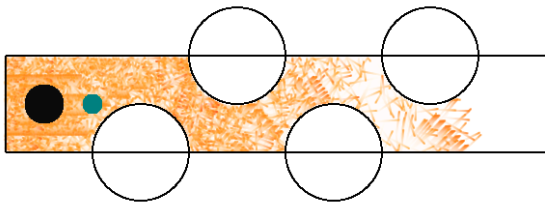


# Gel & Galm

of: De Minikathedraal



Wiebe-Marten Wijnja

---

# Gel & Galm

of: De Minikathedraal

Een onderzoek naar de nagalmtijd in hydrogel.

Wiebe-Marten Wijnja

---

Profielwerkstuk  
**Natuurkunde**

Alfa-College Groningen  
6VWO

**Begeleider:**  
Bart Toonen

6 januari 2014

# Voorwoord

Ik ben Wiebe-Marten Wijnja, leerling van het VAVO op het Alfa-college in Groningen. Wie had gedacht toen ik het potje met gel kocht in de Albert-Heijn drie maanden geleden, dat er zo'n fantastisch onderzoek uit zou volgen. Ik heb een fijne tijd gehad en het was erg leuk om met deze mysteries aan de slag te gaan en op een wetenschappelijke manier mijn bevindingen op te schrijven.

Maar, ik heb dit niet alleen kunnen doen. Er zijn een aantal mensen die ik graag wil bedanken voor de tijd, moeite, ideeën en interesse die ze gedeeld en getoond hebben om me te helpen met dit project: Allereerst, Bart Toonen, mijn natuurkundedocent en begeleider van dit profielwerkstuk. Ontzettend bedankt voor alle hulp, ideeën en feedback die ik altijd kon krijgen. Mijn ouders, Kristin en Jaap Wijnja, en mijn broer Jelte Klas Wijnja, voor hun onaflatende steun tijdens het maken van dit werkstuk. Jan Klug, muzikant en media programmer die me geholpen heeft met de microfoon en andere elektronica, en van wie het idee kwam om de microfoon en de speaker een siliconenomhulsel te geven. Wallace Clement Sabine, George Gabriel Stokes en alle andere wetenschappers op wiens onderzoek naar geluid en galm ik verder heb kunnen bouwen. De gebruiker genaamd 'user1086737' op de website Physics.StackExchange.com, die me in de richting van het Hot Chocolate Effect stuurde en mijn interesse in de gel-galm verder aanwakkerde. Alexander Lange, voor Quivira, het lettertype dat gebruikt is om meerdere figuren te verduidelijken en ook op de titelpagina aanwezig is. De fantastische artiest Scott Joplin en de muziekgroepen het Dave Brubeck Quartet en The Wintons voor de muziekfragmenten die gebruikt zijn om de kwalitatieve tests af te nemen.

En tot slot, U, omdat U de moeite neemt dit werkstuk te lezen. Dank U wel.

*Wiebe-Marten Wijnja*

*Peize, 6 januari 2014*

# Inhoudsopgave

<b>Inhoudsopgave</b>	<b>3</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>2 Wat is galm en hoe werkt het?</b>	<b>7</b>
2.1 Wat is geluid? . . . . .	7
2.2 Wat is galm? . . . . .	8
2.3 Natuurkundige eigenschappen die effect hebben op de galm . . . . .	9
2.3.1 Geluidssnelheid in het medium . . . . .	9
2.3.2 Reflectie van de muren . . . . .	10
2.3.3 Damping . . . . .	10
2.4 Galm-effecten . . . . .	10
2.4.1 Ruimtes met een natuurlijke galm . . . . .	11
2.4.2 Spring reverb . . . . .	12
2.4.3 Plate reverb . . . . .	12
2.4.4 Algorithmic reverb . . . . .	13
2.4.5 Convolution reverb . . . . .	13
<b>3 Waarom galmt gel?</b>	<b>14</b>
3.1 Wat is gel? . . . . .	14
3.2 Gel en galm . . . . .	15
3.3 Hot Chocolate Effect . . . . .	15
3.4 Wat heeft dit te maken met gel? . . . . .	17
<b>4 De perfecte gel-galm</b>	<b>18</b>
4.1 Gelkeuze . . . . .	18
4.1.1 Haargel . . . . .	18
4.1.2 Gelatine . . . . .	19
4.1.3 Polyacrylzuur . . . . .	19
4.2 Muur-materiaalkeuze . . . . .	19
4.3 Vorm van de ruimte . . . . .	20
4.4 Microfoon & Speaker . . . . .	20
4.4.1 Dynamische Speaker . . . . .	21
4.4.2 Piezoelectronische Speaker/Microfoon . . . . .	21
4.4.3 Magnetosctricctie Speaker . . . . .	21
4.5 Gel-galm vs. de rest . . . . .	21
4.6 Samenvatting . . . . .	22
<b>5 Onderzoek</b>	<b>24</b>
5.1 Kwantitatief onderzoek . . . . .	25
5.1.1 Witte Ruis . . . . .	25
5.1.2 Metronoom . . . . .	25
5.2 Kwalitatief onderzoek . . . . .	25



5.2.1	Amen Break . . . . .	25
5.2.2	The Entertainer . . . . .	25
5.2.3	Take Five . . . . .	26
5.3	Samenvatting . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>27</b>
6.1	Discussie & aanbeveling voor vervolgonderzoek . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Nawoord</b>	<b>28</b>
	<b>Bijlages</b>	<b>28</b>
<b>I</b>	<b>Bouwspecificaties</b>	<b>29</b>
I.1	Ruimte . . . . .	29
I.2	Gel . . . . .	29
I.3	Elektronica . . . . .	31
<b>II</b>	<b>Formule van Sabine</b>	<b>33</b>
<b>III</b>	<b>Absorptiecoëfficiënten van Muurmaterialen</b>	<b>34</b>
<b>IV</b>	<b>2D Sound Room Simulator</b>	<b>36</b>
IV.1	Concept . . . . .	36
IV.2	Opties . . . . .	36
IV.3	Vergelijking van ruimtevormen . . . . .	37
	<b>Bronvermelding</b>	<b>39</b>

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

De mensheid is altijd al op zoek geweest naar het maken van nieuwe klanken en het aanpassen van bestaande klanken. Muziek bestaat al duizenden jaren. In het oude Griekenland werden amphitheatres gebouwd op een manier die het geluid van het podium moest versterken zodat het goed op de tribune te horen was.

In de middeleeuwen werden kerken en kathedralen gebouwd die als belangrijke eigenschap hadden dat het geluid lang aanhield: Galm.

Galm houdt muzikanten al heel lang bezig, omdat galm geluiden mooier of spannender kan laten klinken. Te veel galm zorgt er echter voor dat alle geluiden een grote brij worden en niet meer te identificeren zijn. Elk muziekstuk is geschreven voor een bepaalde hoeveelheid galm. Heel lang betekende dat dat het muziekstuk alleen maar uitgevoerd kon worden in ruimtes met vergelijkbaar veel galm.

Toen het met de komst van de elektronica mogelijk werd om geluid op te nemen en te versterken, werden er al gauw apparaten ontwikkeld die de galm van bepaalde ruimtes konden simuleren, zodat muzikanten de muziek overal zouden kunnen spelen.

In onze huidige tijd waar muziek oneindig is te manipuleren via de computer zijn galm-effecten nog steeds belangrijk: Muziek wordt vaak in een galmloze ruimte opgenomen zodat achteraf precies bepaald kan worden hoe veel galm er zal moeten worden toegevoegd.

De digitale galm-effecten die tegenwoordig zijn ontwikkeld klinken realistisch, maar vergen erg veel rekenkracht van de computer. Hierom is de zoektocht naar alternatieve, realistisch klinkende oplossingen nog altijd een belangrijke kwestie.

In dit profielwerkstuk wordt de volgende hoofdvraag onderzocht:

**Is het mogelijk om een realistisch klinkend galm-effect te realiseren met behulp van eenvoudig te verkrijgen hydrogelen<sup>1</sup>.**

Om dit uit te zoeken werden de volgende deelvragen beantwoord:

- Wat is galm en hoe werkt dit fenomeen? (*Hoofdstuk 2*)
- Waarom galmt geluid in gel veel langer dan in lucht? (*Hoofdstuk 3*)
- Kan een nieuw soort galm-effect gebouwd worden met gebruik van gel? (*Hoofdstuk 4*)
- Hoe klinkt deze nieuwe gel-galm anders dan al bestaande galm-effecten? (*Hoofdstuk 5*)

---

<sup>1</sup>Een gel-samenstelling gebaseerd op verbindingen met water.

Op grond van natuurkundige hypothesen is geprobeerd een galm-effect te maken dat gebruikmaakt van gel. Onderzoek is gedaan naar de frequentierespons en de nagalmtijd van het gemaakte apparaat. Daarnaast is er kwalitatief onderzoek gedaan naar de klank van de gel-galm door een panel van proefpersonen de bewerkte geluiden te laten beoordelen.

Dit verslag is grotendeels opgebouwd in de volgorde van de hierboven beschreven deelvragen. Per hoofdstuk komt één deelvraag aan bod. Aan het eind van het verslag volgt de conclusie uit het onderzoek (*Hoofdstuk 6*). In de bijlages die daarna volgen zijn de gedetailleerde resultaten van de onderzoeken en het bouwproces te vinden.

## Hoofdstuk 2

# Wat is galm en hoe werkt het?

*Bij het verzamelen van gegevens voor dit hoofdstuk is voornamelijk gebruik gemaakt van de BINAS, (NVON Commissie, 2008)*

Galm is iets waarmee men dagelijks wordt geconfronteerd: Iedereen weet dat het beter klinkt om te zingen onder de douche dan in de auto. Om te snappen hoe galm werkt, is het belangrijk om erbij stil te staan wat geluid nu eigenlijk is.

### 2.1 Wat is geluid?

**“Een geluid ontstaat als de deeltjes in een medium -gasvormig (gewoonlijk lucht), vast of vloeibaar- in beweging worden gezet en de rustoestand wordt verstoord.”**(Ecophon Saint-Gobain, 2002)

Deze verstoring kan plaatsvinden doordat iemand iets zegt, een muziekinstrument bespeeld wordt, een speaker een geluid maakt of doordat er op een andere manier een trilling ontstaat. Geluid is evenals licht, beweging en warmte een vorm van energie. Geluid verspreidt zich in een golf en is een mechanische trilling, in tegenstelling tot bijvoorbeeld licht en radiogolven, die elektromagnetische golven zijn. Anders dan licht kan geluid zich dus niet door een vacuum verspreiden.

Evenals golven op het wateroppervlak passeren geluidsgolven een vast punt met een bepaalde snelheid. Deze snelheid is afhankelijk van de *geluidssnelheid* in het medium waar de geluidsgolven zich bevinden. De natuurkundige formule voor de geluidssnelheid  $c$  is:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$K$  is de compressiemodulus (hoe hoger, hoe moeilijker het is de stof in te drukken) en  $\rho$  is de dichtheid van de stof.

Het aantal golfpieken en golfdalen dat per seconde zo'n vast punt passeert wordt de *frequentie* genoemd. Hoe hoger de frequentie, hoe hoger de toon. Frequentie wordt uitgedrukt in **Herz**(Hz), het aantal trillingen per seconde.

De geluidsdruk of geluidsterkte, de hoogte van de pieken en dalen van de geluidsgolf, wordt ook wel de *amplitude* genoemd. Bij een hogere amplitude klinkt een geluid luider. Het laagste geluidsdrukverschil dat mensen kunnen horen wordt de gehoordrempel genoemd. Het hoogste geluidsdrukverschil dat een mens kan verdragen, noemen we de pijngrens. De geluidsdruk van de pijngrens is een miljoen keer hoger dan die van de gehoordrempel. Het is echter onpraktisch om te werken met getallen die over zo'n breed interval verspreid liggen. Daarom wordt voor Amplitude gebruik gemaakt van een logaritmische schaal. De eenheid voor deze schaal heet **Decibel**(dB).

Als geluidsgolven op de grens van het ene medium en het andere komen, wordt een deel van het geluid *gereflecteerd*, terwijl een ander deel van het geluid wordt *geabsorbeerd*. Op geluidsabsorptie wordt dieper ingegaan in 2.3.2. De reflectie van geluidsgolven werkt op dezelfde manier als die van lichtgolven: Er geldt de **Wet van Reflectie**:  $\angle i = \angle r$ <sup>1</sup>.

