoon.

In 3.2.2.2 wordt vervolgens ingegaan op luidspreker stereo.

### *3.2.1.1 Hoofdtelefoonstereo: de Head Related Transfer Function (HRTF)*

De ruimtelijkheid van geluid kan voor een luisteraar behoorlijk natuurgetrouw worden gereconstrueerd op basis van de 'head related transfer function'. Daartoe wordt voor een reeks invalshoeken in beide oren de overdracht van geluid in tabellen genoteerd over waargenomen tijd, amplitude en frequentie. Men kan de HRTF verkrijgen door over een veelheid van speakerposities rondom een kunsthoofd, met een kunstmatige schouderpartij en oorschelpen en gehoorgangen, de 'waarneming' van pulsen of sinus sweeps op te nemen via probe microfoons die aangebracht zijn op de plek van de gehooringang. Deze opnames, die dus voor elk van beide 'oren' afzonderlijk geschieden, en die voor iedere invalshoek tijd, frequentie en amplitude eigenschappen bevatten, worden binaurale impuls responsies genoemd. Door voor elk van beide oren afzonderlijk te interpoleren tussen de verkregen data en de opgenomen klanken vervolgens over een hoofdtelefoon ten gehore te brengen worden deze door de luisteraar in een driedimensionaal geluidsbeeld waargenomen. Wanneer 'echte' geïndividualiseerde, dus niet op een kunsthoofd gebaseerde, HRTF's worden gemaakt zal het resultaat voor die specifieke persoon optimaal overkomen.

#### *Mogelijkheden om HRTF via kunsthoofd te optimaliseren*

Het opnemen van binaurale impuls responsies neemt veel tijd in beslag en een mens kan niet zo lang goed stil zitten. Daarom wordt gebruik gemaakt van een kunsthoofd. Bij het nemen van de impuls responsies beperkt men zich meestal tot het horizontale vlak. Voor een verdere perfectionering zou men kunnen overwegen om ook over het verticale vlak impuls responsies te nemen. De metingen worden gedaan over kleine stapjes, in ieder geval niet groter dan 15 graden. Voor het creëren van een net signaal ruis verhouding, d.w.z. de invloed van achtergrond geluid beperken, is het belangrijk luide impulsen te genereren. Voor het synthetiseren van de HRTF functies moet, zoals gezegd, geïnterpoleerd worden tussen de verkregen data. Om het spectrum te verdelen in zo klein mogelijke stapjes kan een lineaire fase filter gebruikt worden. Tussen de amplitude van frequentie 1 van de eerste impuls respons en de amplitude van frequentie 1 van de tweede impuls respons kan nu een cross fade gemaakt worden. Deze crossfade, kan in de tabel waarin per invalshoek de verschillen in frequentie en amplitude per oor verzameld waren, per impuls respons eenvoudig worden

geautomatiseerd. De vertragingstijden kunnen eveneens afgeleid worden uit de tabel met binaurale impuls responsies. Voor het reconstrueren van de tijdverschillen kan bovendien per kanaal een delay-unit worden toegevoegd, waardoor ook dit wordt geautomatiseerd. De maximale frequenties waarop de tijdsvertraging wordt waargenomen kan vastgesteld worden met behulp van de eerder genoemde formule in hoofdstuk 2.1.1. Deze zogenaamde 'crossover-frequentie' kan dan worden geïmplementeerd in een tweede lineair fase filter. Nadat er geïnterpoleerd is tussen de sample data is het vervolgens, zoals gezegd, dus mogelijk om met een hoofdtelefoon een behoorlijk realistisch drie dimensionaal geluidsveld te simuleren. Durand Begault (1994) heeft er op gewezen dat er voor een succesvolle implementatie van 3D-audio systemen zoals hierboven beschreven vier belangrijke barrières te overbruggen waren:

- 1) psychoakoestische fouten, zoals het omwisselen van voor en achter
- 2) frequentie respons en fase respons fouten die ontstaan uit mismatches tussen niet-geïndividualiseerde en bij individuen gemeten HRTF's
- 3) grote hoeveelheden data die de gemeten HRTF's representeren
- 4) technische beperkingen door de snelheid van huidige computer systemen.

De beperkingen genoemd onder 3) en 4) zijn door de enorm toegenomen snelheden van computers momenteel niet meer van belang, de fysische beperkingen genoemd onder 1) en 2) zijn echter nog onverminderd geldig.

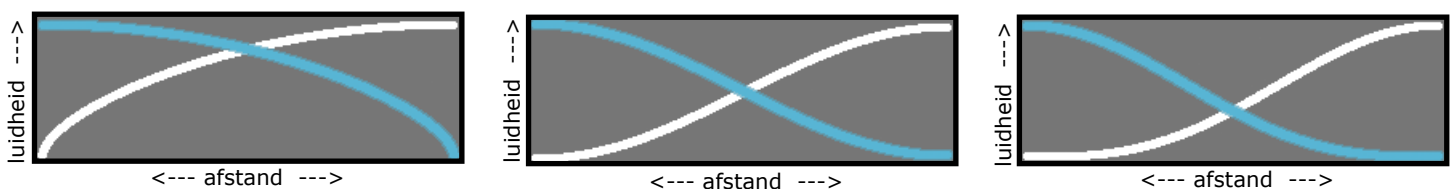
### 3.2.1.2 Luidsprekerstereo

In tegenstelling tot de hoofdtelefoon stereo staan bij luidspreker-stereo de twee speakers relatief ver uit elkaar en is het gereproduceerde geluidsbeeld onderhevig aan reflecterende objecten die in de ruimte aanwezig zijn. Door tijd en volume verschillen toe te passen op de signalen voor de speakers is niettemin een acceptabel virtueel geluidsveld te creëren. De luisteraar moet alleen wel precies midden voor de speakers zitten om het gewenste effect waar te nemen. Daarnaast doen zich nog twee andere problemen voor bij geluidsreproductie met behulp van luidspreker-stereo:

- 1) Wanneer de positie van een monauraale-geluidsbron in een stereobeeld bepaald wordt door een lineaire transitie tussen de twee kanalen, klinkt de bron door de som van de speakers luider dan wanneer een van beide luidsprekers aanstaat.
- 2) Als de luidsprekers te ver van elkaar verwijderd mogen staan ontstaat het andere uiterste: dan is er juist een te zwak signaal in het midden is en ontstaat er dus een gat in het midden gebied tussen de luidsprekers.

Met behulp van de zogenaamde panning laws is het mogelijk om een oplossing te bieden voor dergelijke problemen. Deze kunnen worden toegepast met behulp van de panoramische potentiometer (panpot) van analoge stereo mixers. Een panning law is dus een wiskundige functie met behulp waarvan het mogelijk is ervoor te zorgen dat de luidheid van een signaal op alle posities van het stereobeeld hetzelfde is. Om het verschil in luidheid zoals bedoeld in het eerste geval, te compenseren kan elektronisch analoog of digitaal een cosinus raam of een wortel raam (een versmallingcurve) over het verloop van de panpot worden toegepast om zo een verzwakking in het midden te creëren.

Het probleem waarop werd gedoeld in het tweede geval kan zich bijvoorbeeld voordoen op een podium voor live-elektronica. Op een dergelijk podium ontstaan verschillende situaties, verschillende luidspreker opstellingen en verschillende wensen. Met name wanneer men geluidsbronnen wil laten bewegen langs de speakers, laat het verloop van de luidheid over de afstand bij de gebruikelijke statische panning laws te wensen over. Men wil eigenlijk kunnen beschikken over een functie, waarbij men de versmallingcurve waarover de panpot verloopt, voor iedere luidspreker handmatig kan instellen. Een mogelijkheid hiervoor is cosinus tot de macht versmalling. Dan kan de gebruiker eenvoudig de steilheid van de panning curve bepalen door de machtsverhouding te vergroten of te verkleinen. Zie hier onder een aantal voorbeelden van curves die met deze functie te genereren zijn. Voor een uitgebreidere uitleg over de werking en implementatie van deze mogelijkheden tot verbetering van geluidswaargave met behulp van stereofonie zie bijlage B.



Figuur 4: versmallingcurve cosinus tot de macht, van links naar rechts  $\cos^{2.0}$ ,  $\cos^{1.0}$ ,  $\cos^{0.5}$ .

### 3.2.2 Multipel-kanaal stereo

Sinds ongeveer 1935 is zich gelijktijdig met stereofonie via twee kanalen ook de multiple kanaal stereofonie, ook wel 'surround' genaamd, gaan ontwikkelen. Vandaag de dag is in veel huiskamers een thuisbioscoop met 'surround' geluid te vinden. In de volgende paragrafen worden de meest bekende meer kanaal luidspreker opstellingen in een historisch perspectief uiteengezet.

### 3.2.2.1 Quadrafonie

Quadrafonie is onder het grote publiek bekend als de eerste ruimtelijke luidspreker opstelling voor consumenten. Het is een zogenaamd surround systeem waarbij vier luidsprekers in een vierkant rondom de luisteraar staan opgesteld. Het was het eerste systeem waarvoor een geluidsdrager meer dan twee kanalen audio voor reproductie doeleinde kon dragen. Van de vele geluidsdragerformaten die voor quadrafonie zijn ontwikkeld is Q4 de enige uit die tijd die daadwerkelijk 4 kanalen kon dragen. Hierbij werden de 4 kanalen vanaf een band op een spoel naar een volgende spoel overgedragen en over de luidsprekers uitversterkt. De andere formaten waren gebaseerd op een 2:4:2 matrix. Hierbij werden de 4 kanalen door 'slimme' fase trucs naar 2 kanalen op een geluidsdrager gecodeerd. De versterker decodeert de signalen vanaf de geluidsdrager weer terug naar vier kanalen. Coderingstechnieken in die tijd waren nog niet zo ver doorontwikkeld en veroorzaakte dan ook kwaliteitsverlies van het reproduceerde signaal. Herndon (1999) zegt over de 2:4:2 matrix op een internetsite het volgende over:

*'If you take four chicken eggs and break them in a bowl, you can see at the bottom, four yellow rounds and the clear stuff around them. The moment you stick in your fork and mix them, the yellows get broken and it becomes VERY difficult to put them back together again. You possibly could portion the yellow stuff in four equal cups, but the other stuff is mixed with the yellow already. This was the sad state of the early quad matrix decoders'.....*

Het is van quadrafonische consumenten systemen over het algemeen bekend dat er een goede lokalisatie mogelijk is voor en achter de luisteraar op het horizontale vlak, maar ook dat er beperkingen zijn voor de lokalisatie van geluidsbeelden naast de luisteraar (Kyriakakis, 1998).

Maar het gros van de muziekconsumenten voelde er weinig voor om te wachten op een nieuwe technologische handreiking voor het quadrafonisch concept. Vanwege de dubbele hoeveelheid speakers, de hoge kosten van een tweede stereo versterker en het ontbreken van een standaard formaat voor quadrafonische geluidsdragers werd het eind jaren '70 binnen de platenindustrie beschouwd als een commerciële flop (Silva, 2003).

Maar de lijn der ontwikkeling van toepassingen voor quadrafonie heeft zich gelukkig niet beperkt tot de platen industrie. Al in 1956 was Karlheinz Stockhausen een van de eersten die experimenteerde met eigentijdse muziek voor meerdere luidsprekers. Zijn *Ge-sang der Junglinge* presenteerde hij aanvankelijk zelfs voor vijf luidsprekers presenteerde. Maar het was alleen tijdens de première dat hij het publiek niet alleen liet omringen door vier correlerende luidsprekers, maar ook nog een vijfde solerende speaker in het midden op

podium plaatste. Het vijfde kanaal heeft hij, wellicht vanwege de verwachte opkomst van quadrafonie, naderhand bij de andere vier gemixt (Smalley, 2000). Stockhausen slaagde er met zijn spatialisatie technieken in klanken zeer geloofwaardig rondom een groot publiek te plaatsen.

#### 3.2.2.2 ITU 5.1 (3/2 Stereo)

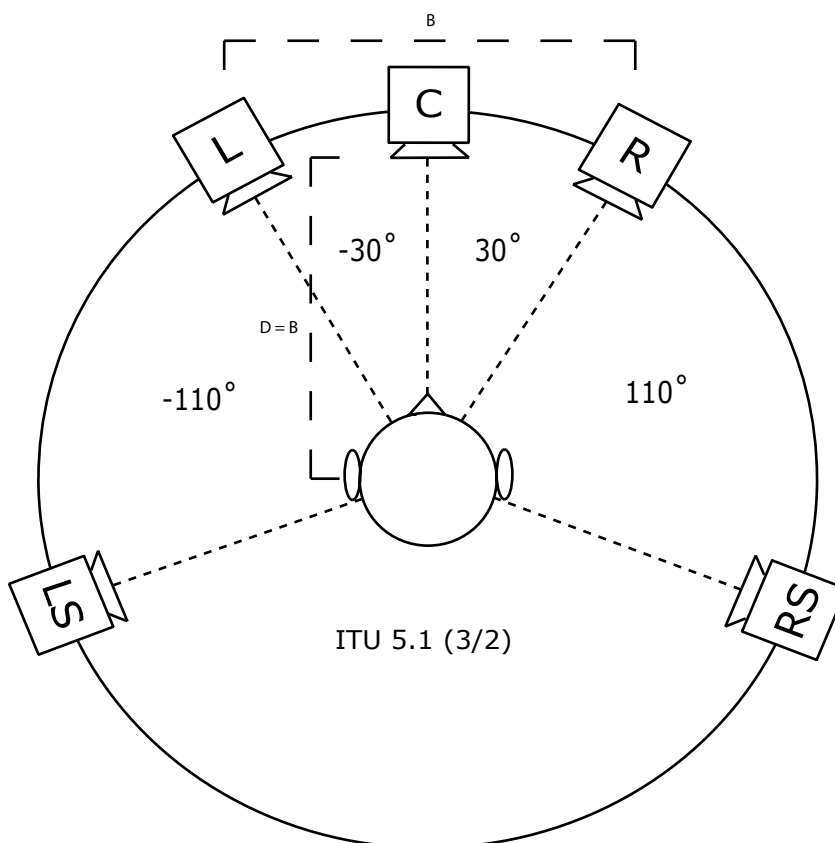
De ontwikkeling van multipel-kanaal stereo is sterk gestimuleerd door de opkomst van de filmindustrie. De eerste systemen voor geluid-beeld reproductie kwamen rond 1925. Nog voor de tweede wereld oorlog uitbrak, werden er in de bioscopen al 3 kanalen (links, centrum, rechts) toegepast om een breed afluister gebied te kunnen bestrijken. In de 'Journal of the society of Motion Picture Engineers' van Augustus 1941 zegt John Schmul: "Terwijl de geluidstechnicus die bekend was met de complicaties van geluidsreproductie zich verwonderde over de tienduizenden probleemloze optredens die per dag in bioscopen plaats vonden, nam het publiek onze inspanning aan als vanzelfsprekend en zag er niets bijzonders aan". Met Walt Disney's *Fantasia* wilde men een grote stap vooruit maken om het publiek weer te kunnen imponeren. Zij waren de eerste die met surround geluid voor film experimenteerde (Grimm, 2003). Vermeldenswaard is dat de plaatsing van het geluid op de surround luidsprekers live gebeurde. Chris Kyriakakis (1998) verteld dat 20th Century Fox als respons op de opkomst van de televisie rond 1950, door CinemaScope (35mm) met six-track Todd-AO (70mm) te combineren het eerste multipel-kanaal geluidsformaat voor de film industrie ontwikkelde. De omslag naar surround geluid zoals wij dat vandaag de dag kennen kwam met de ontwikkeling van Dolby stereo rond 1970. 35 mm Film lint werd voorzien van een 4:2:4 matrix. De ontwikkelingen binnen Dolby hebben zich voortgezet en hebben geleid tot systemen als Dolby Digital Surround EX<sup>1</sup>.