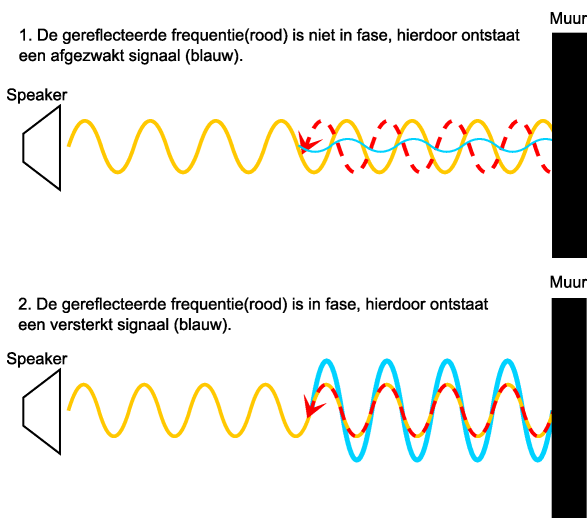
Het kan gebeuren dat teruggekaatste golven gaan *interfereren* met de golven die al in de ruimte aanwezig zijn. Hierdoor worden bepaalde frequenties afgezwakt en andere frequenties juist versterkt, waardoor het te horen geluid vervormd wordt. (Figuur 1)

Golven die in een ruimte zo heen-en-weer kaatsen dat ze zichzelf versterken worden ook wel *staande golven* genoemd.

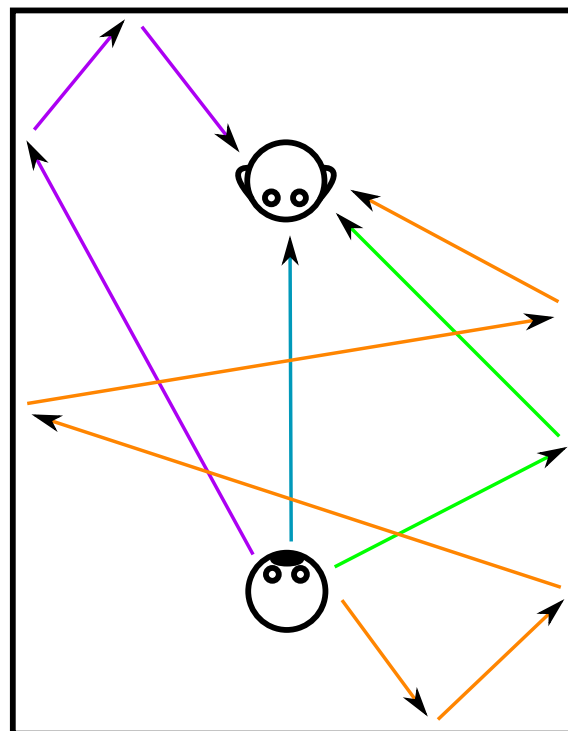
## 2.2 Wat is galm?

Galm is het blijven hangen van geluid nadat het oorspronkelijke geluid is gemaakt. Galm vindt plaats doordat geluid zich vanaf de geluidsbron niet in één, maar in alle richtingen verspreidt: Een deel van het geluid komt rechtstreeks aan bij de ontvanger, een ander deel weerkaatst via een muur en komt dan bij de ontvanger terecht en nog weer andere delen van het geluid kaatsen meerdere keren via de muren voordat ze de ontvanger bereiken. (Figuur 2)

Doordat het volume van het geluid lager wordt als deze tegen een muur kaatst wordt de geluidsterkte in de loop van de tijd steeds minder, totdat het geluid uiteindelijk zo zacht is geworden dat het onhoorbaar is geworden.



**Figuur 1:** Twee voorbeelden van geluidsreflectie. In het eerste voorbeeld is er sprake van afzwakking van een geluid, in het tweede van versterking. Voorbeeld 2 is een staande golf.



**Figuur 2:** Meerdere geluidsgolven kaatsen op verschillende manieren van geluidsbron naar ontvanger, waardoor een galm-effect ontstaat.

<sup>1</sup>De hoek van de invallende golf is gelijk aan de hoek van reflecterende golf.

Hoe sterk de galm in een ruimte is wordt vaak gemeten als de *(na)galmtijd*. De galmtijd is de tijd waarin een geluid nog te horen is nadat de geluidsbron is uitgeschakeld.<sup>2</sup>

## 2.3 Natuurkundige eigenschappen die effect hebben op de galm

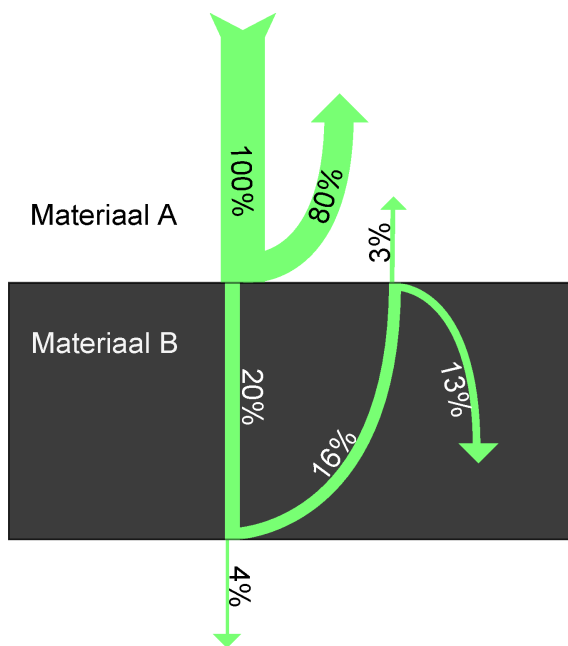
In sommige ruimtes is dit effect zeer groot en kan een geluid meer dan tien seconden naklinken. In andere ruimtes is er nagenoeg geen galm te horen. Er zijn meerdere natuurkundige eigenschappen die een effect hebben op de galmtijd:

- De geluidssnelheid in de ruimte.
- De reflectie van de muren.
- De demping in de ruimte.

Deze drie aspecten worden in de volgende paragrafen nader besproken.

### 2.3.1 Geluidssnelheid in het medium

De *geluidssnelheid* van het medium, ofwel de stof (of verzameling stoffen) waarmee de ruimte gevuld is en waar het geluid dus doorheen gaat, kan een groot verschil maken op de lengte van de galm. Hoe lager de geluidssnelheid ligt, hoe langer het duurt voordat de geluidsgolven tegen de muren kaatsen en de ontvanger bereiken. Hierdoor worden de geluidsgolven die de ontvanger ontvangt uitgesmeerd over een langere tijd, waardoor de galm langer zal klinken.



**Figuur 3:** Een deel van het geluid wordt gereflecteerd terwijl een ander deel van het geluid wordt geabsorbeerd. Hoe groot deze verhouding is wordt bepaald door de absorptiecoëfficiënt. In dit voorbeeld is de absorptiecoëfficiënt 0.2:  $\frac{1}{5}$  van het geluid wordt geabsorbeerd en  $\frac{4}{5}$  wordt gereflecteerd.

<sup>2</sup>De wetenschappelijke definitie is als volgt: De nagalmtijd ( $RT_{60}$ ) is de tijd tussen het uitschakelen van een geluidsbron en het moment dat het geluidsniveau met 60 dB is gedaald.

Hoe hoog de geluidssnelheid in een stof is hangt weer van een tweetal andere eigenschappen af: de elasticiteit en de dichtheid van het medium waar het geluid doorheen gaat. (Dit is te zien in de formule voor de geluidssnelheid, gegeven in paragraaf 2.1)

### 2.3.2 Reflectie van de muren

De zogenaamde *absorptiecoëfficiënt* van een materiaal bepaalt de hoeveelheid geluid die niet wordt teruggekaatst als deel van het totale geluid waaraan dat oppervlak is blootgesteld (Figuur 3). Als de muren een lage absorptiecoëfficiënt hebben zal, elke keer dat een geluidsgolf tegen de muur komt, een groter deel van de geluidsgolf teruggekaatst worden, waardoor het langer zal duren totdat al het geluid uit de ruimte is verdwenen. In Bijlage II wordt dieper op dit onderwerp ingegaan en wordt de zogenaamde formule van Sabine beschreven waarmee de galmtijd van een ruimte voorspeld kan worden, met behulp van de absorptiecoëfficiënten van de muurmaterialen.

### 2.3.3 Damping

Naarmate een geluid een langere weg door een medium aflegt zal dit geluid meer en meer energie verliezen, totdat het uiteindelijk onhoorbaar is geworden. Dit wordt *damping* genoemd. Damping wordt veroorzaakt doordat geluid bestaat uit deeltjes die tegen elkaar moeten botsen om energie door te geven. Van tijd tot tijd zal het gebeuren dat een deeltje niet tegen een ander deeltje botst, waarbij dus een deel van de energie verloren gaat.

Dit effect wordt beschreven in *Stoke's Wet*, beschreven door Stokes (1849).

$$\alpha = \frac{2\eta\omega^2}{3\rho V^3}$$

$\alpha$  is de factor waarmee het geluid vermindert per afstand afgelegd.  $\eta$  is de elasticiteitscoëfficiënt van het medium.  $\omega$  is de frequentie van het geluid.  $\rho$  is de dichtheid van het medium.  $V$  is de geluidssnelheid in het medium.

De hoeveelheid damping die plaatsvindt is afhankelijk van de toonhoogte van het geluid<sup>3</sup>, alswel als wederom de geluidssnelheid in het medium, de elasticiteit van het medium en de dichtheid van het medium.

## 2.4 Galm-effecten

Om te kunnen begrijpen hoe de gel-galm zal verschillen van de tot nu toe al bestaande concepten, moeten deze bestaande galm-effecten ook kort toegelicht worden. Op dit moment zijn er vijf wijdverbreide technieken om galm te gebruiken in muziek:

Akoestisch/Analoog:

- Ruimtes met een natuurlijke galm
- Spring reverb (Verengalm)
- Plate reverb (Plaatgalm)

Digitaal:

- Algorithmic reverb (algoritmische galm)
- Convolution reverb (Convolutiegalm)

---

<sup>3</sup>Geluiden met een hogere frequentie worden sneller gedempt dan geluiden met een lagere frequentie

### 2.4.1 Ruimtes met een natuurlijke galm

Er zijn een hoop verschillende ruimtes te vinden die een natuurlijke galm hebben. Een voorbeeld waarmee iedereen bekend is is bijvoorbeeld een kerk of kathedraal (Figuur 4). Veel trappenhuisen galmen ook goed. Maar ook sommige natuurlijke grotten hebben galm. Deze ruimtes galmen zo goed omdat:

- Ze een grote inhoud hebben, waardoor er meer tijd zit tussen de weerkaatsingen van het geluid op de muren en het bereiken van de luisteraar.
- De muren zijn gemaakt van steen of beton, wat het geluid goed weerkaatst. Een badkamer heeft ook een goede galm, vanwege de keramische tegels waarmee vloer en muren vaak zijn bekleed <sup>4</sup>.
- Vaak zijn deze ruimtes gevuld met voorwerpen waardoor een deel van de geluidsgolven nog veel verder moet kaatsen. Hierdoor worden de echo's waar de galm uit bestaat nog gelijkmatiger verdeeld. Denk hierbij aan de pilaren in een kerk, of de trappen in een trappenhuis.

De vorm van de ruimte en waar je de geluidsbron en de ontvanger neerzet kan ook erg belangrijk zijn. In Bijlage IV wordt dieper ingegaan op verschillende vormen van ruimtes, om de meest geschikte vorm voor de gel-galm te vinden.

#### Reverb room

Toen men begon om muziek op te nemen met de eerste elektronische apparatuur heeft men ook geprobeerd om een kleine ruimte zo'n groot mogelijke galm te geven, de zogenaamde *Reverb Room*. Deze ruimtes hadden vaak muren van beton, pilaren en andere voorwerpen die het geluid gelijkmatig moesten verdelen en daarnaast was er voor gezorgd dat de muren en het plafond geen van allen parallel aan elkaar waren. Dit om mogelijke staande golven te voorkomen, die het geluid zouden kunnen vervormen.(Figuur 5) (University of Salford Manchester, 2010).