In 1993 kwam de Internationale Telecommunicatie Uni (ITU) met een gespecificeerde luidspreker opstelling en kanaal indeling die algemeen bekend is als '5.1 surround'. De aanduiding 5.1 slaat op de hoeveel luidsprekers en een low-frequency- enhancement (LFE) luidspreker: 3 luidsprekers voor de luisteraar, 2 achter de luisteraar en 1 ergens rechtsvoor op de grond van de luisteraar. Dat is het beeld wat de gemiddelde oningewijde luisteraar van de ITU 5.1 opstelling heeft. Maar voor een optimale weergave is nog wel wat meer nodig.

Imponeren, verwondering wekken, of zelfs verpletteren dat is waar het bij surround-geluid net als bij veel andere kunstvormen om gaat. Surround geluid is een vorm van abstract realisme. Maar... Surround geluid is geen echt ruimtelijk geluid! Alleen als het goed wordt toegepast, en dat is moeilijker dan men denkt, geeft het het gevoel omgeven te zijn door geluid. In de meeste huiskamer situaties staat de ITU 5.1 set niet goed opgesteld,

<sup>1</sup> Meer informatie over de Dolby codering is te vinden op:  
[http://www.dolby.com/professional/motion\\_picture/technologies.html](http://www.dolby.com/professional/motion_picture/technologies.html)

van een ruimtelijke impressie is dan ook geen sprake. Het center kanaal ligt ergens achter de tv, linksvoor staat op een vaas, rechtsvoor bovenop een hifi speaker, de linker surround speaker op de vensterbank, rechts surround staat in de boeken kast en de sublaag speaker is opgesloten in het tv-meubel. Dit klinkt erg overdreven maar het is in veel gevallen wel de realiteit. Je kunt je afvragen waarom men dan een surround set zou willen aanschaffen? Wil het 5.1 systeem een ruimtelijke impressie geven moet het opgesteld staan volgens de ITU normen zoals weergegeven in figuur 5.



Figuur 5: De '3/2' surround opstelling volgens ITU-R BS 775-1 en SMPTE RP173, B= base afstand tussen L en R, D= luisterafstand

van een ruimtelijke impressie is dan ook geen sprake. Het center kanaal ligt ergens achter de tv, linksvoor staat op een vaas, rechtsvoor bovenop een hifi speaker, de linker surround speaker op de vensterbank, rechts surround staat in de boeken kast en de sublaag speaker is opgesloten in het tv-meubel. Dit klinkt erg overdreven maar het is in veel gevallen wel de realiteit. Je kunt je afvragen waarom men dan een surround set zou willen aanschaffen? Wil het 5.1 systeem een ruimtelijke impressie geven moet het opgesteld staan volgens de ITU normen zoals weergegeven in figuur 5.

### 3.2.2.3 *Spatialisatie*

Spatialisatie is de brede noemer voor de distributie van geluid in een ruimte. Het is de bewuste indeling, bijvoorbeeld de opstelling van een ensemble in een concert zaal. Nieuwe ontwikkelingen in de geluidstechniek leidden ertoe dat men voor de weergave van de ruimtelijkheid van het geluid de hulp kon gaan inroepen van de elektronisch musicus. Deze bevindt zich centraal op het podium en hij verzamelt de signalen van de musici die verspreid staan opgesteld. Via de spatialisatie-algoritmes die op de laptop zijn gecreëerd, worden de instrumenten gemanipuleerd en stuurt hij hun signalen over de luidsprekers terug de zaal in. Hij componeert als het ware de ruimte en laat de spelers door ruimte en tijd een relatie met elkaar aangaan.

Maar ook bij elektro-akoestische spatialisatie gaat het in eerste instantie om de plaatsing van de luidsprekers, al dan niet bepaald door de posities van de geluidsbronnen. Pierre Schaeffer (1966) heeft het over nieuwe vormen van vrijheid die opduiken in de plaatsing van luidsprekers. De koppeling of verspreiding van de luidsprekers in de ruimte, bewegingen van de klank van de ene luidspreker tot de andere. Daarbij komt dus kijken hoe we de klanken willen indelen in de ruimte en de tijd. De eigentijdse elektronische muziek is een werkveld waar hedendaagse componisten en klankarchitecten huidige technologieën onder andere inzetten voor het spatialiseren van hun klanken over luidsprekers. Dit gebeurt vaak in de traditionele quadrafonische speaker omgeving. Maar het spatialiseren van klanken beperkt zich niet tot een bepaalde luidsprekeropstelling. Vanuit universeel standpunt, voor het elektronisch-akoestisch weergeven van onze klanken hoeven wij ons niet te beperken tot bepaalde voorgeschreven luidspreker opstellingen.

Vaak wordt bij elektronische muziekstukken gekozen voor een luidspreker formatie om het publiek heen. Net als bij conventionele multipel-kanaal luidsprekeropstellingen wordt hierdoor de suggestie gewekt omgeven te zijn door geluid. Hiervoor geldt, hoe meer luidsprekers hoe gedetailleerder het geluidsbeeld. Een quadrafonische luidspreker opstelling bijvoorbeeld heeft grote afstanden te over bruggen van luidspreker tot luidspreker. Met name klank verplaatsingen van voor naar achter worden niet als een lineaire transitie waargenomen. Tussen de voor en achter luidsprekers is een duidelijke 'dip' waar te nemen waar geen lokalisatie plaats vindt. In eerste instantie moet men voor dergelijke klank bewegingen beschikken over de juiste spatialisatie-algoritmes. Alleen amplitude verschillen op de verschillende luidsprekers is vaak niet voldoende. De lokalisatie wordt al veel gedetailleerder wanneer men gebruikt maak van het Haas-effect. Men geeft de luidsprekers een tijdsvertraging mee waardoor het krachtige effect van Haas op tred.

Zowel amplitude verschillen als het Haas-effect creëren binnen stereofonisch opstellingen een fantoomlokalisatie. Het is mogelijk om te voorkomen dat er niet meer dan een



fantombeeld waar te nemen is. Dit is mogelijk door een spatialisatie-algoritme te schrijven waarbij een gewogen balans ontstaat tussen de tijd verschillen en amplitude verschillen binnen een luidspreker systeem. De tijdvertragingen voor iedere luidspreker zijn gelijk aan de virtuele bron afstand tot de betreffende luidspreker gedeeld door de snelheid van het geluid. De filosofie voor amplitude cross-over tussen de luidsprekers is in paragraaf 3.2.1.2 te vinden. Zie bijlage x voor een voorbeeld van een complete implementatie van spatialisatie-algoritmes. Hoe dan ook men kan natuurlijk ook altijd overwegen om meer luidsprekers op te stellen rondom een afluister vlak, zodat er minder grote afstanden te overbruggen zijn. Als men een duidelijke relatie wil laten ontstaan tussen bijvoorbeeld een akoestisch instrument en de klanken van een luidspreker heeft men eveneens rekening te houden met de ruimtelijke indeling. Misschien vindt de relatie door de ruimte plaats. Misschien moeten beide samensmelten tot een geheel. Het is mogelijk luidsprekers in een piano te plaatsen of er naast. Beide geven een ander effect en vereisen een verschillende creatieve besluitvorming. Spatialisatie biedt nieuwe vormen van vrijheid in het componeren van de elementen. Het is een uitdaging om je buiten de gebaande wegen te begeven en met de indeling van ruimte en tijd nieuwe concepten te ontdekken en te creëren.

Samenvattend kan worden gesteld dat in de stereofonie ten eerste steeds de beperking blijft gelden dat voor een optimale reproductie van de ruimtelijkheid van geluid een vaste luisterplek (de 'sweet-spot') binnen een bepaalde opstelling nodig blijft. Ten tweede valt op dat de ontwikkelingen in de stereofonie uitlopen op een toenemende belangstelling voor de mogelijkheden tot actieve spatialisering van geluid vooral voor artistieke doeleinden. Op deze twee punten betekende het nieuwe concept van de golfveldsynthese, dat besproken zal worden in de laatste paragraaf van dit hoofdstuk over elektro-akoestiek, een belangrijke doorbraak. Het is een luidspreker concept wat niets meer te maken heeft met de 'oude' stereofonische luidspreker concepten. Het heet golfveld synthese. Dit is eindelijk een concept wat voldoet aan de letterlijke betekenis van het woord stereofonie. Het is namelijk niet gebaseerd op de psycho-akoestische waarneming van driedimensionaal geluid maar op zuiver natuurkundige principes.

### 3.3 Golfveld Synthese

De essentie van het principe van golfveldsynthese is dat de ruimtelijkheid van het geluid van een oorspronkelijke geluidsbron daadwerkelijk gereproduceerd kan worden door de synthetisering van de geluidsgolven uit een reeks dicht naast elkaar opgestelde speakers. In deze paragraaf zal eerst worden ingegaan op de fysische grondslag van het GVS-concept (3.3.1). Daarna worden achtereenvolgens een aantal aspecten van de praktische implementatie ervan besproken (3.3.2 t/m 3.3.5). Aan het slot zal een uitwerking worden opgenomen van een bouwplan met een begroting voor een GVS-opstelling anno 2007 (3.3.6).

#### 3.3.1 *Fysische grondslag*

Om inzicht te krijgen in de fysische grondslag van het effect van GVS op geluidsgolven is het nuttig om te kijken naar golftheorie met betrekking tot licht- en watergolven. In de klassieke natuurkunde zijn de twee meest belangrijke concurrerende theorieën over licht die van de Engelsman Isaac Newton en die van de Nederlander Christiaan Huygens. Newton is bekend vanwege zijn deeltjes theorie en Huygens door zijn golftheorie. Om een beter inzicht in deze theorieën te krijgen gaan we kijken naar de proef met de dubbele spleet uit 1802 van de Engelse arts Thomas Young. De proef van Young is betrekkelijk eenvoudig. Licht gaat door een plaat met twee spleten zodat het lichtschijnsel bekeken kan worden op een plaat die er achter staat. Als een van beide spleten wordt afgedekt, is een brede heldere strook te zien. Wanneer we de spleet smaller maken zien we dat de strook tevens smaller wordt. Als we de spleet nog smaller maken wordt de geprojecteerde strook duidelijk groter dan de spleet, het licht buigt kennelijk af. Hoe dan ook als beide spleten open zijn, zouden we wanneer we uitgaan van de deeltjes theorie van Newton verwachten op iedere plek een som te zien van de deeltjes die door beide spleten zijn gekomen. Dus het totaal beeld van de twee spleten zou alleen maar helderder moeten worden. Maar wat er te zien is als licht door beide spleten komt, is een beeld van afwisselende heldere en donkere strepen. Hoe is het dus in vredesnaam mogelijk dat wanneer bij 1 geopende spleet een bepaald gedeelte licht is en bij 2 geopende spleten donker? Waarom verdwijnt het licht in plaats van juist sterker te worden? De voorstelling van Newton, licht als bewegende deeltjes, biedt hiervoor geen uitleg, de golftheorie wel.

Om het te begrijpen kunnen we kijken naar een ander prachtig verschijnsel in moeder natuur. Als je een steen in een bak met water gooit zien we hoe in eerste instantie een cirkelronde golf zich uitbreidt om de positie waar de steen terechtkwam. Als we nu een schotje met twee openingen in de bak plaatsen, kunnen we Young's dubbele spleet proef in water doen. Wanneer we aan een kant van het schot watergolven opwekken, gaan de cirkelvormige golven door de openingen in het schot en ontstaan aan de andere kant half cirkel-

vormige golven. Het interessante vindt plaats op de posities waar de golven elkaar ontmoeten. Op de plaatsen waar de golven beide een berg zijn versterken ze elkaar en wanneer ze tegengesteld bewegen doven ze elkaar uit. Dit verschijnsel heet interferentie.