Het tegenovergestelde van een Reverb Room is een Anechoïsche kamer, een kamer die zo gemaakt is dat er helemaal geen galm plaatsvindt.



**Figuur 4:** Een kathedraal (In dit geval: le Cathédrale Notre-Dame de Laon) is een ruimte met een natuurlijke galm. (Fotograaf: Leuty (2010)).



**Figuur 5:** Een Reverb Room, met hangende platen die voor extra galm moeten zorgen. (Fotograaf: Bick (2008)).



## 2.4.2 Spring reverb

De *spring reverb* (vertaald uit het engels: verengalm) (Figuur 6) is een apparaat waarbij de galm wordt gesimuleerd door een veer te laten trillen. Een springveer wordt bevestigd op een manier waarin hij in de lengte vrij kan bewegen. Dit gebeurt meestal door de veer met kortere veren aan de buitenkant van de doos vans te maken. Aan beide uiteinden van de veer wordt een magneet geplaatst. Om beide magneten heen bevinden zich spoelen die aan de wand van de verengalm vast zitten.

Door de ene spoel wordt een geluidssignaal dat is opgevangen door een microfoon gestuurd. Door het elektromagnetisch veld dat hierdoor veroorzaakt wordt gaat de eerste magneet, en de veer die er aan vast zit, trillen.

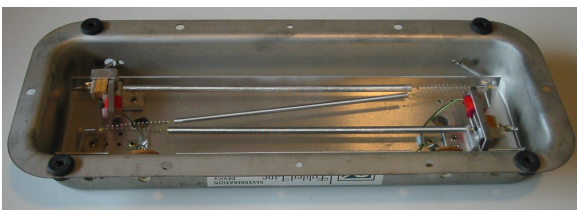
De trillingen stuiteren in de veer heen en weer. Elke keer dat de trilling aan het uiteinde van de veer is aangekomen, zal een deel van de energie afgestaan worden aan de andere magneet. Door het trillen van deze magneet ontstaat er weer een elektronische stroom in de tweede spoel. Dit tweede signaal is het geluid inclusief de galm.

De spring reverb is simpel te bouwen en hoeft niet erg groot te zijn. Maar het gebruik van een veer als benadering van de heen-en-weer kaatsing van geluidsgolven in een ruimte heeft een groot nadeel: Doordat geluiden in de veer maar in één dimensie (heen en weer in de lengte van de veer) kunnen reizen, zullen er snel interferentiepatronen gaan plaatsvinden doordat het geluid zichzelf tegenkomt. Hierdoor zijn bepaalde frequenties veel prominenter aanwezig in het outputsignaal en zijn andere frequenties nagenoeg onhoorbaar. Dit zorgt er voor dat de spring reverb een 'metalige' klank heeft, en niet realistisch klinkt.

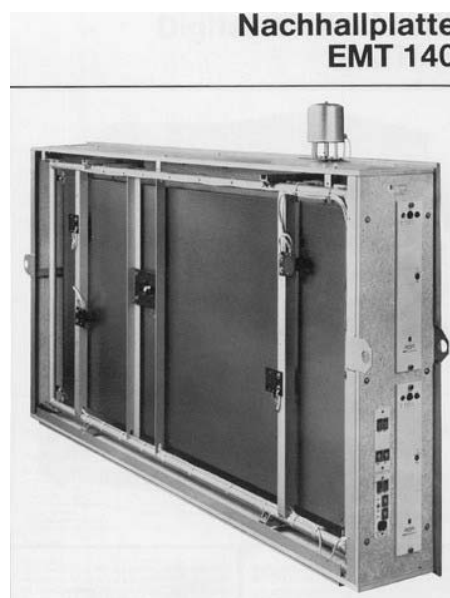
Desondanks wordt ook tegenwoordig nog veel gebruik gemaakt van de spring reverb, vanwege zijn karakteristieke speciale geluid.

## 2.4.3 Plate reverb

De *plate reverb* (vertaald uit het engels: plaatgalm) (Figuur 7) is uitgevonden in dezelfde tijd als de verengalm. Bij dit apparaat wordt een grote metalen plaat gebruikt om in twee dimensies golven



**Figuur 6:** Een klassiek voorbeeld van een spring reverb, met een opgebouwen veer.  
(Bron: Wikipedia.org)



**Figuur 7:** De EMT-140 was een van de eerste plate reverbs.  
(Bron: <http://mixonline.com>)

<sup>4</sup>Hierom vinden veel mensen het zo fijn om te zingen onder de douche.

doorheen te sturen. In het midden is een speaker bevestigd die heel dicht bij de plaat hangt. Aan beide uiteinden van de plaat zijn microfoons, wederom heel dicht bij de plaat zonder deze zelf te raken. De plaat zelf is opgehangen met behulp van veren of touwtjes, om te zorgen dat deze vrij kan trillen. Sommige plate reverb-systemen hebben ook nog twee kleinere platen met daarop vilt. Deze platen zitten stevig vast, maar zijn met rails te verschuiven. Hierdoor kan de galmengte worden aangepast.

De plate reverb klinkt veel beter dan de oudere spring reverb, maar vanwege zijn grootte (vergelijkbaar met die van een klerenkast) en zwaarte en door de kosten om zo'n apparaat te bouwen werd de plate reverb alleen door grote, ijke studios aangeschaft. Tegenwoordig zijn plate reverbs dan ook ontzettend moeilijk om te vinden.

#### 2.4.4 Algorithmic reverb

Met de komst van het digitale tijdperk werd het mogelijk om de computer in te zetten om geluidseffecten te berekenen. Het duurde niet lang voordat de *algorithmic reverb* (vertaald uit het engels: algoritmische galm) werd gemaakt. Deze effecten bestaan uit een algoritme dat op de computer wordt uitgevoerd.

Meestal wordt hier gebruik gemaakt van meerdere<sup>5</sup> elektronische echo's die allemaal een verschillende echo-tijd hebben om zo een galm na te bootsen. Een groot voordeel van de Algorithmic Reverb is dat het heel eenvoudig is om instellingen te wijzigen en een groot scala aan verschillende ruimtes na te bootsen.

Een nadeel is echter dat ook deze algoritmes niet perfect zijn, en vaak klinken Algorithmische Reverbs dan ook niet heel realistisch. Het is heel veel voorkomend dat een geluid vlak na de eigenlijke inzet luider wordt door dit galm-effect, wat bij lange galmtijden zeer opvalt.

#### 2.4.5 Convolution reverb

Het laatste soort galm is de *convolution reverb* (vertaald uit het engels: convolutie-galm). Convolutie is een wiskundige bewerking waarbij alle waarden in één signaal worden vermenigvuldigd met de waarden van een tweede signaal.

Om convolutie-galm te gebruiken dient eerst een *Impulse Response* gemaakt te worden: een kort geluid<sup>6</sup>, opgenomen in een ruimte met een bepaalde galm. Door vervolgens het oorspronkelijke geluid hier weer uit te filteren houdt men alleen de galmrespons van de ruimte over.

Convolution reverbs zijn op dit moment de meest realistisch-klinkende galm-effecten. Het aanpassen van de galm is echter erg moeilijk: Alleen de galmen van ruimtes die van tevoren zijn opgenomen kunnen worden gebruikt. Fine-tunen is dus nagenoeg onmogelijk. Een groot tweede nadeel is dat de wiskundige berekeningen die een computer moet uitvoeren om dit effect teweeg te brengen zeer veel rekenkracht vergen. Het is dan ook vaak niet mogelijk om dit effect live te gebruiken, maar alleen maar voor het achteraf mixen van muziek.

In dit hoofdstuk is gekeken naar wat de fenomenen 'geluid' en 'galm' eigenlijk zijn. Deze informatie zal in het volgende hoofdstuk gebruikt worden om de galm in gel te verklaren.

---

<sup>5</sup>10 tot 20. Soms meer, maar men loopt al snel tegen de maximale rekensnelheid van de hedendaagse computers aan.

<sup>6</sup>Vaak een klik, het knappen van een ballon of het schot van een startpistool of tegenwoordig ook een door de computer gemaakt geluid. (Adriaensen, 2006).

## Hoofdstuk 3

# Waarom galmt gel?

Het potje met haargel dat gekocht is bij de Albert Heijn had een rare eigenschap. Als er tegenaan getikt werd bleef het potje heel lang naklinken. Blijkbaar was hier sprake van een soort galm. Niet alle soorten gel hebben deze eigenschap; na meerdere merken en soorten uitgeprobeerd te hebben is ondervonden dat lang niet alle gel werkt. Het is belangrijk dat de gel erg stevig is en dus niet zomaar meegeeft: gel die meegeeft blijft niet lang genoeg trillen om een galm te produceren.

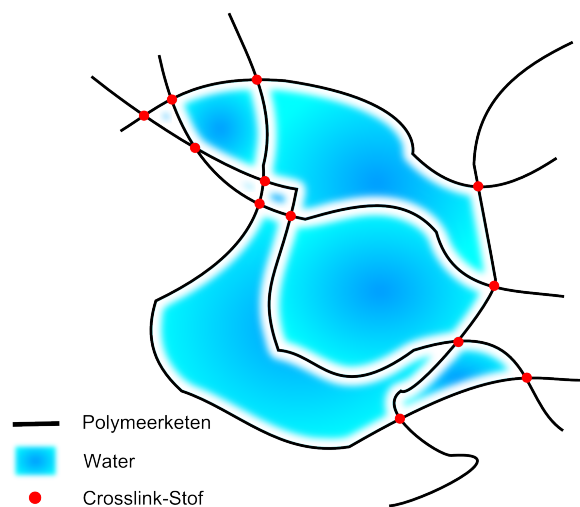
Voordat op zoek gewonnen kan gaan naar de oorzaak van galm in gel, moet eerst begrepen worden wat gel eigenlijk is.

### 3.1 Wat is gel?

Gel is een vast, pudding-achtig materiaal. Voor het grootste gedeelte bestaat gel uit een vloeistof, die is ingesloten door een driedimensionale structuur van een vaste stof, een netwerk van polymeerketens (Figuur 9). Een goede analogie kan zijn om de gel voor te stellen als driedimensionaal bubbeltjesplastic: Bubbeltjesplastic bestaat voor meer dan 95% uit lucht en maar voor een klein deel uit plastic. Maar deze plastic laagjes zitten zo om de lucht heen dat de lucht niet uit de bubbeltjes kan ontsnappen (Figuur 8). Zo ontstaat een elastische maar toch stevige structuur. Een gel heeft vergelijkbare



**Figuur 8:** Bubbeltjesplastic of Noppenfolie is een goede analogie voor gel. (Bron: Wikipedia)



**Figuur 9:** Schematische structuur van gel. Polymeerketens maken een driedimensionale raamstructuur waar grote groepen watermoleculen in gevangen blijven zitten.

eigenschappen: De meeste gellen bestaan voor 90-99% uit een bepaalde vloeistof en maar een paar procent zijn de polymeerketens. Gellen zijn elastisch en stevig.

Alhoewel er veel verschillende soorten gellen zijn zal er in dit profielwerkstuk alleen maar sprake zijn van hydrogelen: Dit zijn gellen waarbij water de vloeistof tussen de polymeerketens is. Hydrogelen zijn de meest voorkomende gellen en ze zijn makkelijk te verkrijgen. Alle soorten haargel zijn hydrogelen<sup>1</sup>.

Maar waarom blijft in gel een geluid zo veel langer galmen dan in lucht? Blijkbaar heeft gel gunstigere waardes voor de natuurkundige eigenschappen die te maken hebben met galm. Om dus uit te vinden waarom gel zo veel beter galmt, moeten deze eigenschappen op een rijtje worden gezet en met de eigenschappen van lucht worden vergeleken.

## 3.2 Gel en galm

Omdat er nog geen metingen zijn uitgevoerd en er voor zover bekend geen eerder onderzoek gedaan is naar de geluidssnelheid in (haar)gel, kunnen er op dit moment alleen maar kwalitatieve vergelijkingen gedaan worden tussen gel en lucht.