Het ligt dus voor de hand om ook de resultaten van de lichtproeven van Young te verklaren aan de hand van golven die zich door de ruimte verplaatsen (Zeilinger, 2003, pp. 32-37). Christiaan Huygens kwam in 1678 met zijn meesterwerk 'De verhandeling over het licht', hierin liet hij zien dat het lichtschijnsel van een lichtbron kan worden beschouwd als een verzameling van kleine lichtbronnen. Dat wil zeggen dat het totale licht gelijk is aan de som van alle kleine lichtbronnen. In andere woorden men kan een voortstuwende lichtgolf in een gesloten volume genereren met een distributie van secundaire puntbronnen op de oppervlakte van dit volume. In de wiskunde noemt men het optellen - oftewel: het synthetiseren van deze kleine bijdragen integreren. Het proces kan worden beschreven met behulp van een wiskundige formule (zie hiervoor bijlage C: "The Rayleigh 2.5D Operator Explained" – J. van Dorp Schuitman (2007)).

Maar wat is nu precies de relatie tussen de proef van Young, het principe van Huygens dat het gedrag van licht te verklaren is door ervan uit te gaan dat licht uit golven bestaat, en golfveld synthese? We keren terug naar de proef van Young in water. We plaatsen nu in het midden van de bak met water in de vorm van een vierkant vier schotten. We maken op gelijke afstand van elkaar over de breedte van ieder schot spleten. Volgens de bovenstaande theorie kunnen we hiermee het principe van Huygens weergeven. We laten in het buitenste vierkant van de bak golven ontstaan, die cirkelvormig uitbreiden richting het vierkantige raster in het midden van de bak. De 'voorkant' van het golffront bereikt de eerste opening in het schot, waarna aan de andere kant een halve cirkel golf vanuit die opening ontstaat. Dit proces breidt zich volgens het principe van Huygens uit over de breedte van het raster. Doordat de halve cirkel golven aan de andere kant van het raster over dezelfde tijd als het 'originele' golffront over het raster worden opgebouwd, reconstrueren zij het originele golffront.

Dit is een analogie met wat er bij multiple speaker golfveld synthese gebeurt. Het verschil is dat het vierkantige raster in de bak water nu vervangen is door een vierkant van luidspreker arrays (lineaire rijen van luidsprekers), waarbij de luidsprekers nu de spleten in de ruimte voorstellen waardoor golfvelden gesynthetiseerd kunnen worden. (Hieronder zal in 3.3.3 nog nader worden ingegaan op de luidspreker arrays bij GVS.) Het multipel speaker golfveld synthese concept is voor het eerst geïntroduceerd in 1987 door A.J. Berkhout aan de TU-Delft in Nederland.

Uit deze vergelijking met de theorieën over licht en watergolven wordt dus het belangrijke verschil tussen de golfveld synthese benadering van geluidsreproductie en conven-

tionele stereo technieken duidelijk: het waarnemen van ruimtelijk geluid is niet langer niet gebaseerd is op fantoomlokalisatie tussen de luidsprekers, maar de gewogen bijdrage van de luidsprekers reconstrueert de natuurlijke positie van een klank bron met zijn spectrale en temporale eigenschappen daadwerkelijk in een afluistervak van enige omvang. (Hieronder zal in 3.3.4 nog nader worden ingegaan op de synthese operator.)

Deze benadering leidt dus tot een 'sweet-spot onafhankelijk' afluistervlak waar in luisteraars de positie van een klank binnen of buiten dat vlak kunnen lokaliseren. Golfveld synthese systemen zijn in staat convexe(bolvormige), concave(holvormige) en vlakke golfvormen op te wekken. Met een golfveld synthese opstelling is het bovendien mogelijk een groep van vroege reflecties te genereren waardoor de akoestisch eigenschappen van een ruimte gesimuleerd kunnen worden. In 3.3.5 hieronder zal nog nader worden ingegaan op GVS en ruimte-akoestiek. Maar eerst zullen in 3.3.2 enkele problemen worden besproken die zich voordoen bij de praktische implementatie van GVS.

### 3.3.2 *Praktische concept implementatie*

Golfveld synthese zoals Berkhout het in 1987 in heeft voorgesteld vereist enorme hoeveelheden luidsprekers en enorme hoeveelheden computer rekenkracht. Een 'echte' driedimensionale geluidsreproductieruimte vereist eigenlijk wij aan touwen in de ruimte zweven en dat er vlakken van luidsprekers naast ons en boven ons en onder ons staan. Omdat het vanuit economisch standpunt alsmede gezien de vereiste de computer rekenkracht niet of nauwelijks haalbaar is om een dergelijk systeem op te stellen, kan men echter besluiten om te synthetiseren door een 2D crosssectie van het originele 3D geluidsveld. Dus in plaats van vlakken met luidsprekers is het ook mogelijk om een lineaire luidspreker rij op te stellen, idealiter in de vorm van een vierkant om de luisteraars heen.

De lineaire benadering kan echter wel leiden tot het optreden van een aantal ongewenste effecten in het gesynthetiseerde golfveld:

- spatial aliasing
- truncation effects
- amplitude error
- spectral error

Ik zal kort nader ingaan op de oorzaken van deze effecten en op mogelijkheden om ze te verhelpen.

### 3.3.2.1 'Spatial aliasing' effecten

Spatial Aliasing wordt auditief herkend wanneer men de bijdrage van individuele luidsprekers in een GVS-opstelling kan waarnemen. Dat is vanzelfsprekend niet de bedoeling: hun bijdragen moeten correct gesynthetiseerd raken. Spatial aliasing effecten ontstaan bij het synthetiseren van hoogfrequente geluidsgolven, doordat er een afstand tussen de luidsprekers bestaat. Wanneer de golflengte van de te synthetiseren frequentie kleiner is dan het interval tussen de luidsprekers. Dan is de golflengte die een individuele luidspreker produceert niet in staat op te tellen bij zijn buurman. Het principe van Huygens, namelijk dat een synthese van kleine golfbronnen, tot één oorspronkelijke bron leidt, gaat verloren. Dat wil dus zeggen dat slechts tot een bepaalde frequentie golfvelden correct gesynthetiseerd kunnen worden. Als er een interval afstand van 10-15cm wordt gekozen, zal de aliasing frequentie rond 1.5kHz liggen. De frequentie waarop spatial aliasing optreedt, wordt dus bepaald door het interval tussen de luidsprekers en de spatiale bandbreedte van het gesynthetiseerde golfveld.

De spatial aliasing frequency kan bepaald worden door de formule,

$$F_{al} = c / 2\Delta x \sin(\alpha_{max})$$

$f_{al}$  = spatial aliasing frequentie

$c$  = geluidssnelheid

$\Delta x$  = interval tussen de array luidsprekers

$\alpha_{max}$  = maximale hoek van inval van vlakke golf componenten in het golfveld dat gesynthetiseerd wordt.

Door het afstralinggedrag van de luidspreker voor frequenties boven de aliasing frequentie groter te maken, vermindert men de effecten van spatial aliasing (de Vries, Start & Valstar, 1995).

### 3.3.2.2 'Truncation' effecten

Spatial truncation wordt veroorzaakt door de eindige lengte van een luidspreker array. Doordat aan het einde van de luidspreker array de ruimtelijke sampling plots wordt onderbroken ontstaat diffractie (afbuiging) van de golfvorm. Als de lengte van de luidspreker array relatief groot is en men extrapoleert een geluidsbron over een luidspreker array waarbij de bijdrage van buitenste luidsprekers relatief klein is ten opzichte van de binnenste, dan zijn truncation effecten te verwaarlozen. Wanneer dit niet het geval is, ontstaan door de diffractie zogenaamde schaduw golffronten, gecentreerd op de hoeken van de array. Als de

afstand tussen schaduw golffront en het primaire golffront groter is dan ongeveer 40ms, zoals we uit het Haas-effect hebben opgemaakt in hoofdstuk 2.4.1, worden er echo's waargenomen. Wanneer de afstand korter is wordt bovendien hoorbare kleuring in het gesynthetiseerde golfveld gehoord.

Truncation effecten zorgen dus voor een verkeerde perceptie van wat de aanvankelijk synthese tot doelstelling had en moeten daarom worden onderdrukt. Een manier om deze effecten te onderdrukken is door de geluidsenergie uit te smeren over een groter tijdsinterval. Dit kan bijvoorbeeld door een versmallingcurve in de vorm van een kwadratische cosinus over 1/3 van het verloop aan weerszijde van de array toe te voegen. Zodoende wordt de bijdrage van de luidsprekers in de richting van het einde van de array verminderd.

### 3.3.2.3 *De amplitude error en de spectrale error*

Met de amplitude en spectrale error worden de fouten bedoeld die ontstaan in de amplitude distributie doordat de aanvankelijke synthese intergraal voor GVS uitgaat van vlakken met luidsprekers. In plaats van vlakken gebruik wij horizontale arrays. Amplitude error kan auditief herkend worden doordat de luidheid van de bijdragende luidsprekers groter is voor bronnen relatief dichtbij de array in verhouding tot verafstaande geluidsbronnen. De spectrale error wordt auditief herkend als kleuring in het synthetiseerde geluidsbron. De amplitude error en de spectrale error kunnen gecorrigeerd worden door een mathematische truc beschreven in de Rayleigh 2.5D operator. De 2.5D naam is gekozen omdat het voorziet in een wiskundige middenweg tussen 2D en 3D extrapolatie van puntbronnen. Voor de wiskundige beschrijving van de 2.5D operator zie bijlage C: "The Rayleigh 2.5D Operator Explained" – J. van Dorp Schuitman (2007).

### 3.3.3 *Arrays & luidsprekers*

Voor het creëren van een golfveld synthese omgeving zijn in principe verschillende opstellingen mogelijk. In het meest ideale geval is het afluistervlak omgeven door vier luidspreker arrays. Kleinere opstellingen, zoals een front array met 2 side arrays, behoren ook tot de mogelijkheden. Bij de keuze tussen de opties spelen economische argumenten de belangrijkste rol. De interval afstanden tussen de luidsprekers mogen niet te groot zijn in verband met aliasing frequentie. Hiervoor zijn een groot aantal luidsprekers en een veel DSP output kanalen nodig. Er moet afgewogen worden of men tevreden is met alleen horizontale kromming van de gesynthetiseerde golven of dat men tevens verticale kromming wil kunnen simuleren. Wanneer de verticale arrays worden toegevoegd is het mogelijk om reflecties te genereren en eventuele variabele ruimte akoestiek toe te voegen aan het directe signaal.

De hoogte waarop de arrays staan opgesteld is in principe afhankelijk van de toepassing. Er wordt namelijk niet over een driedimensionaal vlak gesynthetiseerd maar op een crosssectie daarvan. Het door de luidsprekers geproduceerde geluid zal op de verticale as afbuigen, maar het beste resultaat bevindt zich op oorhoogte. Hoewel het afluistervlak 'sweetspot'-onafhankelijk is, moet men zich voor een correcte toepassing van golfveld synthese dus eigenlijk wel afvragen of de luisteraar zal zitten of zal staan. Voor golfveld synthese is het essentieel dat de luidsprekers een consistent afstralinggedrag hebben. In principe kunnen de luidsprekers een willekeurige richtingskarakteristiek hebben, door signaal bewerking is deze karakteristiek eenvoudig aan te passen (de Vries, 1996). De arrays moeten bestaan uit identieke luidsprekers, een enkele 'defectieve' luidspreker kan de synthese volledig uit balans brengen.

Aan de TU Delft is onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van 'distributed mode loudspeakers (DML's). DML's zijn lichtgewicht panelen waarvan de resonanties worden aangestuurd door een 'exciter' op de achterkant van het paneel. Bij DML-panelen ontstaan dezelfde fysische beperkingen van het synthese principe als bij conventionele speakers. Maar DML-panelen hebben bij hoge frequentie een bredere afstralingkarakteristiek dan conventionele speakers. Daarnaast zijn DML panelen zeer geschikt als projectie scherm voor video (Boone & de Bruijn, 2000), wat voor artistieke toepassingen waarin auditieve en visuele kunstvormen worden gecombineerd vanzelfsprekend een aantrekkelijke bijkomstigheid is.

#### 3.3.4 *Synthese operator*

De aansturing van golfveld synthese over een luidspreker systeem kent verschillende lagen van complexiteit. De basis is dat een lineaire luidspreker array in staat moet worden gesteld om rondom afstralende virtuele geluidsbronnen weer te geven. De aansturende signalen voor de individuele luidsprekers zijn de secundaire bronnen die zich voor doen als in tijd vertraagde en in amplitude verzwakte versies van de primaire bron. Wanneer men via een microfoon array een geluidsveld reproduceert moet men met betrekking tot de kromming van de originele bron in de ruimte deze kromming reconstrueren door middel van een voor die bron unieke golfveld extrapolatie. Dit maakt het in realtime uitversterken van bewegende bronnen erg complex. Wanneer droog opgenomen mono bronnen of synthetische klanken worden gespatialiseerd is er geen sprake van geluidsveldreproductie, maar van spatialisatie van klankobjecten. De kromming ontstaat ter plekke door de golfveld extrapolatie, dit geeft de vrijheid om een 'nieuwe' kromming aan de geluidsbron mee te geven. Dit kunnen bolvormige golven zijn (in de afluister ruimte), holvormige (buiten de afluister ruimte) of vlakke golven (op grote afstand van het afluister vlak) . De golfveld synthese operator in het frequentie domein wordt gegeven door

$$Q(x,w) = S(w) \sqrt{j k / 2\pi} \sqrt{\Delta r_0 / \Delta r_0 + r_0} \cos(\theta_0) e^{-j k r_0} / \sqrt{r_0}$$

$x$  = luidspreker coördinaat

$k = w/c$ , het golfnummer

$S(w)$  = audio signaal

delay factor =  $r_0 / c$

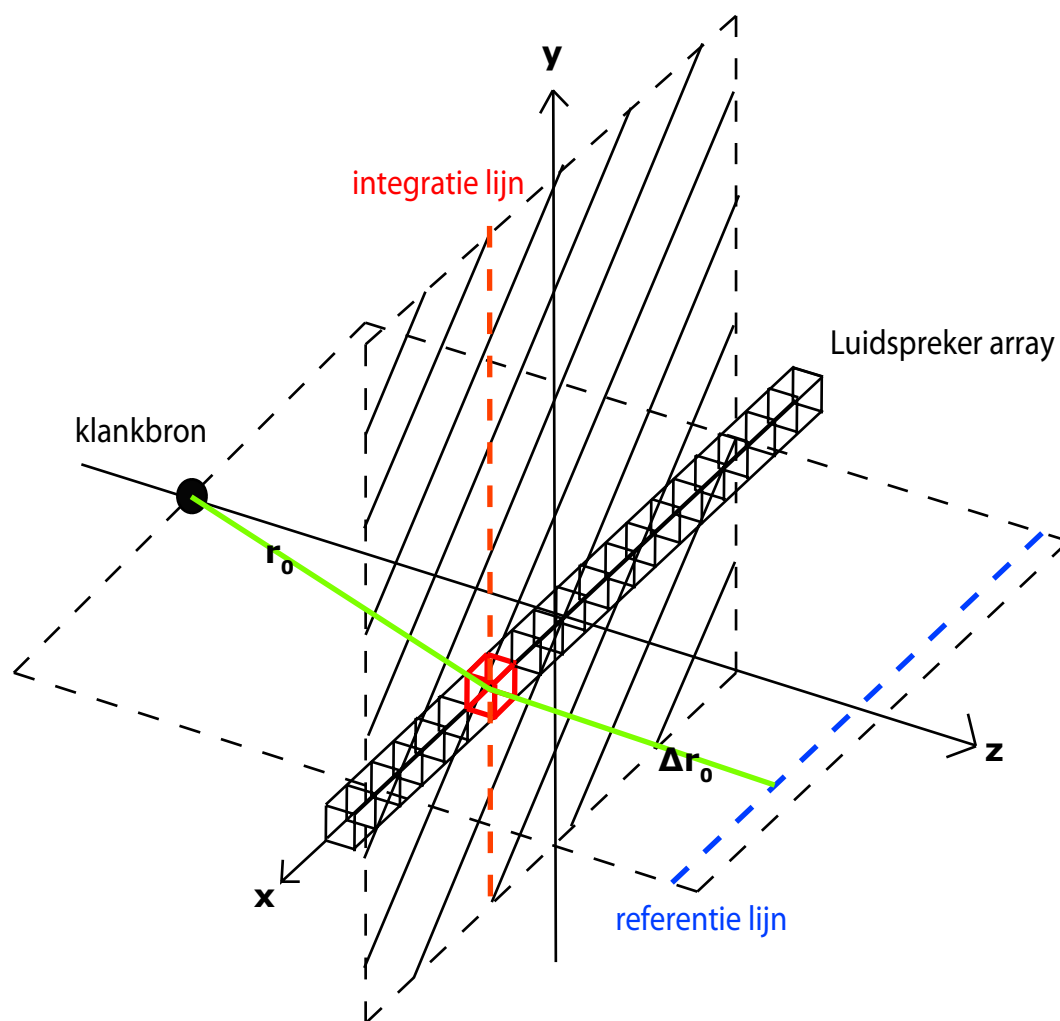
$c$  = geluidssnelheid

amplitude factor =  $\sqrt{1 / 2\pi} \sqrt{\Delta r_0 / \Delta r_0 + r_0} \cos(\theta_0) 1 / \sqrt{r_0}$

filter factor:  $\sqrt{j k}$

$r_0$  = afstand bron tot luidspreker

$\Delta r_0$  = afstand referentie lijn tot luidspreker



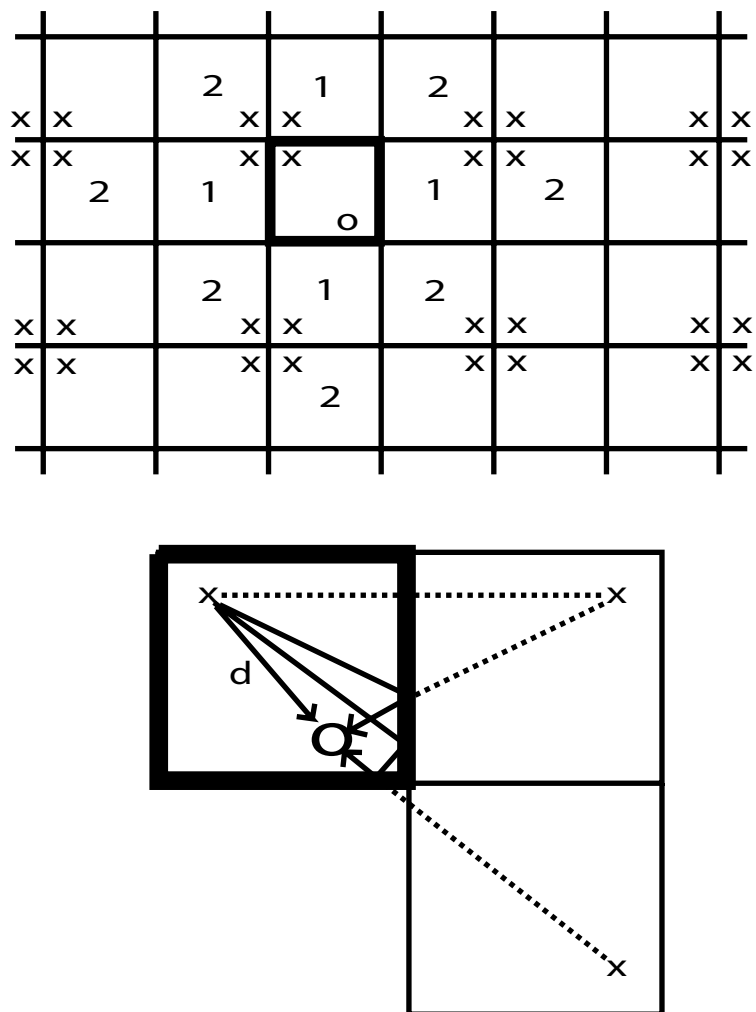
Figuur 6: Schematische representatie van de reproductie van een primaire klankbron door de individuele bijdrage van secundaire puntbronnen in een luidspreker array (Baalman, 2007).



### 3.3.5 Ruimte akoestiek

#### 3.3.5 Ruimte akoestiek

We hebben in de vorige paragraaf kunnen lezen hoe binnen en buiten het afluistervlak van een golfveld synthese systeem geluidsbronnen geplaatst kunnen worden. Daarnaast is het mogelijk een ruimte akoestiek te genereren en aan het directe geluid toe te voegen. Zoals in hoofdstuk 2.2.4 beschreven, wordt het reflectie patroon van een ruimte onderverdeeld in vroege reflecties (tot ca. 60-100ms) en galm (vanaf ca. 60-100ms). Vroege reflecties zijn van individueel belang in de ruimteakoestiek, deze golfvronten zouden gegenereerd moeten worden met volledig behoud van hun temporale en ruimtelijke eigenschappen (de Vries, Reijnen & Schonewille, 1994). Binnen een golfveld synthese systeem kunnen de vroege reflecties beschouwd worden als direct geluid wat zich voordoet als spiegelbron in de richting van het reflecterende oppervlak. We noemen dit het spiegel bron model, zie figuur



Figuur 7: Spiegel model voor het berekenen van vroege reflecties (Begault, 1994). Crosssectie van een driedimensionale ruimte met aangrenzende spiegelruimtes, X = (virtuele) geluidsbron locatie, O = locatie van de luisteraar, 1 = eerste orde vroege reflecties, 2 = tweede orde vroege reflecties.

In principe kan het galmende veld gegenereerd worden door elk kunstmatig galm (Reverb) apparaat, zodanig dat de relevante temporale parameters aangepast kunnen worden. Om een systeem een geluidsveld te laten generen met de gewenste temporale en ruimtelijke eigenschappen is het nodig deze eigenschappen uit te drukken in goed gedefinieerde fysische parameters. De kern van een goed ontworpen elektronisch-akoestisch systeem is een duidelijke relatie tussen de systeem parameters (of technische parameters) en fysische parameters (Vries, de Reijnen, Schonewille, 1994). Voor een praktische implementatie van de galm kan er gebruik gemaakt worden van zogenaamde virtuele speakers. Er moeten minimaal 4 virtuele luidsprekers in de golfveld synthese omgeving worden geplaatst voor een realistisch galmbild (Theille, 2002). Optioneel is het aansturen van de virtuele luidsprekers door gewogen delay-lijnen afhankelijk van de geluidsbron (Baalman, 2007).

### 3.3.6 MPEG-4 & Het CARROUSO project

Een interessante ontwikkeling is ten slotte nog het CARROUSO-project. Dit vond plaats tussen januari 2001 en juni 2003 en het was een initiatief van een aantal Europese aan audio/akoestiek gerelateerde instellingen die een nieuwe standaard wilden ontwikkelen voor de reproductie van ruimtelijk geluid. Zij baseerden zich bij hun onderzoek op de ontwikkelingen van golfveld synthese en op MPEG-4 codering. MPEG-4 is een nakomeling van MPEG-1 en 2 bedoeld om audio/video materiaal te comprimeren en geïntroduceerd door het MPEG consortium (Moving Picture Expert Group). Hoofdzakelijk is de MPEG-4 codering er voor bedoeld om een object te kunnen scheiden van zijn eigenschappen en gedragingen. Bij spatialisatie bestaat de MPEG-4 codering uit het onderverdelen van het directe signaal en de bijbehorende ruimtelijke eigenschappen. De ontwikkeling voor dit formaat is met name tot stand gekomen binnen het CARROUSO project. Voor MPEG-4 zijn in de loop der jaren de volgende akoestische eigenschappen geparametiseerd:

- Geometrische beschrijving van een omgeving inclusief de akoestisch eigenschappen van zijn muren.
- Aan de hand van empirisch psychoakoestisch onderzoek van IRCAM zijn 9 perceptuele parameters voor zogenaamde spatiale sensaties gedefinieerd.
- Fysische beschrijvingen gebaseerd op metingen van impuls responsies verkregen door circulaire microfoon arrays (op het podium van een concerthall bijvoorbeeld).
- Een alternatieve perceptuele beschrijving gebaseerd op de perceptuele parameters, zoals waarneembare ruimte grote, of bron afstand. Vroege reflecties worden gebruikt tijdens de reproductie fase om de voorgestelde parameters te stimuleren.

De twee grote voordelen van MPEG-4 zijn: a) dat het voorziet in de beschrijving van een geluidsveld dat onafhankelijk is van luidspreker-set-up of reproductie techniek. Dus de beschrijving is universeel en kan gedecodeerd worden zowel naar een duale stereofonische set-up, een ITU 5.1 installatie, of een koptelefoon voor HRTF reproductie als naar een golfveldsynthese-setting met honderden luidsprekers b) dat het voorziet in flexibiliteit: de gebruiker kan ten alle tijden, in real time de parameters bereiken en modificeren (Corteel & Caulkins, 2004, pp. 4-5).

### 3.3.7 *Bouwplan & Begroting*

Een zeer belangrijk aspect van de praktische implementatie van GVS is vanzelfsprekend de technische en financiële haalbaarheid van de realisatie van een GVS-opstelling. Daarom wordt in deze laatste paragraaf een voorstel gedaan voor een bouwplan, voorzien van een begroting. Deze is opgesteld door Willem Spier, Eelco Grimm en Fedde ten Berge. Het speaker systeem voor golfveld synthese kan het beste worden opgebouwd uit modules, die elk bestaan uit 8 speakers. Dit maakt transport en comptabiliteit met verschillende ruimtes en opstellingen een stuk eenvoudiger. Elke module bestaat uit een kast van 78,4 cm breed, 20 cm hoog en ongeveer 30cm diep met hierin 8 breedbandluidsprekers. Zij hebben elk een eigen versterker en een eigen werkvolume. De voeding voor de versterkers is gemeenschappelijk en galvanisch gescheiden van het lichtnet om aardlussen te voorkomen. Aansluiting via multikabel en bijbehorende connector (bijv. sub-d) aan (metalen) achterzijde (tevens koelvin versterkers). Modules zijn eenvoudig aan elkaar te koppelen waarna de speakers alle dezelfde onderlinge afstand hebben. De module is beveiligd tegen kortsluiting en overbelasting. De gebruikte onderdelen zijn gangbaar en na te bestellen. De speakers worden beschermd tegen aanraking en bij transport door een doek aan de voorzijde. Versterkervermogen is 8\*18W. Elke luidspreker geeft 84 dB 1W 1m aan 100 Hz bij 3%THD. Versterking is 26 dB. Kast is geolied multiplex (eenvoudiger af te werken dan MDF).

Wat betreft de luidsprekers zijn twee opties naast elkaar gezet.

De Visaton FRS 8-4 en de Timphany TG9FD-10-04, waarbij de eerste de goedkoopste is en de tweede de beste (ook wat betreft productie toleranties). Beide zijn ook op termijn nog goed te krijgen.

Prijzen (in euro)	5 modules	12 modules	24 modules
Visaton	5.850	10.900	16.400
Timphany	6.600	12.400	20.300

(Het aantal werkdagen is door W. Spier op 12, resp. 19 en 32 geschat.)

Naast de speakerbouw is gekeken naar een geschikte DSP interface. Een goede keuze zou zijn een aantal ADAT interfaces aangestuurd door een MAD I interface. De ADAT interfaces worden gesynchroniseerd door Grimm Audio CC1. Voor een GVS-systeem van 192 kanalen zouden dan de volgende kosten moeten worden begroot:

RME HDSP MAD I 24/96 - 256 kanalen PCI interface:	€1838
RME adi648 192 kanalen Madi naar Adat:	€5246
192 kanalen ULTRAGAIN PRO-8 DIGITAL ADA8000 DA:	€5592
Grimm Audio CC1:	€1500
24 modules inc. arbeidskosten:	€20300
MACG5:	€4628
- Twee Intel Xeon quad-coreprocessors van 3 GHz	
- 4 GB (4 x 1 GB) geheugen	
Kabels:	€1000

Een totaal GVS-systeem van 192 kanalen zal dus €40104 gaan kosten.

Totaal voor 64 kanalen GVS: €19701

Realisatie vergt een nader tijdschema, mede voor het tot stand van de overige hardware en de software, en het realiseren van een locatie. De nadere uitwerking daarvan is vanzelfsprekend afhankelijk van goedkeuring van een begroting.