- geluidssnelheid: 343m/s in lucht <sup>2</sup>. In gel is deze nog onbekend. Maar, aangezien gel voor meer dan 95 % uit water bestaat (Kabiri et al., 2003), zou de geluidssnelheid in gel dicht bij die in water kunnen liggen(1484m/s <sup>3</sup>). Dit kan de galm niet verklaren, want om meer galm te veroorzaken zou de geluidssnelheid juist **lager** moeten liggen dan die van lucht.
- Reflectie van de muren. Zowel het doosje gevuld met lucht als het doosje gevuld met gel hebben dezelfde muur gemaakt van plastic <sup>4</sup>. Het verschil in reflectie is daardoor miniem en kan het verschil in galm ook niet verklaren.
- Damping van het medium. De damping is zeer afhankelijk van de hoogte van het geluid. Bekend is dat water een lagere damping heeft dan lucht en dat eenzelfde geluid in water dus veel verder kan reizen voordat het is weggestorven.(Stokes, 1849). Wederom ervan uitgaande dat gel op een vergelijkbare manier moet reageren als water, omdat het voor een heel groot deel uit water bestaat, zou dit dus een verschil kunnen maken. Maar kan hiermee alle galm verklaard worden?

Na meer bronnen te hebben gelezen en experts op het Internet te raadplegen bleek dat er een belangrijk aspect buiten beeld was gebleven, waardoor de geluidssnelheid in het potje met gel absoluut niet te vergelijken is met die van water. Er is namelijk iets anders aan de hand dat de geluidssnelheid volledig verandert...

Het zogenaamde **Hot Chocolate Effect**.

## 3.3 Hot Chocolate Effect

Het Hot Chocolate Effect, ook wel bekend als het **Allasonic Effect**, is een fenomeen dat voor het eerst in 1982 beschreven werd door een wetenschapper genaamd Frank Crawford. Het effect is heel eenvoudig te reproduceren:

1. Men neme een beker, gevuld met heet water, koffie of warme chocolademelk (Figuur 10).

---

<sup>1</sup>Haarwax, daarentegen, is een ander product dat geen gel is maar bestaat uit wassen. Haarwax is meestal vettig en niet op waterbasis.

<sup>2</sup>Bij kamertemperatuur (20°C). (BINAS, 2008, Tabel 15A)

<sup>3</sup>'normaal' water, wederom bij kamertemperatuur (20°C). Exacte samenstelling van het water is onbekend. (NVON Commissie, 2008)

<sup>4</sup>Polypropeen, uitgaande van het symbool 'PP' dat te vinden is op de onderkant van het doosje

2. Roer de vloeistof goed door met een lepel.
3. Tik nu meerdere keren met de lepel tegen de onderkant van de beker.
4. Elke tik zal een toon produceren die hoger is dan de vorige, totdat het effect op een bepaald moment is uitgewerkt en de toon niet verder stijgt.
5. Om het effect te herhalen hoeft alleen de beker opnieuw doorgeroerd te worden.

Wat hier gebeurt is dat doordat de vloeistof geroerd wordt er kleine luchtbelletjes in de vloeistof worden gevangen. Dit verlaagt de geluidssnelheid in de vloeistof drastisch. Op het moment dat er vervolgens tegen de onderkant van de beker getikt wordt, komt een deel van de luchtbelletjes weer vrij. Hierdoor stijgt de geluidssnelheid weer. (Zie ook Figuur 11)

De toon die ontstaat als op de onderkant van de beker getikt wordt is een staande golf met een frequentie die wordt bepaald volgens  $f = 0.25 \frac{v}{h}$ . Hier is  $v$  de geluidssnelheid en  $h$  de hoogte van de vloeistof in de beker. De toonhoogte wordt beïnvloed door het verschil in geluidssnelheid tussen de vloeistof met, en de vloeistof zonder bubbeltjes.

### Natuurkundige verklaring

Maar hoe kan het dat de geluidssnelheid verandert als er luchtbelletjes door de vloeistof gemengd worden? Tijd om opnieuw de formule voor de geluidssnelheid te bekijken:

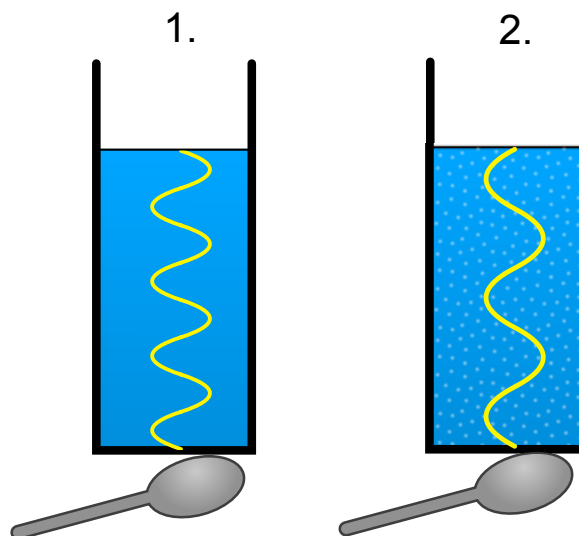
$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$c$  is de geluidssnelheid,  $K$  de compressiemodulus en  $\rho$  de dichtheid.

Op het moment dat luchtbelletjes in het water gevangen zitten is het water makkelijker samen te persen. Hierom zal  $K$  lager worden.



**Figuur 10:** De warme drank waar het Hot Chocolate effect naar vernoemd is. (Fotograaf: drinkpoison (2008))



**Figuur 11:** Het Hot Chocolate Effect. In beker 1 ontstaat een bepaalde toon vanwege de hoogte van de vloeistof en de geluidssnelheid. In beker 2 zitten kleine luchtbelletjes in de vloeistof. Hierdoor is de frequentie van de toon lager.

Aan de andere kant heeft lucht ook een lagere dichtheid dan water.  $\rho$  zal dus ook lager worden. Echter: Water heeft een ongeveer 800 keer zo hoge dichtheid als lucht, terwijl lucht ongeveer 15.000 keer zo goed samendrukbaar is.

De breuk  $\frac{K}{\rho}$  wordt dus kleiner. Hierdoor is de geluidssnelheid lager als er luchtbelletjes in het water zitten.

### 3.4 Wat heeft dit te maken met gel?

In deze gel zitten waarschijnlijk ook luchtbelllen (of belllen van een ander licht gas) opgesloten. Maar vanwege de structuur van de gel die het water bij elkaar houdt, kunnen deze belllen niet ontsnappen, en is het effect dus permanent.

Hierom is dus de geluidssnelheid in gel zo veel lager en dat is de oorzaak ervan dat een geluid zo goed galmt in een pot met de goede soort gel.

Nu bekend was waardoor de galm in gel wordt veroorzaakt, werd geprobeerd om het effect te maximaliseren door zelf gel te maken en bestaande gel te testen, en door de ruimte die met gel gevuld gaat worden zo goed mogelijk aan de andere voorwaarden van een galm-effect te laten voldoen.

## Hoofdstuk 4

# De perfecte gel-galm

De volgende stap was nadenken over hoe het gel-galm-effect dat gebouwd zou worden er uit zou komen te zien. Door de tot nu toe verzamelde gegevens is een hoop bekend geworden over de invloeden van verschillende factoren op de galm. Nu moest gekozen worden met wat voor materialen de gel-galm precies gebouwd ging worden.

In dit hoofdstuk worden verschillende materialen, vormen en andere overwegingen langsgegaan en uitgelegd waarom gekozen is voor de specifieke onderdelen.

### 4.1 Gelkeuze

Gel is het medium waarmee de ruimte gevuld zal worden. Er bestaan oneindig veel variaties van hydrogelen, maar lang niet allen zijn ze geschikt. Om een zo sterk mogelijke galm te krijgen (zie Hoofdstuk 2) is een gel nodig die:

- Zo stevig mogelijk is.
- Zo elastisch mogelijk is.
- Minuscule luchtbelletjes moet bevatten om het Hot Chocolate effect te laten optreden.

De grootste vertraging van de geluidssnelheid vindt plaats als de gel voor ongeveer de helft uit lucht en de helft uit water bestaat <sup>1</sup>.

#### 4.1.1 Haargel

Bepaalde soorten haargel voldoen aan bovengenoemde voorwaarden. Er zijn twee producten verkrijgbaar in supermarkten en andere winkels in de omgeving van de auteur die galmen:

- Schwarzkopf Taft Ultra gel-Wax Structure 2
- Andreon gel Super Style Wax gel.

Van deze gelen is bekend dat ze werken. Een nadeel is alleen de prijs: voor deze gel betaalt men €2.50 voor 75 ml gel. Op het moment dat een ruimte zo groot als een schoenendoos met deze gel gevuld moet worden wordt dit al snel duur.

Daarom zijn ook de alternatieven Gelatine en Polyacrylzuur op bruikbaarheid onderzocht.

---

<sup>1</sup>Natuurlijk moeten zowel lucht als water in de praktijk net iets minder dan de helft zijn, aangezien er ook nog een paar procent ruimte nodig is voor de koolstofstructuur die voor de stevigheid in de gel zorgt.

### 4.1.2 Gelatine

Gelatine is een middel dat gemaakt wordt van dierenbotten, en gebruikt wordt in jam, pudding en andere gel-achtige producten zoals bijvoorbeeld ballistische gel.

Een belangrijke vraag die beantwoord moet worden is hoe ervoor gezorgd kan worden dat er lucht gevangen zit in deze gel. Een mogelijk idee is het gebruik van koolzuurhoudend water om de gelatine in op te lossen. Als de gel eenmaal stevig is geworden kan de koolstofdioxide niet meer ontsnappen en zitten er zo kleine belletjes gas in de gel gevangen.

Geprobeerd is om een kleine doos te vullen met gelatine en koolzuurhoudend mineraalwater om zo te testen of hier ook sprake kon zijn van een galm-effect. Echter, gelatine in de dosis waarin deze gebruikt wordt om jam mee te maken is niet sterk genoeg om een trillend materiaal te creëren (met, en zonder koolzuurbubbel). Ook in een tien keer zo hoge concentratie is de gelatine niet vast genoeg. Wat ook bleek is dat gelatine, tenzij vacuüm-verpakt, maar erg beperkt houdbaar is en begint te schimmelen. Hierom is gelatine dus niet geschikt voor het doel.

### 4.1.3 Polyacrylzuur

Polyacrylzuur is een synthetische koolstofverbinding. Polyacrylzuur is wit poeder dat veel water kan opnemen en dan een hydrogel vormt. Polyacrylzuur wordt onder andere gebruikt als verdikkingsmiddel in etenswaren, cosmetische middelen, in cement, als vlokmiddel bij waterzuiveringsinstallaties, in kinderluiers en als dispergeermiddel bij sommige pigmenten (Muenster and Rohmann, 1981).

Dit middel kan worden gebruikt om stevige gelen mee te maken. Helaas is het erg moeilijk om aan (kleine hoeveelheden van) dit middel te komen. Het is dan ook niet gelukt om dit middel te bemachtigen. Dit is iets wat in een vervolgonderzoek mogelijk getest kan worden.

Er is dus gekozen om gebruik te maken van de **Schwarzkopf Taft Ultra gel-Wax Structure 2**, omdat gelatine geen goed alternatief bleek en polyacrylzuur moeilijk te verkrijgen is. Hoe een potje van deze gel er uit ziet is te zien in figuur 12. Verdere specificaties en ingrediënten zijn te vinden in Bijlage I

## 4.2 Muur-materiaalkeuze

De muren, de vloer en het plafond van de gel-galm moeten zo veel mogelijk geluid weerkaatsen, om te zorgen dat het lang duurt voordat het geluid in de ruimte volledig is weggestorven.

In Bijlage III is een tabel overgenomen met geluidsabsorptie-coëfficiënten van verschillende potentieel geschikte muurmaterialen. Voor de gel-galm moet een materiaal dat zo veel mogelijk geluid reflecteert (dus een materiaal dat een zo laag mogelijke absorptiecoëfficiënt heeft) worden gekozen. Daarnaast



***Figuur 12:** De Schwarzkopf Taft Ultra Gel-Wax structure 2 die gebruikt is voor het project.*



is het ook een pré als het materiaal het gehele frequentiespectrum goed weerkaatst, en niet alleen maar geluidsgolven op of rond een bepaalde hoogte. Voor een zo natuurlijk mogelijke galm moet een materiaal gekozen worden dat een vergelijkbare frequentie-respons heeft als een bouw materiaal zoals steen of beton. In eerste instantie leek beton een onpraktische keuze (zwaar, moeilijk in vorm te gieten) maar na overleg met de begeleider is alsnog voor dit materiaal gekozen, omdat er een eenvoudige methode werd voorgesteld om het beton in de gewenste vorm te gieten.