## 4. Golfveld synthese: nu en in de toekomst

In dit hoofdstuk wordt eerst een kort overzicht geboden van wat er tot nu toe op het gebied van GVS al wordt gedaan, zowel op wetenschappelijk, als op artistiek, als op commercieel gebied. Daarna bespreek ik enkele eigen ideeën voor mogelijke ontwikkelingen in de toekomst, niet alleen op artistiek, maar ook op maatschappelijk gebied.

### 4.1 Initiatieven

Hierna worden de huidige Europese golfveld synthese initiatieven uit een gezet. We beginnen met de TU-Delft, waar golfveld synthese zijn wortels heeft. Vervolgens worden de instellingen behandeld die GVS commercieel distribueren om te eindigen met de instellingen die golfveld syntheses op een artistieke wijze toepassen.

#### 4.1.1 *Golf veld synthese, TU-Delft, Nederland*

De TU-Delft is reeds 20 jaar bezig met onderzoek naar golfveld synthese. A.J. Berkhout kwam in 1987 met de eerste paper waarin hij beschreef dat het theoretisch mogelijk was het principe van Huygens toe te passen op luidspreker arrays. De volgende grote vooruitgang werd beschreven in de doctorale thesis 'Application of Wave Field Synthesis in Room Acoustics' van P. Vogel uit 1993. Daarin beschrijft hij de wiskundige oplossing voor het probleem van de 3D naar 2.5D transformatie.

De TU-Delft zelf is niet of nauwelijks praktisch bezig met toepassingen voor golf veld synthese, behalve met de demonstratie van het concept zelf (uit: eigen interview 2e fase student Jasper van Doorn, mei 2007). Voor deze demonstratie wordt bovendien de relatie van golfveld synthese met 2D video onderzocht. De TU-Delft ondersteund met hun expertise wel andere Europese GVS gerelateerde projecten. Zij hebben twee luidspreker opstellingen opgesteld in een ruimte in de TU-Delft. Een opstelling van vier arrays met breedband auto luidsprekers en een opstelling van 'multi actor panels' gebaseerd op DML technologie (Distributed mode loudspeaker, zie hoofdstuk 3.3.3). Daarnaast is men bezig met een onderzoek naar de invloed van verticale reflecties door middel van een luidspreker array op het plafond en loopt er een onderzoek naar de maximale luidspreker interval afstand.

(Bron: <http://www.soundcontrol.tudelft.nl/>, interview met Jasper van Doorn & Lars Horchens, Delft, 22-05-2007)

#### 4.1.2 IOSONO GmbH, Fraunhofer, Duitsland

IOSONO is een product van het Fraunhofer instituut, de patent-houder op de mp3 codering. IOSONO richt zich op de commerciële distributie van golfveld synthese systemen. Zij hebben in Ilmenau(D) een demonstratie-bioscoop uitgerust met hun GVS systeem. De visie van IOSONO op de toepassing wordt met name in combinatie met video gezien, in bijvoorbeeld 3D-bioscopen en planetaria. Voor zover bekend is het niet mogelijk om geluid realtime te spatialiseren met hun systeem. Bewegende en stilstaande klankbronnen kunnen alleen na rendering, het vooraf berekenen van alle bron posities en eventuele bewegingen, worden afgespeeld. Ze bieden in hun software wel virtual panning spots (VPS). IOSONO hecht veel belang aan VPS op grond van de eis die zij stellen dat golfveld synthese compatible moet zijn met conventionele multipel kanaal reproductie systemen.

(Bron: <http://www.iosono-sound.com/>)

#### 4.1.3 M3S Module, Sonic Emotion ag, Zwitserland

Sonic Emotion is net als Fraunhofer's IOSONO commercieel distributeur van het door de TU-Delft ontwikkelde golfveld synthese concept. De ontwikkelingen en onderzoekonderwerpen, zoals deze worden besproken in hun papers, lopen vooruit op de ontwikkelingen bij de andere Europese instellingen. Veel van de in Delft opgezette theorieën zijn correct geïmplementeerd in hun systemen. Het is mogelijk om met hun systeem zowel het directe geluid als de ruimte akoestiek realtime te moduleren en de richtingkarakteristiek van de bronnen kan gesynthetiseerd worden. In dat opzicht zijn ze dus al verder dan IOSONO. Naast de golfveld synthese systemen die Sonic Emotion verkoopt onder de naam 'M3S module', verkopen ze een diversiteit aan andere 3D (non) realtime geluidsreproductie-systemen, zoals binaurale- en andere multipel kanaal reproductie systemen. Sonic Emotion ziet de toepassingsmogelijkheden van 3D geluid breed en commercieel. Ze willen hun systemen inzetten in 3D bioscopen, musea en kunst-installaties, planetaria, themaparken, dans shows, diverse simulatoren e.d.

(Bron: <http://www.sonicemotion.com/ch/index.php>)

#### 4.1.4 Wave Field Synthesis, Fouraudio, Duitsland

Fouraudio is een klein bedrijf dat in maart 2007 is opgericht en direct een enorm golfveld synthese systeem heeft gebouwd. Ze hebben het auditorium van de TU-Berlijn met een golfveld synthese systeem bestaande uit 880 kanalen mogen inrichten, bij de software-ontwikkelingen waarvoor dus ook Marije Baalman zijdelings betrokken is geweest. De amplitude- en delay-waarden worden bij Fouraudio door FIR (Finite Impulse Respos) filters berekend. Voor verder technische specificatie verwijs ik door naar hun website. Verdere

gedetailleerde informatie over dit systeem is mij niet bekend. Lars Horchens zei tijdens een gesprek dat ik in mei 2007 met hem heb gevoerd dat dit typisch zo'n systeem is dat bijna goed is, maar hier en daar toch een verkeerde benadering heeft. Hij doelde daarbij volgens mij noodzaak van een 3D naar 2.5D omzetting van de Rayleigh integraal (zie hst. 3.3.2.3). Naast de ontwikkeling van golfveld synthese is het bedrijf bezig met de ontwikkeling van PA (public adress) systemen, meetapparatuur, digital audio processing, software, hardware en akoestiek. Door de samenwerking met zowel de universiteit als met mensen met artistieke ambities op het gebied van GVS verdienen de ontwikkelingen binnen dit kleine bedrijf bijzonder de aandacht.

(Bron: <http://www.fouraudio.com/>)

#### 4.1.5 Wave Field Synthesis, IRCAM, Frankrijk

IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) is het Franse instituut voor eigentijdse muziek. IRCAM ontwikkelt sinds 2001 in samenwerking met het IRT (Institute für RundfunkTechnik) en de TU-Delft golfveld synthese toepassingen voor eigentijdse muziek. Bij IRCAM maakt men voor zover bekend gebruik van 'multi actor panel' luidsprekers van Sonic Emotion gebaseerd op DML technologie. Bij IRCAM is de GVS technologie op verschillende wijze onderzocht en toegepast. Hun visie op het toepassen van golfveld synthese technologie baseren zij voornamelijk op de filosofie van de MPEG-4 codering. Plaatsing van geluidsbronnen binnen hun golfveld synthese omgeving gebeurt ook bij hen, dus net als bij IOSONO door middel van 'virtual panning spots'. Het verschil met IOSONO is dat hun toepassing zich op eigentijdse muziek en onderzoek richt in plaats van op gebruik in bioscoop en andere commerciële toepassingen. Zodoende kunnen componisten hun klanken in een golfveld synthese systeem plaatsen via conventionele of gecompliceerde stereofonische panning algoritmes. IRCAM heeft een eigen virtuele akoestiek processor ontwikkeld genaamd 'SPAT~'. SPAT~ genereert een groep van ruimte-effect kanalen en verstuurt het directe geluid naar de gerelateerde VPS in het golfveld synthese systeem. IRCAM heeft veel onderzoek gedaan naar 'multi channel equalizing'. Dit is een onderzoek naar de totale spectrale bijdrage van een luidspreker-array bij de reproductie van een klankbron in een ruimte. Bovendien is bij IRCAM de relatie tussen tweedimensionaal beeld en golfveld synthese, dat bij IOSONO centraal staat, nader onderzocht. Dit blijkt een moeilijke interactie, omdat de combinatie van het tweedimensionale beeld en het driedimensionale geluid cognitieve dissonantie veroorzaakt.

(Bron: [http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/WFS\\_WEBSITE/Index\\_wfs\\_site.htm](http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/WFS_WEBSITE/Index_wfs_site.htm))

#### 4.1.6 *Wonder, Marije Baalman, Duitsland*

Marije Baalman is bezig met de toepassing van golfveldsynthese in elektronische muziek en klank installaties. In de elektronische studio van de TU Berlijn is een klein golfveld synthese systeem opgebouwd. Hier wordt onder andere de software WONDER ontwikkeld. Met de software van Baalman kunnen complete composities worden gemaakt, of alleen de luidpreker-array set-ups worden definieert die vanuit andere programma's via het 'Open Sound Control' (OSC) protocol in realtime kunnen worden aangestuurd. De WONDER software is in staat tot golfveld extrapolatie van direct geluid over de speakers d.m.v. gewogen delay lijnen en amplitude verzwakkingen per speaker. De vroege reflecties kunnen eveneens berekend worden met behulp van een korte convolutie. Galm wordt toegevoegd over 8 virtuele luidsprekers aangestuurd door delay lijnen. Baalman is bovendien een van de eersten die naast puntbronnen en vlakke golven, driedimensionale klankobjecten in GVS heeft geïmplementeerd. Deze kunnen vanaf één gefocust punt vanaf dat object, in een bepaalde richting afstralen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan iemand die je al sprekende de rug toekeert.

(Bron: [http://www2.ak.tu-berlin.de/Studio/slides\\_wfs.pdf](http://www2.ak.tu-berlin.de/Studio/slides_wfs.pdf), <http://gigant.kgw.tu-berlin.de/~baalman/>)

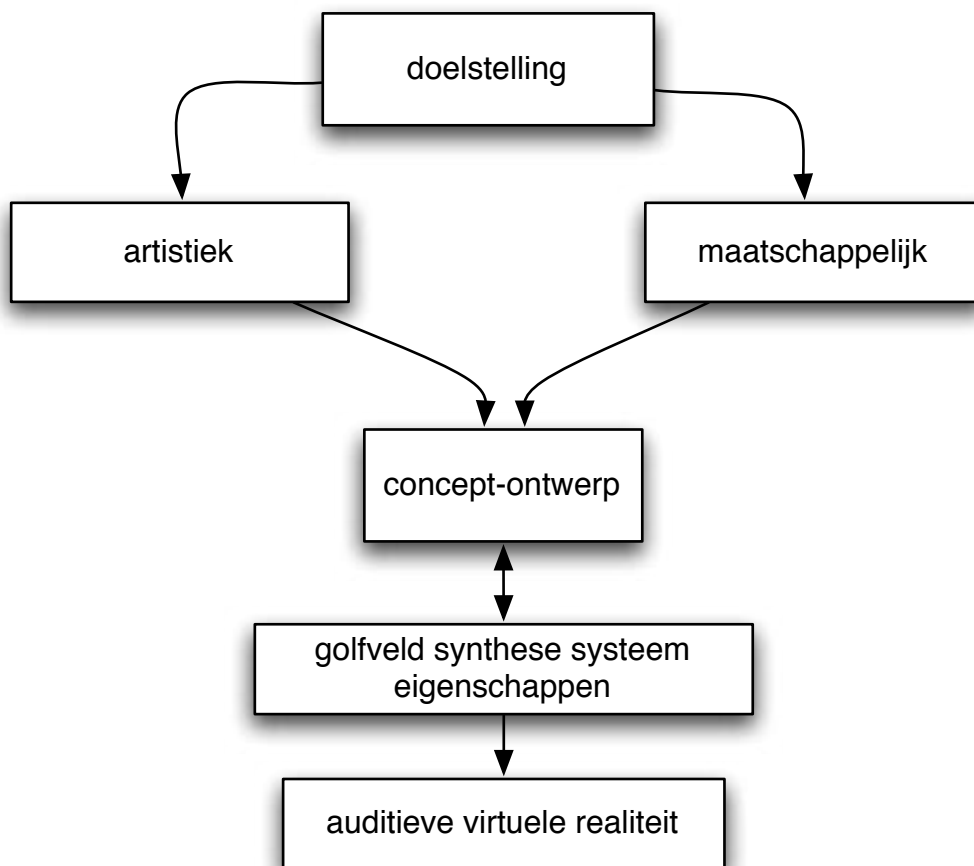
#### 4.1.7 *192 Speaker sensation, Game of Life, Nederland*

Initiatiefnemer Game Of Life (GOL) presenteerde in november 2006, tijdens November Music in Den Bosch hun '192 speaker experience'. De 'game of life' heeft voor die gelegenheid de componisten Wouter Snoei, Barbara Ellison en Yannis Kyriakides gevraagd stukken te componeren voor hun systeem. Het luidspreker systeem bestaat uit 192 2-weg luidsprekers ondersteund door 12 subwoovers. De aansturende software is ontworpen in Super Collider en voorziet in een uitgebreide compositie tool. In het huidige systeem is het mogelijk golfveld extrapolatie toe te passen door middel van gewogen delay lijnen en amplitude verzwakkende curves per luidspreker. Composities met bewegende klankbronnen kunnen na rendering in het systeem worden afgespeeld. Het is niet mogelijk een ruimte akoestiek aan het directe signaal toe te voegen. Wel is er comptabiliteit met stukken die gecomponeerd zijn voor conventionele multipel luidspreker opstellingen. In principe is de toepassing van dit systeem min of meer te vergelijken met die van Marije Baalman en IRCAM. Qua implementatie van de mogelijkheden die GVS biedt, zijn IRCAM en Marije Baalman veel langer bezig en dus al een stuk verder.