Een andere mogelijkheid zou kunnen zijn om platen van roestvrij staal te gebruiken. De nadelen tegenover beton zijn echter:

- Een iets hogere absorptiecoëfficiënt dan beton
- Om een goede ruimte te maken zou waarschijnlijk lassen nodig zijn: Schroeven of spijkers kunnen bij frequent gebruik los gaan trillen waardoor het geheel gaat klapperen.

Nog een mogelijkheid is marmer. Marmer is nagenoeg net zo stevig als beton. Het is echter niet makkelijk om te bewerken zonder dure specialistische apparatuur. Ook is marmer duur en erg zwaar. Maar dit kan wel een interessante onderzoeksmogelijkheid zijn voor toekomstige experimenten.

In eerste instantie was er gekozen om beton te gebruiken. Echter bleek tijdens de constructie dat dit niet goed ging. Er is toen voor een eenvoudige oplossing met een rechthoekig koekblik van **metaal** gekozen. Zie voor verdere informatie Bijlage I.

### 4.3 Vorm van de ruimte

Ook de vorm van de ruimte is erg belangrijk. Dit niet belangrijk voor de nagalmtijd <sup>2</sup>, maar belangrijk voor de precieze klank van de galm: voor een goed klinkende galm moet de sterkte van de achtereenvolgende echo's gelijkmatig afnemen.

Om te onderzoeken welke ruimtevormen beter zouden zijn dan anderen is een simpel computerprogramma gebouwd dat een diversiteit aan verschillende tweedimensionale ruimtevormen uittest door hier deeltjes in te laten rondstuiteren. Een nadere toelichting op dit programma en een analyse van de elementen in verschillende ruimtevormen is te vinden in Bijlage IV. De simulator kan ook uitgeprobeerd worden op <http://www.wmmusic.nl/pws>.

Na de verschillende ruimtevormen te hebben vergeleken is er gekozen voor een simpele **langwerpige balk**, omdat onderzoek in het simulatieprogramma heeft getoond dat een rechthoekige ruimte een hele gelijkmatige afname van de echosterkte geeft. Daarnaast is deze ruimtevorm eenvoudig om te construeren. Ook bestaan er al veel elementen in de vorm van een balk.

Om een rechthoekige ruimte te gieten met beton, zijn twee houten wijnkistjes gebruikt als mal; een voor de doos en een voor het deksel. Om de uitsparing in het midden te maken is er in dit wijnkistje van tevoren een houten balk gelegd. Toen bleek dat het gebruik van beton toch te moeilijk was is een rechthoekig koekblik gebruikt als alternatief. In Bijlage I zijn nadere informatie, afbeeldingen en nauwkeurige afmetingen te vinden.

### 4.4 Microfoon & Speaker

Om geluid door de ruimte met gel te sturen zijn een speaker en een microfoon nodig. Er bestaan verschillende soorten speakers, en verschillende soorten microfoons met uiteenlopende eigenschappen en van zeer verschillende kwaliteit.

---

<sup>2</sup>Voor elke ruimte met een bepaalde inhoud (en dezelfde ratio's van muurmateriaal) kan de nagalmtijd benaderd worden met de formule van Sabine, zie II

#### 4.4.1 Dynamische Speaker

De *dynamische speaker* is het klassieke voorbeeld van een speaker. Dit apparaat wordt nog steeds volop in het merendeel van de speakers, surround-sound-systems en koptelefoons gebruikt. Een dynamische speaker bestaat uit een spoel met daarin een magneet. Aan de magneet zit een membraan vast. Als er een audiosignaal door de spoel heen gestuurd wordt, gaat de magneet trillen. Het membraan versterkt deze trilling en zorgt er voor dat de magneet in de spoel blijft.

Dynamische speakers klinken goed, zijn eenvoudig te maken en zijn relatief energie-zuinig. Helaas zijn ze niet geschikt voor de gel-galm: Als er gel tussen de spoel en de magneet komt zal deze niet goed meer trillen.

#### 4.4.2 Piezoelectronische Speaker/Microfoon

Een andere soort speaker is de *Piezoelektronische Speaker* (vaak afgekort als 'piezo'). Een piezo bestaat uit twee plaatjes metaal met daartussenin een speciaal keramisch materiaal. Het speciale aan dit materiaal is dat het een elektrische stroom creëert op het moment dat het materiaal vervormt wordt (vanwege druk of geluidsgolven). Hierdoor zijn piezo's geschikt om te gebruiken als microfoon.

Maar dit systeem werkt ook de andere kant op: Als er een geluidssignaal door het keramisch materiaal wordt gestuurd zal dit materiaal gaan trillen. Piezos kunnen dus ook gebruikt worden als speaker.

Een groot voordeel van een piezo is dat het zo klein en plat is: Hierom worden piezo's vaak gebruikt als speakers in mobiele telefoons en als 'alarmzoemer' in wekkers. Piezo's zijn ook erg goedkoop om te maken. Wel is de frequentie-respons van piezo's veel minder gelijkmatig dan die van dynamische speakers en zijn piezo's niet goed in het maken of opnemen van lage bastonen.

#### 4.4.3 Magnetosstrictie Speaker

Er is nog een effect dat gebruikt kan worden om trillingen mee te veroorzaken: *Magnetostrictie*. De frequentierespons van Magnetostrictie-speakers is vergelijkbaar met dynamische speakers (FeONIC, 2013), en dus significant beter dan die van piezo's. Helaas zijn deze speakers erg duur en zeldzaam en is het hierom niet mogelijk geweest om dit soort speaker te bemachtigen voor dit project.

Nadat geprobeerd is om een installatie te bouwen waarbij piezo-elementen werden gebruikt, zowel als speaker als als microfoon, bleek dat het erg moeilijk is om deze elementen te versterken om een sterk genoeg signaal te krijgen zonder de geluidskwaliteit significant te verslechteren. Deze optie was dus van de baan. Er is toen gekeken naar het toepassen van een dynamische microfoon en speaker, waarbij dezen beschermd worden door een omhulsel van siliconen.

De microfoon die gebouwd is is gemaakt naar het voorbeeld van de **Xth Sense Biophysical Sensor**, een open-source-hardware bouw pakket van een versterkte microfoon met een siliconenomhulsel, ontwikkeld door Donnarumma (2012).

### 4.5 Gel-galm vs. de rest

Een belangrijk aspect om mee te nemen tijdens het creëren van de gel-galm is: Hoe lijkt de gel-galm op de al bestaande galm-effecten, en waar verschilt de gel-galm in? In Figuur 13 worden de voor- en nadelen van de verschillende galm-effecten kort op een rijtje gezet.

De gel-galm is een kleine natuurlijk galmende ruimte op miniformaat. Hierdoor zou de galm in de gel-galm dus het meest moeten lijken op een natuurlijke galm. Als deze hypothese waar is, dan is de gel-galm een galmsysteem dat beter klinkt dan de spring, plate en algorithmic reverb en even goed als de convolution reverb. Anders dan de convolution reverb hoeft de computer alleen niet veel te rekenen om een galm te bepalen, omdat de gel-galm een analoog effect is.

Wat wel een nadeel zal blijven is dat ook de gel-galm, net als de convolution reverb nagenoeg niet te fine-tunen is.

## 4.6 Samenvatting

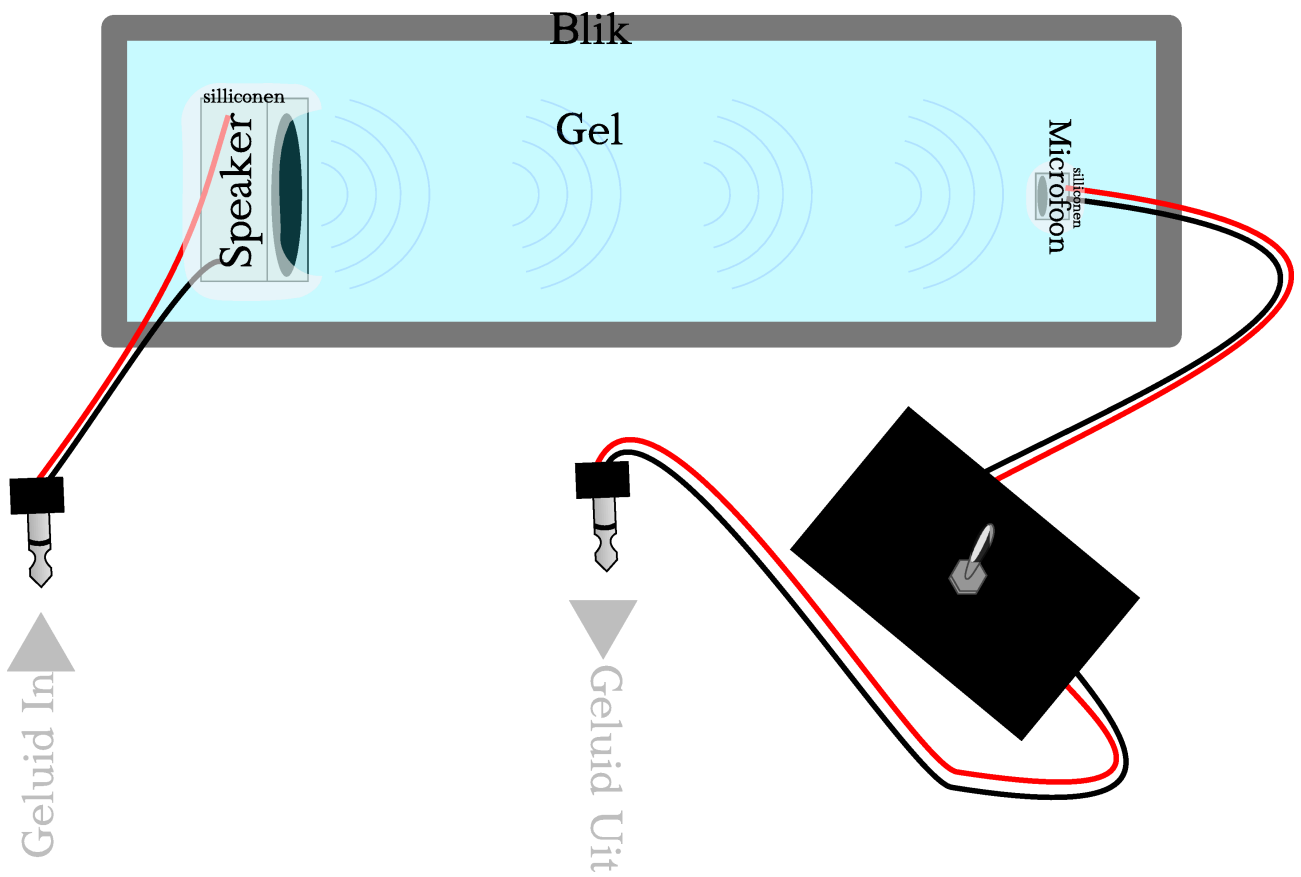
Door bovenstaande afwegingen te maken is nu een duidelijk beeld gevormd van hoe de gel-galm optimaal gebouwd kan worden:

- Scharzkopf Taft ultra Gel-wax Structure 2 wordt gebruikt als gel
- De muren van de ruimte bestaan uit een metalen koekblik.
- De geconstrueerde ruimte is balk-vormig.
- Een dynamische microfoon en een dynamische speaker worden gebruikt om geluid door de gel te sturen.

In Figuur 14 is een schematische tekening overgenomen die de verschillende onderdelen van het apparaat toont. In Figuur 15 is een foto te zien van het klaargebouwde apparaat.