Zelf ben ik tot drie maal toe naar een presentatie van het GVS systeem van GOL wezen luisteren. Het waren een overtuigende artistieke toepassingen van het GVS concept. De meest recente voorstelling was 1 juli, 2007 in het Muziek gebouw aan het IJ met stukken van Wouter Snoei, Barbara Ellison, Yannis Kyriakides en Kees Tazelaar. De eerste drie componisten hadden zoals ik al zij speciaal voor GOL GVS hun stuk gecomponeerd. De compositie



tie van Kees Tazelaar was al eerder voor surround 7.1 gecomponeerd, welke nu door middel van virtuele luidsprekers in het systeem werd gepresenteerd. De composities van Wouter Snoei en Kees Tazelaar spraken mij het meest aan. In deze stukken is een subtiele ruimtelijke balans aangebracht, spatialisatie kan namelijk ook leiden tot te veel afleiding door de 'rondvliegende' klanken, wat naar mij idee in de andere stukken teveel werd benadrukt. Het stuk van Wouter Snoei illustreerde zoals hij zelf verteld, geluiden in en om het huis, mijn inziens is de ruimtelijkheid van een huis een zeer overtuigend concept als artistieke toepassing voor GVS. Het stuk van Kees Tazelaar bestaat uit klanken die allemaal afkomstig zijn uit de analoge studio van het Sonologie instituut in Den Haag. Het stuk 'ademde' als het ware natuurlijke klanken, ik visualiseerde een moeras, waarna ik het bos in werd meegevoerd door andere klanken en uitkwam in een duinvallei...?!



Figuur 8: Schematische weergave invloed doelstelling op uiteindelijke virtuele realiteit.

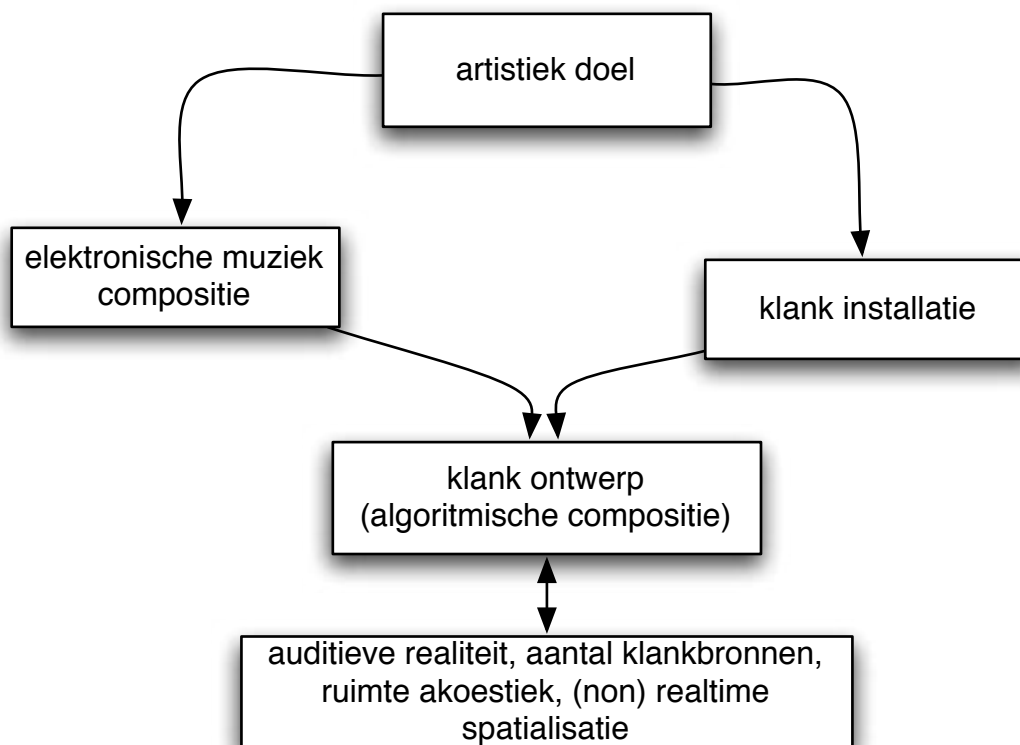
## 4.2 Toekomstmogelijkheden

GVS is een middel dat gebruikt moet worden om de auditieve virtuele realiteit van een concept ontwerp te realiseren. GVS is, zoals reeds uitvoerig beschreven, geen kant en klaar en in allerlei toepassingen meteen al inzetbaar product. Het is een vorm van spatialisatie waarvan de toepassingsmogelijkheden nog maar aan het begin van hun ontwikkeling staan. Het GVS-concept biedt een context voor een idee voor auditieve virtuele realiteit.

Men moet zich bewust zijn van de mogelijkheden en beperkingen van het systeem als men nadenkt over toepassingen. Er moet een auditieve realiteit geschapen worden met een bepaald doel. Tussen het concept ontwerp en de uiteindelijke auditief virtuele realiteit liggen de eigenschappen van GVS. De vorm daarvan is afhankelijk van het doel dat je hebt. De eigenschappen zelf oefenen op hun beurt ook invloed uit op het concept ontwerp, net zoals het concept ontwerp het GVS systeem beïnvloedt. Deze wederkerige invloed wordt in figuur 8 aangeduid d.m.v. de dubbele pijl.

Voor toepassingen moet vastgesteld worden wat de mogelijkheden van het GVS systeem moeten zijn en op welke capaciteiten van het systeem de nadruk moet komen te liggen. Dit geldt overigens voor alle aspecten van de beoogde auditief virtuele ruimte, niet alleen de golfveld synthese, maar ook de klank synthese, het interactie ontwerp etc. De artistieke toepassingsmogelijkheden zijn veelsoortiger dan de maatschappelijke. Deze laatste zijn door hun maatschappelijke verankering, meer ingekaderd, en zullen meestal strengere en preciezere eisen stellen die noodzakelijk zijn voor een juiste implementatie. Voor een componist is juist de vrijheid die het systeem hem gunt van groot belang. Een artistieke toepassing is in die zin 'makkelijker' te realiseren dan de implementatie van een systeem dat maatschappelijke belangen dient (zie de voorbeelden in 4.2.2 hierna). De doelen gekoppeld aan de artistieke invalshoek zijn als het ware 'buigzamer' dan doelen met een maatschappelijke context.

Om te illustreren wat de mogelijkheden van de implementatie van een GVS systeem, uitgaande van zowel artistieke als maatschappelijke doelstellingen zijn, wordt wederom gebruik gemaakt van een schematische weergave. Figuur 9 geeft de verschillende elementen weer die elkaar beïnvloeden in het proces van een artistieke toepassing. Figuur 10 doet dat zelfde voor maatschappelijke toepassingen.



figuur 9: artistieke doelstelling

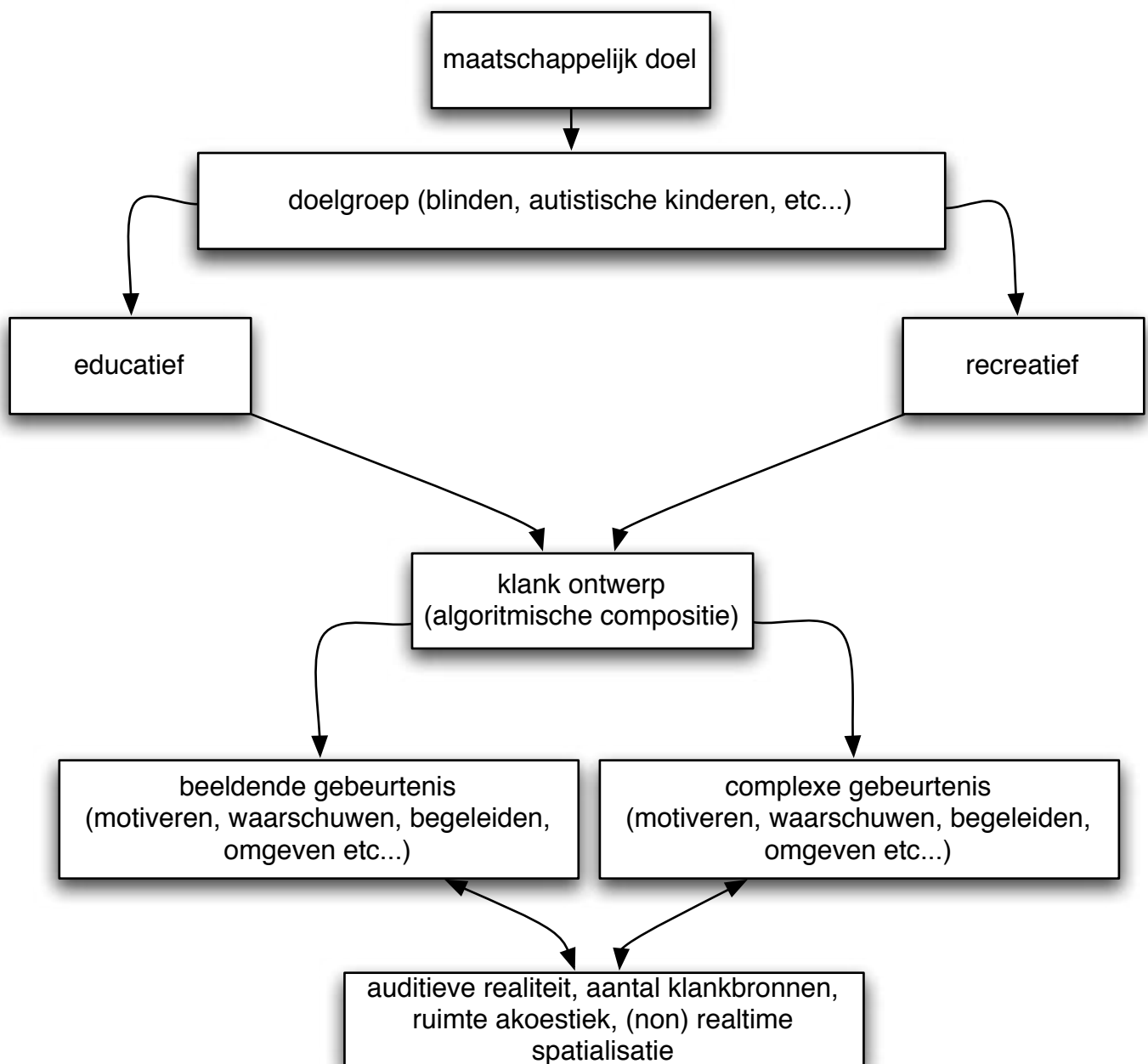
#### 4.2.1 Artistiek

Bij de totstandkoming van een artistieke doel maken we, zoals te zien is in figuur 9, grofweg onderscheid tussen het toepassen van een elektronische muziek compositie en een klankinstallatie voor golfveld synthese. Beide toepassingen vragen een grote mate van controle over het systeem. Het doel van een componist bij het spatialiseren van zijn klanken over golfveld synthese, is het vastleggen van bewegingen in ruimte en tijd. Het moet mogelijk zijn een relatief groot aantal geluidsbronnen door het af luistervlak te laten bewegen. Voor het afspelen van een compositie is geen realtime controle over het systeem nodig.

Waar het bij artistieke toepassingen in de kern om gaat is dat aan componisten een uitgebreide compositorische tool ter beschikking moet staan waarmee zij klankbronnen over alle mogelijke vormen door de ruimte kunnen laten bewegen. Het is in dit verband interessant dat men bij IRCAM bij de implementatie van GVS, zoals we zagen, gebruik maakt van 'virtual panning spots' (VPS). De filosofie hier achter is dat de componist vanuit zijn eigen host kan werken en audio kan uitsturen over virtuele luidsprekers in het GVS systeem. Het gebruik van VPS is voor artistieke toepassingen dus een goed middel voor het behalen van de doelstelling. Deze toepassing beperkt de hoeveelheid rekenkracht die nodig is voor het GVS systeem. De keuze ervoor impliceert overigens wel dat men voor bewegende geluidsbronnen alleen gebruik kan maken van conventionele (complexe) panning methodes.

In de beschrijving van de implementatie van Marije Baalman en de M3S module zijn nog andere nieuwe ontwikkelingen aangetoond die van belang zijn voor artistieke toepassingen van GVS. Zij hebben een synthese ontwikkeld die instaat is om klankbronnen in

een bepaalde richting te kunnen laten afstralen. Voor een artistieke visie op de toepassing van het GVS systeem is dit een zeer interessante toevoeging. Uiteindelijk zal er een gulden midden weg gevonden moeten worden tussen de bewegende bronnen die men synthetiseert en de klanken die men panned tussen VPS. Met deze combinatie wordt a) de computerrekenkracht niet te veel belast en is het b) mogelijk tussen een iedere willekeurige host en het systeem te communiceren.



*Figuur 10: Maatschappelijke doelstelling*

Wie zich tot doel stelt om gebruik te kunnen maken van een klankinstallatie vraagt min of meer de zelfde mogelijkheden van het golfveldsynthese systeem als hierboven bedoeld, behalve dan dat een klank installatie vaak ook nog een interactief element bevat, dat realtime controle over het systeem vereist. De bewegingen van de bezoeker in het afluistervlak moeten bijvoorbeeld geanalyseerd kunnen worden door een camera en met de verkregen data moet dan realtime feedback gegenereerd kunnen worden.

Ik denk dan bijvoorbeeld aan het bouwen van klankinstallaties voor musea. Deze installaties moeten in staat zijn rond een bepaald thema de bezoeker op een interactieve wijze iets bij te brengen. Stel dat je bezoekers bijvoorbeeld iets wilt leren over het fenomeen golfveld synthese. De demonstratie van de proef van Young in een bak met water is dan een goede methode en het zou vanzelfsprekend heel interessant om dan tegelijkertijd een camera de schaduw van de golven te laten analyseren en de verkregen data te laten koppelen aan auditieve gebeurtenissen in het luistervlak. Maar vaak zullen maatschappelijke toepassingen andere eisen aan de implementatie van GVS stellen dan artistieke.