	Realistische klank	Prijs	Vervoerbaarheid	Configureerbaar
Reverb Room	++	--	--	--
Spring Reverb	--	++	+	++
Plate Reverb	--	--	--	++
Algorithmic Reverb	-	++	++	++
Convolution Reverb	++	-	++	--
Gel Reverb	?	++	++	--

***Figuur 13:*** Vergelijking van de verschillende galm-effecten.



*Figuur 14: De gel-galm zoals deze geconstrueerd is, van boven af gezien. Een schematische weergave.*

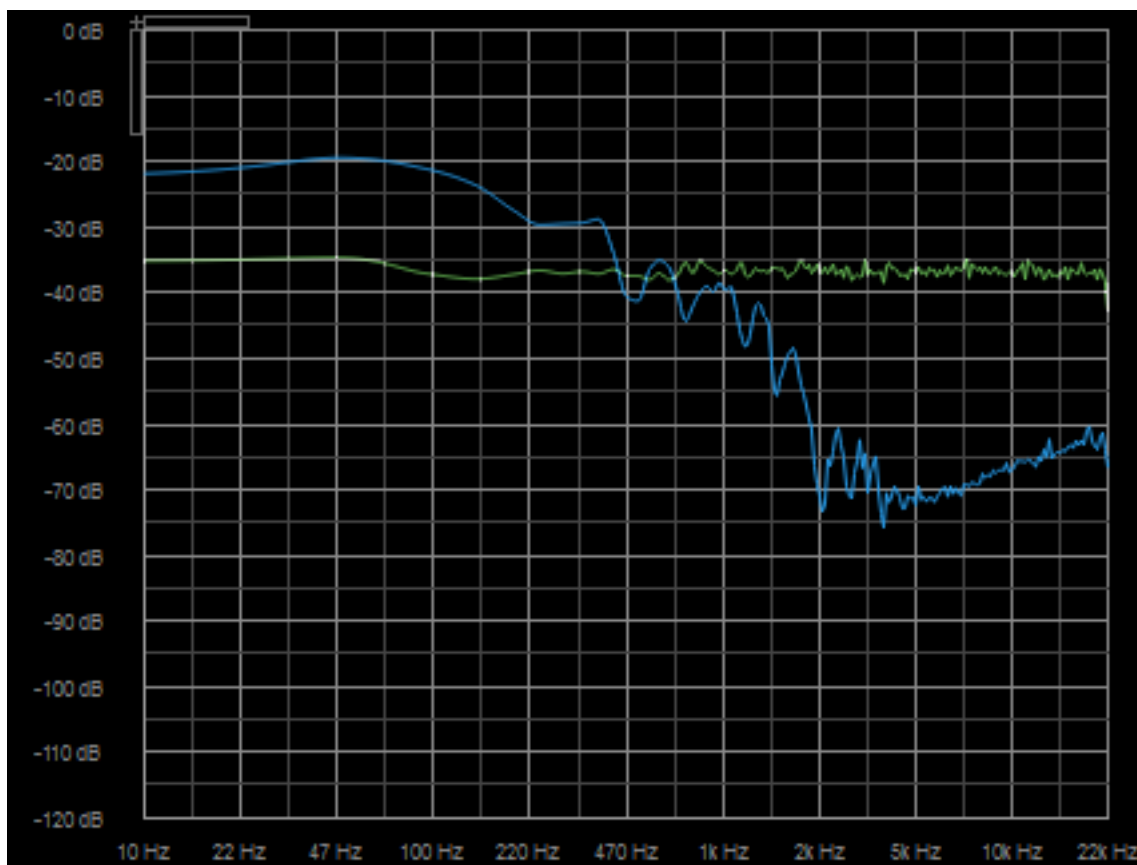


*Figuur 15: Het eindresultaat: De gel-galm.*

## Hoofdstuk 5

# Onderzoek

Om te onderzoeken of de gel-galm realistisch genoeg klinkt, zijn een aantal verschillende geluidsfragmenten gekozen. Met behulp van deze fragmenten wordt de frequentie-respons van de galm vastgelegd. Ook wordt een kwalitatief onderzoek uitgevoerd naar de klank van de gel-galm. Al deze geluidsfragmenten zijn te downloaden in zowel hun oorspronkelijke versie, een versie die door de gel-galm heen is gehaald en een versie waar deze twee signalen door elkaar zijn gemixt.



*Figuur 16:* Frequentie-respons van witte ruis. In **groen** is het droge signaal weergegeven, in **blauw** het signaal dat door de gel-galm is gehaald.

## 5.1 Kwantitatief onderzoek

De volgende twee geluidsfragmenten worden gebruikt om de frequentie-respons en de nagalmtijd van de gel-galm te bepalen.

### 5.1.1 Witte Ruis

Witte Ruis is een audiosignaal dat even sterk is op alle frequenties in het frequentiespectrum. De frequentierespons van perfecte witte ruis is linear en horizontaal. In Figuur 16 is de frequentierespons van zowel het oorspronkelijke als het door de gel-galm gehaalde fragment te zien. Opvallend is dat blijkt dat de gel-galm de lage frequenties erg blijkt te versterken, terwijl de hoge frequenties helemaal wegvallen. De piek die in het natte signaal van 5khz to 22khz loopt is waarschijnlijk veroorzaakt door de statische ruis die altijd in de microfoon aanwezig is.

De frequentie-respons van de gel-galm is dus helaas niet zo linear als gehoopt. Dit kan veroorzaakt zijn door de precieze gel-samenstelling die onbekend is, de kleine dikte van de blikken wanden van de gel-galm, of mogelijk door iets anders.

### 5.1.2 Metronoom

Als men het droge en het natte signaal van het metronoomfragment tegelijk afspeelt, hoort men dat er een kleine vertraging is. Deze vertraging is echter te weinig om er voor te zorgen dat deze goed zichtbaar gemaakt kan worden met een spectrumanalyseprogramma, wat betekent dat een nauwkeurige meting onmogelijk is. Maar de vertraging is wel duidelijk te horen. Dit bewijst dat het geluid er wel degelijk iets langer over doet om door de ruimte met gel heen te gaan dan wanneer deze leeg zou zijn, al is het effect niet zo sterk als gehoopt.

## 5.2 Kwalitatief onderzoek

Voor het kwalitatieve gedeelte van het onderzoek zijn er drie verschillende muziekfragmenten gekozen met zo uiteenlopende kwaliteiten.

### 5.2.1 Amen Break

De Amen Break is een drumfragment uit een lied genaamd 'Amen, Brothers', geschreven door een band genaamd The Winstons en sindsdien gebruikt in talloze liederen, muziekstukken en remixes. Het is een van de meest herkenbare drum-loops die er bestaat. Hierom is de Amen Break een goed fragment om mee te onderzoeken of het geluid van drums verbeterd wordt door de gel-galm.

### 5.2.2 The Entertainer

The Entertainer, geschreven door Scott Joplin is een van de meest bekende pianomuziekstukken die er bestaan. Daarnaast is The Entertainer een muziekstuk wat normaal in een galm-loze ruimte gespeeld wordt. Dit opent de mogelijkheid om galm toe te voegen en het panel te laten bepalen welk fragment beter is.

### 5.2.3 Take Five

Take Five, geschreven door Paul Desmond en jarenlang uitgevoerd door het Dave Brubeck Quartet, is een jazz-achtig muziekstuk waarin de Saxofoon een prominente rol speelt. Omdat saxofoon en piano qua klank zeer van elkaar verschillen, de klank van een saxofoon meer door de hoge kant van de frequenties bepaald wordt en omdat er een hele band speelt, is dit de laatste test om de gel-galm te laten ondergaan.

Proefpersonen kregen een koptelefoon op en moesten voor elk van de drie fragmenten aangeven welke versie ze beter vonden. De antwoorden konden worden aangegeven volgens een Likertschaal. De test is blind gemaakt: De proefpersonen wisten niet welke van de twee aangegeven fragmenten het droge en welke het natte fragment waren<sup>1</sup>. Zie Figuur 17 voor de resultaten. De precieze vraag die de panelleden kregen was:

**Welk van de volgende twee fragmenten vind je mooier klinken?**

Alhoewel het panel wegens tijdgebrek niet erg groot was, zijn er toch een paar opmerkelijke resultaten:

- Over het algemeen vond men de natte versies van het geluid beter klinken dan de droge versies. De gel-galm schijnt dus een effect te hebben.
- De Entertainer was blijkbaar het minst geschikt voor het toevoegen van galm.
- Men was het er over eens dat Take Five beter werd van de Gel-galm.

## 5.3 Samenvatting

De gel-galm heeft dus een positief effect op hoe de muziek klinkt. Uit de test met de witte ruis blijkt dat de gel-reverb het vooral goed doet bij lage frequenties, en erg slecht bij hoge frequenties. Bastonen worden dus extra versterkt. De hoeveelheid galm die de gel-galm toevoegde aan de muziek was echter miniem; het effect was zo klein dat dit niet nauwkeurig gemeten kon worden. Wel was het panel van proefpersonen het er over eens dat de gel-galm de kwaliteit van de muziek verbeterde.

<i>(3) proefpersonen</i>	Droog > > Nat	Droog > Nat	Droog = Nat	Droog < Nat	Droog < < Nat
<b>Amen Break</b>			1	2	
<b>The Entertainer</b>	1	1		1	
<b>Take Five</b>				3	

*Figuur 17: Resultaten van het panel.*

<sup>1</sup>Ter herinnering: Een droog signaal is het oorspronkelijke signaal, een nat signaal is het bewerkte signaal dat door de gel-galm heen is gestuurd

# Hoofdstuk 6

## Conclusies

De hoofdvraag die in dit werkstuk werd onderzocht was:

**Is het mogelijk om een realistisch klinkend galm-effect te realiseren met behulp van eenvoudig te verkrijgen hydrogelen?**

Volgens de resultaten die zijn verzameld, is het antwoord: **Misschien**. De gel-galm werkt, in ieder geval in theorie. Het proces om een sterke, langdurig klinkende galm te krijgen is echter moeilijker dan verwacht en vereist mogelijk speciale gelen en/of andere hulpmiddelen die niet aan de voorwaarde ‘eenvoudig te verkrijgen’ voldoen.

Wel is aangetoond, door een panel van proefpersonen een kleine vragenlijst te laten invullen, dat de gel-galm een positief effect heeft op de muziek waar het bij gebruikt wordt, al is uit kwantitatief onderzoek gebleken dat bij de huidige versie van het apparaat de toegevoegde galm miniem is.

Ook schijnt de gel-galm het bij lage frequenties beter te doen dan bij hoge, een resultaat dat niet was verwacht.

In de voorbereiding en de zoektocht naar een goede ruimtevorm met behulp van een computersimulatie is gebleken dat een gel-galm in theorie mogelijk is, maar of een gel-galm in de praktijk echter ook functioneel zal kunnen zijn, kan alleen blijken door verder onderzoek.

### 6.1 Discussie & aanbeveling voor vervolgonderzoek

In dit onderzoek zijn een aantal aspecten naar voren gekomen die in vervolgonderzoek verbeterd of opgenomen kunnen worden, en die mogelijk de matige metingen van dit onderzoek kunnen verklaren:

- Er zou gekeken kunnen worden naar andere muurmaterialen, **beton** zou bijvoorbeeld kunnen worden heroverwogen. Ook **marmor** is een mogelijkheid om onderzocht te worden.
- Een **andere gel** waarvan de precieze samenstelling bekend is bij de onderzoekers, omdat dit resultaten zal leveren die beter verklaard kunnen worden. **Polyacrylzuur** is hier mogelijk een goede kandidaat voor.
- De invloed van het **vergroten/verkleinen** van de ruimte op de sterkte van de galm.
- Onderzoeken waarom de gel-galm bij lage frequenties beter werkt dan bij hoge.



# Hoofdstuk 7

## Nawoord

Ik heb ontzettend veel geleerd tijdens het maken van dit profielwerkstuk. Over het precieze verloop van het construeren van de gel-galm gaat Bijlage I. Al met al was het een fantastische belevenis. Ik heb erg veel geleerd over hoe geluid nu eigenlijk werkt, wat het concept ‘galm’ inhoudt en hoe dat gebruikt is en in de toekomst misschien gebruikt kan worden.

Ook heb ik geleerd om het typesettingprogramma L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X te gebruiken, waarmee dit document in elkaar is gezet. Ook ben ik een stuk beter geworden in het maken van vector-figuren.

Iets anders dat ik van dit profielwerkstuk heb opgestoken is het solderen van elektronica. Dit was iets dat ik tot nu toe niet eerder gedaan had. Ik ben erg tevreden over het resultaat.

En het laatste, meest belangrijke is dat ik geleerd heb om mijn neus uit te steken, mijn ogen open te houden en niet bang te zijn om op onderzoek uit te gaan naar dingen waar nog nooit iemand anders zich mee bezig heeft gehouden.

# Bijlage I

## Bouwspecificaties

In deze bijlage zijn foto's en specifieke details van het bouwproces opgenomen.