#### *4.2.2 Maatschappelijk*

Met maatschappelijke toepassingen worden in dit hoofdstuk andere doelen bedoeld dan bijvoorbeeld de door IONSONO en M3S gebruikte definiëring, waaronder ook bioscoopbezoek en dance-events kunnen worden gevat. Wanneer hier over maatschappelijke doelen wordt gesproken, dient dit te worden gezien in het kader van hulp en/of dienstverlening. Een product dat de samenleving als geheel dient of dat de participatie van mensen aan die samenleving bevordert/stimuleert.

Wat de implementatie van GVS in maatschappelijke context moeilijker te realiseren maakt dan de artistieke implementatie is het strengere kader dat inherent is aan de maatschappelijke toepassing. Wanneer men bijvoorbeeld met behulp van GVS een blind persoon wil leren bepaalde verkeerssituaties in te schatten, of als men blinde kinderen in een onderwijssituatie auditief wil laten waarnemen wat geometrische vormen zijn, moet het product zijn doel perfect dienen, wil het geslaagd kunnen worden genoemd. Alle techniek moet perfect op dit doel worden afgestemd. Welke geniale mogelijkheden een ontwikkeld GVS-systeem ook allemaal mag hebben, wanneer het de blinde persoon uiteindelijk niet verder helpt, is het waardeloos. De waarde van een dergelijk systeem ligt dus in de mate waarin het erin slaagt het maatschappelijke doel te dienen. In aangehaald voorbeeld zou men zich kunnen voorstellen dat dit zelfs van levensbelang is.

Een maatschappelijke toepassing zoals bedoeld in deze paragraaf gaat dus altijd uit van een bepaalde doelgroep: een groep mensen die zich door een gezamenlijk kenmerk onderscheidt van andere mensen. Ouderen, jongeren, kinderen, visueel gehandicapten etc.

De kenmerken van deze doelgroep hebben grote invloed op de uiteindelijke toepassing en maken veelal deel uit van de doelstelling op zich. Vervolgens kan het van belang zijn onderscheid te maken tussen een educatieve of recreatieve doelstelling. Een voorbeeld van een specifieke doelstelling waarin zowel de doelgroep als het educatieve of recreatieve element terugkomt zou kunnen zijn:

*Ontwikkel een stimulerende virtuele auditieve speeltuin voor blinde kinderen misschien zou het zelfs ook denkbaar zijn voor verstandelijk gehandicapte kinderen van 6-8 jaar in het dagopvangverblijf 'joepie joepie' in Utrecht.*

Het product (de speeltuin) heeft in deze maatschappelijke doelstelling een recreatief karakter (speeltuin) met een educatieve waarde (stimulerend). De doelgroep die centraal staat is van groot belang voor het ontwerp van de uiteindelijke speeltuin, omdat in dit ontwerp rekening dient te worden gehouden met hun niveau en ontwikkeling. Deze kinderen in de leeftijdsgroep 6-8 zijn zeer energiek en hebben moeite met de oriëntatie van visuele bewegende objecten. Een auditief stimulerende omgeving is in deze situatie ideaal. Doordat wij de bewegingen van de kinderen kunnen registreren met behulp van sensoren, kunnen de kinderen ongedwongen al bewegend een spel aangaan met een generatief klanklandschap. Ten slotte geeft deze doelstelling een indicatie voor de omgeving waarin het product terecht komt. Deze locatie stelt eveneens randvoorwaarden aan het uiteindelijke product, al is het alleen al wat betreft het financiële aspect.

Een ander voorbeeld van een maatschappelijke doelstelling kan zijn:

*De totstandkoming van auditief/interactief basisonderwijs voor visueel gehandicapten.*

Wanneer we dit voorbeeld vertalen naar een daadwerkelijk concept, rekening houdend met doelgroep en het educatieve karakter, komen we in het gebied van het concept-ontwerp/klank-ontwerp. Er kan gedacht worden aan de volgende mogelijkheden:

1) Het zou bijvoorbeeld mogelijk gemaakt kunnen worden om visueel beperkte kinderen auditief kennis te laten maken met geometrische vormen. Voor het ontwerp betekent dat dat de synthese operator in staat moet zijn een klank bron zeer scherp over bepaalde vormen in het afluistervlak te bewegen. Hierbij komt eveneens kijken dat het karakter van de klank zodanig ontworpen moet zijn dat deze de vorm van het pad door de ruimte onder-

steunt.

2) Een andere doelstelling is bijvoorbeeld geschiedenis: het luistervlak kan worden ingedeeld in bepaalde geschiedkundige gebeurtenissen over een bepaald onderwerp. Iedere gebeurtenis wordt gerepresenteerd door een bepaalde klankgebeurtenis, de industriële revolutie wordt bijvoorbeeld gekenmerkt door klanken van een stoom machine. De opdracht voor het kind zou kunnen zijn dat hij de klankbeelden in de tijdlijn moet plaatsen. Dit vereist een feedback systeem, waarbij gebruik gemaakt kan worden van spraakherkenningstechnieken. De gebruiker draagt een draadloze microfoon waardoor hij zijn antwoorden kan inspreken. Het systeem kan de klanken van de geschiedenis in hun oorspronkelijke omgeving reproduceren.

3) Nog een voorbeeld voor een toepassing in het basis onderwijs is een soort auditieve topografie les door middel van GVS, waarbij het visueel beperkte kind de kaart moet leren door ruimtelijke auditieve weergave van de steden. De toets kan worden afgenomen met behulp van videotracking of floorpressure sensors waarmee de positie van het kind in relatie tot de geografische locatie van een stad in Nederland kan worden gecheckt.

De drie voorbeelden die hiervoor worden genoemd zijn verschillende vormen waarop men GVS in het basisonderwijs aan visueel gehandicapte kinderen zou kunnen vormgeven. In alle drie de voorbeelden is het gebruikte klankontwerp "beeldend" van aard. In de wiskundes is de klank die de cirkel moet aanduiden een beeldende gebeurtenis. Een klank verbeeld in de voorbeelden een object, fenomeen, stad of gebeurtenis uit de geschiedenis. We spreken in die gevallen van een 'beeldende gebeurtenis' Zoals we uit figuur 10 kunnen aflezen kan het klankontwerp naast beeldend, ook een 'complexe gebeurtenis' simuleren. Deze wordt duidelijk in volgend voorbeeld van een maatschappelijke doelstelling:

*Creëer een virtuele auditieve ruimte die dient als verkeerssimulator voor slechtziende kinderen.*

Wanneer men deze educatieve doelstelling voor deze doelgroep conceptualiseert en uiteindelijk wilt implementeren d.m.v. GVS, is een absolute nauwkeurigheid van de gesynthetiseerde klanken van levensbelang. Er moet een duidelijke afweging gemaakt worden tussen welke klanken van belang zijn en welke achtergrond. Deze afweging stelt directe eisen aan het GVS systeem. Daarbij komt dus kijken dat het systeem realtime moet kunnen reageren op de gedragingen van de gebruiker. De klankenobjecten in deze omgeving hebben een bepaalde status in de omgeving en geven de gebruiker bepaalde ruimtelijke informatie. Hoever de vrachtwagen of auto van de gebruiker verwijderd is hangt samen met het weergeven

van onze perceptie van afstand. Omdat dit zeer specifieke eisen aan de klank en het GVS systeem stelt worden dit 'complexe klank gebeurtenissen' genoemd.

Net zoals bij artistieke toepassingen van GVS, hebben de mogelijkheden voor praktische toepassingen dus invloed op het uiteindelijke eindproduct. Toepassingsmogelijkheden voor virtuele auditieve ruimten vragen dus verschillende eigenschappen van een golfveld synthese systeem. In bovenstaand hoofdstuk is geprobeerd duidelijk te maken welke elementen invloed hebben op het GVS en hoe zij verbonden zijn aan de aard van de doelstelling (maatschappelijk of artistiek). We moeten ervoor zorgen dat de mogelijkheden van het systeem flexibel inzetbaar zijn, willen we beide soorten toepassingen mogelijk kunnen maken. In de conclusie van deze scriptie zal tevens worden ingegaan op aanbevelingen voor de opleiding geluidstechnologie aan de HKU die hier mijns inziens uit voortvloeien.



## 5. Conclusie & aanbevelingen

De hoofdvraag van deze scriptie was: "Wat zijn de artistieke en maatschappelijke toepassingsmogelijkheden van golfveld synthese?" Wanneer men een GVS systeem voor ruimtelijk geluid op een adequate manier wil implementeren, dan is het allereerst belangrijk om kennis te hebben van de manier waarop geluid gemanipuleerd kan worden en van de effecten daarvan op de ervaring van het geluid. In deze scriptie is daarom eerst uitvoerig aandacht besteed aan zowel psycho-akoestiek als aan elektro-akoestiek. Met het onderzoek heb ik me verdiept in zowel richtinghoren, als conventionele electro-akoestiek, als golfveldsynthese. Door middel van een intensieve studie, interviews met mensen uit de beroepsgroep en een analyse van hetgeen op deze gebieden reeds is ontwikkeld, heb ik geprobeerd de betekenis van het fenomeen golfveld synthese te doorgronden en daarmee suggesties te kunnen doen voor de ontwikkeling van artistieke en maatschappelijke toepassingen.

Uit het onderzoek bleek duidelijk dat het van groot belang is om te weten hoe het komt dat wij richting horen alvorens wij klanken door middel van multipel luidspreker opstellingen in de ruimte plaatsen. Bij het genereren van ruimtelijk geluid gaat het immers in essentie om de auditieve perceptie van een persoon, ongeacht of dit nu GVS is of een andere vorm van elektro-akoestiek. Wanneer we het hebben over conventionele reproductie systemen is het extra evident dat wij kennis moeten hebben van het horen van richting. Deze systemen zijn immers gebaseerd op het 'voor de gek houden' van ons menselijke lokalisatie systeem. Als de auditieve perceptie niet strookt met het verwachte berekende resultaat is het bijzonder nuttig aan te kunnen duiden hoe die perceptie precies werkt. Het Franssen effect bood daarvan een heel duidelijk voorbeeld. Wanneer men zich op het terrein van de geluidsreproductie begeeft moet men dus eerst duidelijke kennis hebben van onze perceptie van die reproductie.

Wil men deze kennis praktisch toepassen binnen een GVS systeem, dan moet men vervolgens niet alleen kennis hebben van de theorie, maar zich ook goed bewust zijn van de randvoorwaarden waaraan een dergelijk systeem in de praktijk zal moeten voldoen, en moet men zich dus grondig bezinnen op de eigenschappen die een praktische implementatie van dit systeem moeten kenmerken. Met andere woorden: Welk doel wil men met deze praktische implementatie bereiken? Dit doel immers, is van groot belang voor het bepalen van het concept-ontwerp; wat dient het te doen en wat betekent dit voor de vormgeving, structuur en techniek van een dergelijk systeem?

Zowel op basis van de theorie in de hoofdstukken 2 en 3 als op basis van het overzicht met thans in Europa bestaande praktische toepassingen in het begin van hoofdstuk 4 kan ik concluderen dat een GVS systeem uitgebreide content biedt voor artistieke en maatschappelijke toepassingen. Daarnaast is het duidelijk dat er nog heel veel moet en kan gebeuren. Ik zou deze conclusie daarom willen besluiten met een aantal aanbevelingen aan educatieve instellingen voor muziektechnologie, zoals die aan de faculteit kunst media en technologie van Hoge School voor de Kunsten Utrecht, om de nieuwe ontwikkelingen op het terrein van GVS zo intensief mogelijk in het onderwijs te gaan integreren. Ik geef daartoe een aantal voorbeelden van vakken waarin dat zou kunnen.

#### Studio Technologie (ST)

GVS kan worden toegepast in lessen over akoestiek, het is een ideale methode om aan te tonen hoe geluiden zich in onze wereld manifesteren. Met de proef van Young is aan te tonen hoe geluidsgolven interfereren. Omdat het met golfveld synthese mogelijk is iedere ruimteakoestiek te synthetiseren kan men studenten de wetenschap van akoestiek met behulp van GVS onderwijzen.

#### Software ontwerp (SOGM) & ST

In een later stadium van de opleiding kan het GVS concept zelf behandeld worden in de lesstof. Studenten kunnen GVS vrijwel eindeloos door ontwikkelen, waardoor de mogelijkheden van het systeem zich kunnen uitbreiden, wat weer nieuwe content kan creëren voor innovatieve toepassingen.

#### Klank Ontwerp (KO)

Voor zowel de artistieke als de maatschappelijke toepassingsmogelijkheden zoals deze beschreven zijn in hoofdstuk 3, biedt GVS zeer veel perspectief voor een KO werkgroep. Klank ontwerp kan worden toegepast in de beide contexten die, zoals we hebben kunnen lezen, verschillende eisen aan zowel het klankontwerp zelf als aan het golfveld synthese systeem stellen. Het concept ontwerp eist verschillende invalshoeken. Studenten zouden naar mijn idee niet alleen onderwezen moeten worden in kunstzinnige klankontwerpen, maar ook in klankontwerpen die complexe gebeurtenissen en beeldende gebeurtenissen hoorbaar maken, waarbij hun klank ontwerp dus geen abstracte kunstzinnige voorstelling is, maar daadwerkelijk iets concreets voorstelt.

## Een nieuw vakgebied: GVS-toepassingen

Het daadwerkelijk ontwerpen van een praktisch toepasbaar GVS-concept aan de hand van een nauwkeurig omschreven doelstelling, daar komt vanzelfsprekend nog heel wat meer bij kijken dan in de drie hierboven genoemde contexten kan worden gerealiseerd. Ik zou daarom tot slot willen aanbevelen om niet alleen een speciale experimenteerstudio voor GVS te realiseren, maar voor conceptontwerp voor maatschappelijke toepassingen ook een nieuw afzonderlijk vakgebied in te gaan richten.

## **Nawoord**

Met veel tevredenheid en voldoening kijk ik terug op mijn EMMA-opleiding muziek technologie aan de HKU in het afgelopen jaar. Deze heeft mij in staat gesteld om mij grondig en zelfstandig verder te ontwikkelen op terreinen die mij hevig interesseren. De ontwikkeling die ik heb doorgemaakt heeft mij gestimuleerd om mij aan te melden voor een MA sonologie op het Haags Conservatorium, om mij verder te kunnen verdiepen in de theoretische en artistieke aspecten van golfveldsynthese. Mocht de HKU in de toekomst inderdaad besluiten om GVS een duidelijke plek in te opleiding te geven dan zou ik vanzelfsprekend heel graag bij een dergelijk proces betrokken raken (zij het, zolang ik nog bezig ben met mijn opleiding, natuurlijk vooralsnog slechts voor bijvoorbeeld één of twee dagen in de week).

## Literatuurverwijzing

### Boeken

- Begault, D.R. ( 1994). *"3D Audio sound for virtual reality and multimedia"*. Academic Press Professional, Chestnut Hill, MA, USA.
- Howard, D.M. & Angus, J. 2nd ed. (2001) *"Acoustics and Psychoacoustics"*. Butter worth-Heinemann, Oxford, UK.
- Schaffaer, P. (1966). *"Traktaat van de muzikale objecten: een interdisciplinair onderzoek"*. Nederlandse verkorte vertaling, Boehmer, K. (2006) Uitgeverij Tandem Felix, Ubbergen.
- Sliss, I.H. (1996). *"Audiologie: Horen in een wereld van geluid"*. Uitgeverij Coutinho BV. Bussem
- Zeilinger A. (2003) *"Einsteins Scheiler"*. Nederlandse vertaling, "Toeval!", Nienhuys, J.W. (2005) Uitgeverij Veen Magazines B.V. Diemen.

### Artikels

Grimm, E. Uit: Pro Audio Visie

- Omnisurround I: *"Surround voor muziek – introductie van een onderzoek"*. 12/03
- Omnisurround II: *"Hoe ga je om met drie luidsprekers van voren?"*. 01/04
- Omnisurround III: *"Localisatie met meerkanaals geluid"*. 02/04
- Omnisurround IV: *"Intensiteit- of looplooptijd- quadrofonie?"* 03/04
- Omnisurround V: *"Waar zetten we de soundmicrofoons neer?"* 04/04
- Omnisurround VI: *"Extraction of ambience information"*. 05/04
- Omnisurround VII: *"De visie van David Griesinger"*. 09/04
- Omnisurround VIII: *"Diffuus veld synthese"*. 11/04

### Papers AES

- Berkhout, A.J. & Vogel, P & Vries, D.de. (1992). *"Use of Wave Field Synthesis for Natural Reinforced Sound"*. TU-Delft. AES 3299 (4SR2.01).
- Boone, M.M. & Bruin W.P.J. de & Hornbach, U. (1999). *"Virtual Surround Speakers with Wave Field Synthesis"*. TU-Delft. AES 4928(L2)
- Boone, M.M. & Bruin, W.P.J. de. (2000). *"On the Applicability of Distributed Mode Loudspeakers Panels for Wave Field Synthesis Based Sound Reproduction"*. TU-Delft.

AES 5165 (S-7).

- Boone, M.M. & Verheijen, E.N.G. (1997). "*Qualification of Sound Generated by Wave Field Synthesis*". TU-Delft. AES 4457(H8).
- Boone, M.M. & Verheijen, E.N.G. (1993). "*Multi-Channel Sound Reproduction Based on Wave Field Synthesis*". TU-Delft. AES 3719 (A2-AM-1)
- Bruin, W. de & Boone, M.M. & Vries, D. de (2000). "*Sound Localisation in a Videconferencing System based on Wave Field Synthesis*". Laboratory of Acoustical Imaging and Sound Control, TU-Delft. AES 5144(M-4).
- Hameed, S. & Pakarinen, J. & Pulkki, V. (2004). "*Psychoacoustic Cues in Room Size Perception*". Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki University of Technology, Finland. AES 6084
- Sonke, J & Vries, D. de & Labeeuw, J. (1998) "*Variable Acoustics by Wave Field Synthesis: A Closer Look at Amplitude Effects*". TU-Delft. AES 4712 (P6-6)
- Start, E.W. & Valstar, V.G. & Vries, D.de. ( 1995). "*Application of spatial Bandwidth Reduction in Wave Field Synthesis*". TU-Delft. AES 3972 (H2).
- Verheijen, E.N.G. & Tol, P.F. & Boone, M.M. (1995) "*Evaluation of Loudspeakers Arrays for Wave Field Synthesis*". TU-Delft. AES 3974 (H4).
- Vries, D. de & Baan, J (1999). "*Auralization of Sound Fields by Wave Field Synthesis*". TU-Delft. AES 4927 (L2 )
- Vries, D. de (1995) "*Sound Enhancement by Wave Field Synthesis: Adaptation of the synthesis Operator to the Loudspeaker Directivity Characteristics*". TU- Delft. AES 3971 (H1)
- Vries, D.de & Reijnen, A.J. & Schonewille, M.A.(1994) "*The Wave Field Synthesis Concept Applied to Generation of Reflections and Reverberation*". TU Delft. AES3813 (P6.4)
- Zanolin, M. et al. (2000). "*Active Control of Noise by Wave Field Synthesis*". AES 5092 (D-3)

## Papers overig

- Alonso, F. et al. (2006) "*A Framework for Blind User Interfacing*". University Madrid, Spain.
- Blauert, J, (1983). "*Spatial Hearing. The Psychophysics of Human Sound Localisation*" (Vertaling "*Räumliches Hören*", J. Allen, Trans.). Cambridge, MA: MIT Press
- Boone, M.M. & Verheijen, E.N.G. & Tol, P. van. (1995). "*Spatia; Sound-Field Reproduction by Wave Field Synthesis*". Journal of Auditory Engineering Society, Vol. 43,

no.12 1995 December.

- Corteel, E. & Caulkins, T. (2002) "*Sound Scene Creation and Manipulation using Wave Field Synthesis*", IRCAM, Room acoustics team
- Dorp Schuitman, J. van. (2007). "*The Rayleigh 2.5. D Operator explained*". Laboratory of Acoustical Imaging and Sound Control, TU- Delft.
- Hartmann, W. M., & Rakerd, B. (1989). "*Localization of sound in rooms IV: The Franssen effect*". Journal of the Acoustical Society of America, 86(4), 1366-1373.
- Henning, G. B. (1974). "*Detect ability of interaural delay in high-frequency complex waveforms*". Journal of the Acoustical Society of America, 55, 84-90.
- Kyriakakis, C. (1997). "*Fundamental and Technological Limitations of Immersive Audio Systems*". Proceedings of the IEEE, vol. 86, No. 5 may, 1998
- Leakey, D.M., Sayers, B. M., & Cherry C. (1958). "*Binaural fusion of low and high frequency sounds*". Journal of the Acoustical Society of America, 30, 322.
- Leullier, Q. (2007) "*Limitations of the ITU 5.1. Surround Sound Standard*". Faculty of Architecture, Design and Planning, University of Sidney, Australië.
- Loomis, J.M. & Klatzky, R.L. & Golledge, R.G.(1999). "*Auditory Distance Perception in Real, Virtual, and Mixed environments*". In: Mixed reality: Merging real and virtual worlds", Y. Ohta and H. Tamura (Eds.). Blz. 201-214. Omsha, Tokyo.
- Murphy, D.T. & Kelly, C. & Tew, A.I. (2002) "*3D Audio in the 21st Century*". Music Technology Research Group, University of York, UK.
- Shinn-Cunningham, B. (2003). "*Acoustics and perception of sound in everyday environments*". Boston University. USA.
- Shinn-Cunningham, B.G. (2000) "*Distance Cues for Virtual Auditory Space*". Boston University, USA
- Speigle, J.M. & Loomis, J.M. (1993). "*Auditory Distance Perception by Translating Observers*". Department of Psychology, University of California. USA.
- Vries, D. de. (1996). "*Sound Reinforcement by Wavefield Synthesis: Adaption of the Synthesis Operator to the Loudspeaker Directivity Characteristics*". Journal of Auditory Engineering Society, Vol. 44. No. 12. 1996 December.
- Vries, D. de. & Start, E.W. & Valstar, V.G. (1994) "*The Wave Field Synthesis Concept Applied to Sound Reinforcement: Restrictions and Solutions*". Laboratory of Seismics and Acoustics, TU- Delft.

## Bijlage A: ADSR-Panner

De ADSR-panner is gemaakt met cycling74 Max/MSP pluggo, om de plug-ins te kunnen gebruiken moet 'pluggo runtime 3.6.1' zijn geïnstalleerd. Deze is te downloaden van:

<http://www.cycling74.com/downloads/pluggo>

### Envelopes

De ADSR-Panner is een panning effect dat gebaseerd is op aansturen van de luidsprekers van een stereo systeem door middel van ADSR envelopes. Het idee om geluid te spatialiseren door middel van onafhankelijke envelopes is gebaseerd op het Franssen-effect. Beschreven door N.V. Franssen in 1966. Het Franssen-effect legt uit dat de mens het directegeluid van een geluidsbron van zijn galm in een ruimte kan onderscheiden. Dit wordt door Franssen verklaard door het verschil in het volume verloop, de envelope. Dit is aan te tonen in een 2 kanaal stereofonische luidspreker opstelling.

Men zet een sinus toon abrupt aan in de linker luidspreker en vervolgens een fade-out van 250ms. Over dezelfde tijd schuift men op de rechter luidspreker de sinus in. Het psychoakoestische gevolg is dat de luisteraar de sinus niet uit de verwachte rechterluidspreker hoort maar uit de linker. Dit komt doordat ons gehoor het langzaam opbouwende signaal van de rechter luidspreker als reflecties van het linker beschouwd, zoals in een galmende ruimte. Met de ADSR-panner is het Franssen effect te creëren als mede tal van andere virtuele lokalisatie effecten.





## Instructies

- installeer pluggo runtime 3.6.1
- kopieer adsr\_panner.vst (mac) of adsr\_panner.dll (win) naar de plugin folder

### 1) *Source envelope / Echo envelope*

In de ADSR-panner kunnen 2 envelopes worden ingesteld, source envelope en echo envelope. Deze namen zijn ontleend aan het amplitude verloop van het directe geluid en die van de galm.

#### 1.1) *time*

De duur van de elementen van beide envelopes is in te stellen onder time. Let op: als men geen release of attack tijd ingeeft maar wel een amplitude, dan loopt de enveloppe bij niet terug naar 0, dit kan natuurlijk een wenselijk effect zijn.

#### 1.2) *cos pow*

De stijlheid van de attack, decay en release curve is in te stellen onder cos pow, 1. is de vorm van een standaard cosinus.

#### 1.3) *amp*

De amplitude van A en DSR is voor de beide envelope onafhankelijk in te stellen, variërende tussen de waarden 0. en 1.

### 2) *Flips channels*

Hiermee zijn de kanalen aan de beide envelopes toe te wijzen, bij het opstarten is kanaal 1 source envelope en kanaal 2 echo envelope.

### 3) *Lo-pass filter*

Het is optioneel om een lo-pass filter aan te zetten. Als lo-pass aan staat wordt de center frequency waarop gefilterd tussen 20 en 10.000Hz geschaalt met het verloop van de amplitude de beide kanalen.

### 4) *Triggers*

Met de buttons links onder in de plugin worden de envelopes getriggerd, de linker button is een 'forward trigger' (source->echo) en rechter een 'reverse trigger' (echo->source). ADSR-panner beschikt over midiin en midiout, als men in de host een midi kanaal gereed maakt voor opname van de midiout van ADSR-panner kunnen de triggers terwijl men klikt worden opgenomen. Er kan voor de triggers ook een score uitgeschreven worden, c3(60) is forward trigger en d3(62) is reverse trigger, de midiout van deze score moet naar midiin van ADSR panner worden gestuurd.

## Bijlage B: OCTA-panner

De ADSR-panner is gemaakt met cycling74 Max/MSP pluggo, om de plugins te kunnen gebruiken moet 'pluggo runtime 3.6.1' zijn geïnstalleerd. Deze is te downloaden van:

<http://www.cycling74.com/downloads/pluggo>

### Vertraging & Amplitude

Octa-panner is een spatialisatie algoritme voor het aansturen van maximaal 8 luidsprekers. Octa-panner stuurt iedere luidspreker onafhankelijk aan door gewogen delay lijnen en amplitude verzwakkingen. De delay-tijden worden berekend door de afstand door snelheid van het geluid te delen. Dit zorgt er voor dat wij het geluid daar lokaliseren waar het eerste golfvront vandaan komt. De amplitude curve is gebaseerd op een cosinus tot de macht verzwakking. De gebruiker kan hierdoor zelf bepalen hoe stijl het volume afloopt over de afstand van de virtuele geluidsbron. Beide domeinen, amplitude en delay werken in gescheiden frequentie gebieden met behulp van een crossover-filter.

Over het algemeen is het aan te raden om de delay lijnen alleen in het lage frequentie gebied te laten werken. Korte delay-tijden voor hogere frequentie veroorzaken kleuring in het geluid.



## Instructies

- installer pluggo runtime 3.6.1
- kopieer octa\_panner.vst & chan\_1.vst t/m chan\_8.vst (mac) of .dll (win) naar de plugin folder

1) Voor ieder luidspreker kanaal moet een bus aangemaakt worden. In het geval van 8 luidsprekers worden channel\_1.vst t/m channel\_8.vst over 8 bussen verdeeld. De output van een kanaal in uw host wordt naar deze 8 bussen gestuurd.

2) Vanuit octa-panner.vst worden de verschillende bussen aangestuurd.

2.1) Octa\_panner.vst bevindt zich op het kanaal wat gespatialiseerd gaat worden.

2.2) Onder de x/yslider moet men de x/y waarde van het speaker oppervlak invoeren ( $L*Bcm$ ).

2.3) Hierna kunnen rechtsboven de x/y lokaties en amplitudes curves voor alle luidsprekers worden ingegeven. De delaytijden worden automatisch berekend.

3) Octapanner is klaar voor gebruik, door de button te bewegen over het x/y slider vlak kan men een geluidsbron langs de luidsprekers laten bewegen.