### I.1 Ruimte

In eerste instantie werd nagedacht over de mogelijkheid om de doos van de gel-galm van dikke platen roestvrij staal te maken. Maar daar hiervoor het nodig zou zijn om te lassen, viel deze optie af. Bart Toonen kwam met het idee om het geheel van beton te maken. Dit is vervolgens geprobeerd. In onderstaande figuren (18, 19, 20 en 21 is het gietproces van het betonnen omhulsel te zien. Er werd gekozen om het beton in wijnkistjes te gieten, daar deze ongeveer de goede afmetingen hadden en geen extra werk vereisten om te maken. Het formaat van de wijnkistjes is 36x10x10cm groot. De holte aan de binnenkant is 22x6,5x6,5cm groot. Omdat er te weinig betonmix voorhanden was, en het spul heel snel hard werd, was het nodig om extra stukken hout aan de zijanten in de wijnkistjes te stoppen, om zo beton te besparen (Figuur 19). Dit kwam de algemene stevigheid van de constructie natuurlijk niet ten goede.

Het beton dat gebruikt is heet **Beamix Snelbeton**. Dit spul bleek alleen niet stevig genoeg: Toen geprobeerd is om de ruimte en het deksel uit de wijnkistjes te halen, brokkelde het geheel uit elkaar (Figuur 21). Het materiaal bleek erg bros te zijn. Er werd toen, voornamelijk vanwege tijdgebrek, besloten om te kiezen voor de simpelste alternatieve oplossing: Een rechthoekig koekblik.

Het gebruikte koekblik is 18 x 7.5 x 5cm groot. Er paste in totaal net iets minder dan 8 doosjes gel in. In de figuren 22, 23, 24 en 25 kan het bouwproces van dit tweede model worden gezien.

Het eindresultaat is te bewonderen in Figuur 15.

### I.2 Gel

De gel gebruikt voor dit experiment is **Schwarzkopf Taft Ultra gel-Wax Structure 2**. In elk gelpotje zit 75 ml gel netto. In totaal waren net iets minder dan 8 potjes gel nodig om het koekblik te vullen. De precieze ingrediënten die op het gelpotje vermeld staan zijn:

- Aqua
- Paraffinum Liquidum
- Ceteth-20
- Oleth-5
- Sorbitol
- Butylene Glycol
- Glycerin
- Parfum

- Arginine
- Phenoxyethanol
- DMDM Hydantoin
- Panthenol
- PEG-14 Dimethicone
- Styrene/VP Copolymer
- Linalool
- Hexyl Cinnamal
- Benzyl
- Alcohol
- Alpha-Isomethyl Ionone
- Geraniol
- Citronellol



**Figuur 18:** Dit is de mal waar het beton in werd gegoten.



**Figuur 19:** Beton in de mal gedaan. Aan beide uiteinden is een extra stuk hout toegevoegd om beton te besparen.



**Figuur 20:** De doos en het deksel, nadat ze gedroogd hadden. Een grote scheur in het deksel is te zien.



**Figuur 21:** Het beton heeft de mal niet overal goed gevuld waardoor zwakke plekken en scheuren zijn ontstaan. Daardoor is het beton niet goed te gebruiken

## I.3 Elektronica

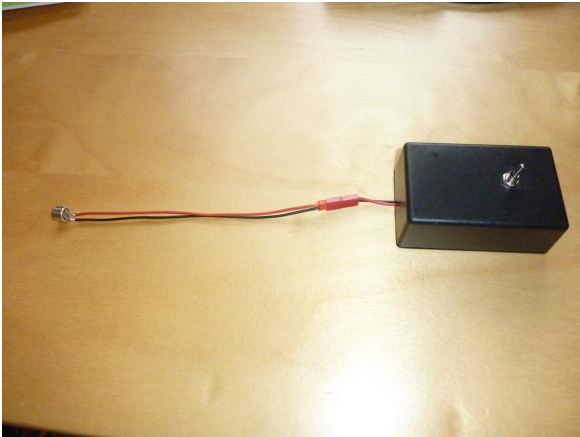
De dynamische speaker die gebruikt is komt van een oude goedkope reisluidspreker. Er zat geen kast meer om de speaker heen.

De microfoon is een goedkope electret condenser microfoon. Om het signaal van de microfoon te versterken is de Xth Sense als voorbeeld gebruikt (Donnarumma, 2012). Het enige dat aan deze schakeling is toegevoegd is een extra schakelaar tussen de batterij en de audio jack, zodat de batterij niet leeg gaat als microfoon 'uit' staat.

De speaker en de microfoon zijn beiden gedeeltelijk omhuld met siliconen (Figuur 23). Dit zorgt ervoor dat er geen kortsluiting kan ontstaan door contact met de hydrogel. Om op deze manier een siliconenomhulsel te maken, is er gebruik gemaakt van de handleiding, geschreven door Obscura (2012).

Om de microfoon en speaker makkelijk te kunnen verwisselen in de toekomst, zijn ze vastgesoldeerd aan een rood-zwart kabeltje dat uitgewisseld kan worden. Aan de andere kant zitten de speaker en de microfoon vast aan twee 3,5 mm audiokabels. De signalen die er door gaan zijn mono-signalen. De kabels zijn echter stereo, omdat monokabels jammer genoeg bijna niet te krijgen zijn.

Deze twee audiokabels worden voor het doen van de tests verbonden met de computer.



*Figuur 22: De microfoon met de versterker die voor dit experiment gebouwd is.*



*Figuur 23: Microfoon en speaker hebben een siliconenomhulsel gekregen.*



*Figuur 24: Microfoon en speaker in het koekblik dat als ruimte zal dienen.*



*Figuur 25: De ruimte is volledig gevuld met gel.*

## Bijlage II

### Formule van Sabine

$$RT_{60} = 1.61 * \left( \frac{V}{S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n} \right)$$

De *formule van Sabine* (Sabine, 1993), is een benadering van de galmtijd( $RT_{60}$ ) in een ruimte.  $V$  is het volume van de ruimte in  $m^3$ .  $a$  is de absorptiecoëfficiënt van een bepaald materiaal dat voor een muur(of vloer, of plafond) van de ruimte is gebruikt.  $S$  is het oppervlak (in  $m^2$ ) van het gebied waar dit materiaal op de muur zit.

Deze formule is nuttig in een verscheidenheid van omstandigheden, maar werkt alleen mits de ruimte gevuld is met lucht. Om de  $RT_{60}$  in ruimtes gevuld met andere stoffen te kunnen bepalen kan de formule worden herschreven als:

$$RT_{60} = 1.61 * \frac{343}{C_{medium}} * \left( \frac{V}{S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n} \right)$$

In deze formule is 343 is de geluidssnelheid in lucht en  $C_{medium}$  de geluidssnelheid in de stof waarnaar gekeken wordt. Deze formule kan dus alleen gebruikt worden als men de exacte geluidssnelheid weet van de stof waarin het geluid weerkaatst. Het uitrekenen van de geluidssnelheid als men alle andere waardes weet in te vullen zou ook mogelijk moeten zijn.

## Bijlage III

# Absorptiecoëfficiënten van Muurmateriaal

Deze tabel is overgenomen van Sengpiel (2013).

Door de waarden in deze tabel te vergelijken is in eerste instantie besloten om de ruimte van **beton** te maken, omdat dit een van de materialen is met een hele lage absorptiefrequentie waar makkelijk aan is te komen en het niet duur is.

De absorptiefrequenties van de verschillende stoffen kunnen worden ingevuld in de formule van Sabine (zie bijlage II) om te bepalen hoe lang de nagalmtijd zal zijn als de muren van dit materiaal zijn gemaakt. In werkelijkheid is de absorptiecoëfficiënt echter niet precies hetzelfde bij elke frequentie.

**Metaal** en **marmer** zijn andere materialen die opvallen vanwege hun lage absorptiecoëfficiënten. Hierom is, toen beton niet meer haalbaar bleek wegens tijdgebrek, gekozen om metaal te gebruiken als alternatief materiaal.

Ceiling Materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Acoustic Tiles	0.05	0.22	0.52	0.56	0.45	0.32
Acoustic Ceiling Tiles	0.70	0.66	0.72	0.92	0.88	0.75
Fiberglass: 2" 703 no airspace	0.22	0.82	0.99	0.99	0.99	0.99
Fiberglass: spray 5"	0.05	0.15	0.45	0.70	0.80	0.80
Fiberglass: spray 1";	0.16	0.45	0.70	0.90	0.90	0.85
Fiberglass: 2" rolls	0.17	0.55	0.80	0.90	0.85	0.80
wood	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Foam: Sonex 2"	0.06	0.25	0.56	0.81	0.90	0.91
Foam: SDG 3"	0.24	0.58	0.67	0.91	0.96	0.99
Foam: SDG 4"	0.33	0.90	0.84	0.99	0.98	0.99
Foam: polyur. 1"	0.13	0.22	0.68	1.00	0.92	0.97
Foam: polyur. 1/2"	0.09	0.11	0.22	0.60	0.88	0.94
Plaster: smooth on tile/brick	0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
Plaster: rough on lath	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
Sheetrock 1/2" 16"; on center	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Wood: 3/8"; plywood panel	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Miscellaneous Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Water or ice surface	0.008	0.008	0.013	0.015	0.020	0.025
People (adults)	0.25	0.35	0.42	0.46	0.5	0.5

Floor Materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
concrete or tile	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
linoleum/vinyl tile on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
wood on joists	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
parquet on concrete	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
carpet on concrete	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
carpet on foam	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73
Seating Materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
fully occupied - fabric upholstered	0.60	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
occupied wooden pews	0.57	0.61	0.75	0.86	0.91	0.86
empty - fabric upholstered	0.49	0.66	0.80	0.88	0.82	0.70
empty metal/wood seats	0.15	0.19	0.22	0.39	0.38	0.30
Wall Materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Brick: unglazed	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Brick: unglazed & painted	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Concrete block - coarse	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Concrete block - painted	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Curtain: 10 oz/sq yd fabric molleton	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
Curtain: 14 oz/sq yd fabric molleton	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Curtain: 18 oz/sq yd fabric molleton	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65
Fiberglass: 2" 703 no airspace	0.22	0.82	0.99	0.99	0.99	0.99
Fiberglass: spray 5"	0.05	0.15	0.45	0.70	0.80	0.80
Fiberglass: spray 1"	0.16	0.45	0.70	0.90	0.90	0.85
Fiberglass: 2" rolls	0.17	0.55	0.80	0.90	0.85	0.80
Foam: Sonex 2"	0.06	0.25	0.56	0.81	0.90	0.91
Foam: SDG 3"	0.24	0.58	0.67	0.91	0.96	0.99
Foam: SDG 4"	0.33	0.90	0.84	0.99	0.98	0.99
Foam: polyur. 1"	0.13	0.22	0.68	1.00	0.92	0.97
Foam: polyur. 1/2"	0.09	0.11	0.22	0.60	0.88	0.94
Glass: 1/4" plate large	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Glass: window	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Plaster: smooth on tile/brick	0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
Plaster: rough on lath	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
Marble/Tile	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Sheetrock 1/2"; 16"; on center	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Wood: 3/8" plywood panel	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11



## Bijlage IV

# 2D Sound Room Simulator

Om er preciezer achter te komen wat voor soort ruimtevormen geschikt zouden zijn voor de gel-galm, is door de auteur een simpel computerprogramma ontwikkeld dat een visuele simulatie laat zien van geluidsgolven die door een verscheidenheid van tweedimensionele ruimtes stuiteren. In Figuur 26 is dit programma in actie te zien. Het programma kan door iedereen uitgetoond worden op de website: <http://www.wmmusic.nl/pws>

### IV.1 Concept

De Sound Room Simulator bestaat uit een tweedimensionaal vlak waarin een of meer lijnen, rechte hoeken en cirkels kunnen worden getekend die als muren fungeren. Vervolgens kan de positie van de geluidsbron worden bepaald.

Als men op ‘play’ drukt zullen er deeltjes van de geluidsbron in alle richtingen wegschieten in een enkele korte puls. Dit is een benadering van hoe geluid werkt; er worden namelijk geen drukverschillen gesimuleerd, alleen maar stuiterende deeltjes. Deze deeltjes kaatsen op dezelfde manier als geluidsgolven dat zouden doen tegen de muren.

Door te kijken hoe de deeltjes terugkaatsen (of de geluidsdeeltjes zich verspreiden door de ruimte of in unison heen en weer kaatsen), kan kwalitatief worden bepaald wat voor soort ruimte een betere galm zal veroorzaken. Er is nog een ander hulpmiddel dat hierbij helpt: Elke keer dat een deeltje tegen een muur stuitert zal deze iets verkleuren. Deze verkleuring kan gebruikt worden om te bepalen of het deeltje een directe of een indirecte weg heeft afgelegd naar zijn huidige positie.

### IV.2 Opties

Om de simulatie optimaal te laten verlopen, zijn er een aantal opties in te stellen aan de rechterkant:

- Laad & Reset-knop: Hiermee wordt de huidige preset geladen, en de simulatie gereset.
- play/pause: Hiermee wordt de simulatie stilgezet en weer voortgezet, om te kijken wat er op een bepaald tijdstip precies gebeurt.
- Presets: Er zijn 14 verschillende ruimtevormen die te selecteren zijn voor de simulatie.
- # Particles: In de stellen hoeveel deeltjes er aanwezig zijn in de simulatie. Meer deeltjes zorgen voor een realistischere simulatie, maar dit is zwaarder voor de computer en kan mogelijk niet meer op volle snelheid getoond worden.

- Travel Speed: Snelheid in pixels van de deeltjes. Dit kan aangepast worden om de simulatie langzamer of sneller te zien verlopen.
- Speaker X, Y: De positie van de geluidsbron waar de deeltjes in het begin vandaan komen.
- Microphone X, Y: De positie van de microfoon die de geluidsdeeltjes oppikt, als hij aan staat.
- Microphone Enabled? Optie om de microfoon aan of uit te schakelen.
- Microphone Absorbs Particles? Als dit aan staat zullen deeltjes verdwijnen als ze de microfoon raken. Dit is gewenst in sommige simulatiesituaties.
- Bounding Box Enabled? Als dit aan staat zullen de deeltjes als ze tegen de rand van het simulatievenster komen, terugstuiteren.
- Trail Fade Speed: Een getal tussen 0 en 1 dat aangeeft hoe snel de paden die de deeltjes hebben afgelegd zullen wegfaden. Afhankelijk van de simulatiesnelheid kan het handig zijn deze juist omhoog of omlaag te zetten.
- Absorptioncoefficient: De absorptiecoëfficiënt van de muren waar de deeltjes tegenaan stuiteren. Deeltjes zullen steeds doorzichtiger worden naarmate ze stuiteren, totdat ze volledig verdwenen zijn. Dit kan gebruikt worden om verschillende ruimtematerialen te simuleren.

Onder de opties is een staafdiagram te zien. Deze geeft aan hoeveel deeltjes er tegen de microfoon zijn gekomen, ten opzichte van de tijd. Er zijn geen waarden langs de assen aangegeven omdat ook dit een kwalitatieve meting is die sterk kan veranderen afhankelijk van de precieze parameters van de simulatie. De meest vloeiende diagrammen worden verkregen als men een travel speed van 1 px gebruikt. Alhoewel dit ook een kwalitatieve meting is, kunnen de resultaten van de diagrammen van verschillende ruimtes met elkaar worden vergeleken om te laten zien welke ruimte de meest gelijkmatige afname aan echos heeft.

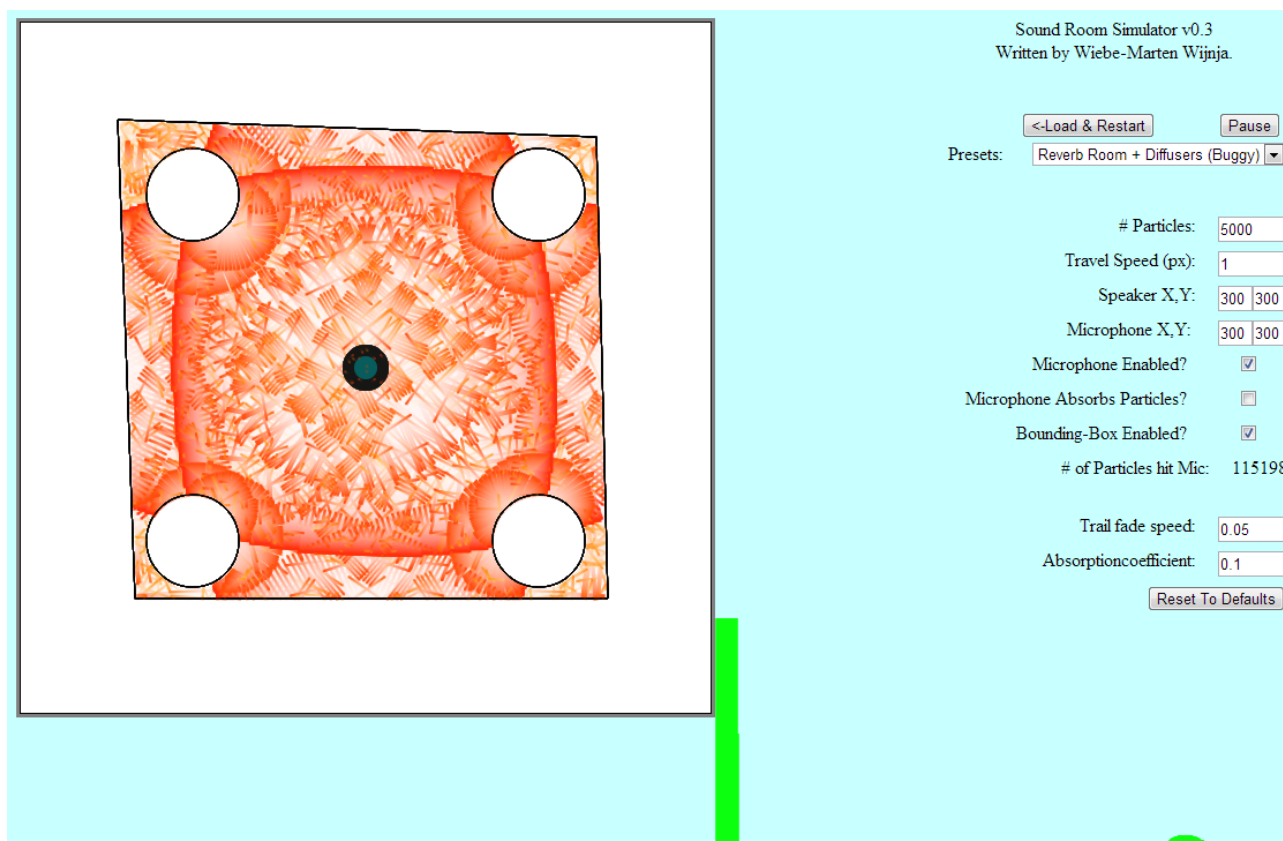
### IV.3 Vergelijking van ruimtevormen

Om te onderzoeken wat voor ruimtevorm het beste zou werken, zijn 14 verschillende vormen geconstrueerd. Deze vormen kunnen geselecteerd worden in de dropdown rechtsbovenaan de simulatie. Hier worden de verschillende vormen kwalitatief vergeleken. Er wordt vooral gekeken of de echo's gelijkmatig afzwakken of niet in een bepaalde ruimte. In plaats van elke ruimte afzonderlijk te bespreken, worden de algemene opvallende resultaten, verschillen en overeenkomsten tussen ruimtes hier benoemd:

- In de vierkante, driehoekige en ronde ruimtes is duidelijk te zien dat er heel gelijkmatige patronen ontstaan. Er is hier dus sprake van staande golven. Die willen we proberen te vermijden, dus deze ruimtevormen zijn niet erg goed geschikt als galm-ruimte.
- Het is mogelijk om de echo in een put te simuleren door de microfoon en de speaker bij de put-opening neer te zetten (positie 300, 550).
- De tussenschoten geplaatst in een aantal ruimtes lijken er goed voor te zorgen dat de echo's zich gelijkmatiger verdelen. Het blijkt wel dat de rechte tussenschoten weer zorgen voor staande golven, en ronde tussenschoten dit voorkomen.
- In de ruimtes waar diffusors geplaatst zijn is te merken dat het geluid zich veel gelijkmatiger verdeelt. Hierbij doet de **Gang met Diffusors** het duidelijk beter dan de **Ruimte met Diffusors** en de **Reverb Room met Diffusors**
- De ruimtes waarbij de muren niet parallel lopen hebben minder last van staande golven, al is uit de simulatie niet heel duidelijk te zien hoeveel dit zal schelen in de praktijk.

- Een smalle lange gang schijnt een grotere galmverspreiding te hebben dan een vierkante ruimte met dezelfde inhoud.

Om het galm-effect te maximaliseren is er, vanwege bovenstaande redenen gekozen om een langwerpige, balk-vormige ruimte te creëren. Het was vanwege tijdgebrek helaas niet mogelijk om een meer ingewikkelde ruimtevorm te kiezen. Er kan voor toekomstig onderzoek geëxperimenteerd worden met het plaatsen van cilindervormige diffusors in deze ruimte, deze zouden de galmkwaliteit nog meer moeten verbeteren.



**Figuur 26:** Een simulatie van een Reverb Room met Diffusors. Aan de linkerkant is de simulatie te zien, aan de rechterkant het instellingenmenu. <http://www.wmmusic.nl/pws>

# Bronvermelding

- Fons Adriaensen. Acoustical impulse response measurement with ALIKI. 2006. URL [http://lac.zkm.de/2006/papers/lac2006\\_fons\\_adriaensen\\_01.pdf](http://lac.zkm.de/2006/papers/lac2006_fons_adriaensen_01.pdf).
- Andreas Bick. Foto reverb room, 2008. URL <https://silentlistening.wordpress.com/2008/07/03/small-room-big-reverb-big-room-no-reverb/>.
- Marco Donnarumma. *DIY Xth Sense biophysical sensor microphone*, 2012. URL <http://res.marcodonnarumma.com/projects/xth-sense/#DIY>.
- drinkpoison. Foto hot chocolate, 2008. URL <http://drinkpoison.deviantart.com/art/Hot-chocolate-76998208>.
- Ecophon Saint-Gobain. *Laat je zintuigen je niet beperken: Geluid in de leeromgeving*. Ljunbergs Tryckeri, 2002.
- FeONIC. Feonic whispering window technical specification. Technical report, feONIC, 2013. URL <http://media.feonic.com/downloads/specs/FeonicWhisperingWindowSpecJan2013.pdf>.
- K. Kabiri, H. Omidian, S.A. Hashemi, and M.J. Zohuriaan-Mehr. Synthesis of fast-swelling superabsorbent hydrogels: effect of crosslinker type and concentration on porosity and absorption rate. *European Polymer Journal*, 39(7):1341–1348, Jul 2003. doi: 10.1016/S0014-3057(02)00391-9. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0014-3057\(02\)00391-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00391-9).
- Michael Leuty. Foto laon kathedraal, 2010. URL <http://www.flickr.com/photos/gmleuty/>.
- A. Muenster and M. Rohmann. Manufacture of polymers of acrylic acid or methacrylic acid, November 17 1981. URL <http://www.google.com/patents/US4301266>. US Patent 4,301,266.
- NVON Commissie. *BINAS*. Noordhoff Uitgevers, 2008.
- Audrey Obscura. Instructable - worlds easiest silicone mold, 2012. URL <http://www.instructables.com/id/Worlds-easiest-silicone-mold/>.
- Wallace C. Sabine. *Collected Papers on Acoustics*. Peninsula Pub, 1993. ISBN 0932146600. URL <http://www.amazon.com/Collected-Papers-Acoustics-Wallace-Sabine/dp/0932146600%3FSubscriptionId%3D0JYN1NVW651KCA56C102%26tag%3Dtechkie-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3D0932146600>.
- Eberhard Sengpiel. Absorption coefficients of building materials and finishes, 2013. URL <http://www.sengpielaudio.com/calculator-RT60Coeff.htm>.
- G. G. Stokes. *On the Theories of the Internal friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids*, volume vol.8. Transaction of the Cambridge Philosophical Society, 1849.
- University of Salford Manchester. Reverberation chambers. 2010. URL <http://www.acoustics.salford.ac.uk/facilities/index.php?content=reverb>.
- Alle figuren waar geen expliciete bron bij vermeld staat zijn door de auteur zelf gemaakt.*