

ABSORPTIE VAN PERSONEN BINNEN HORECA

SIGNIFICANTIE VAN HET EFFECT VAN DE AANWEZIGHEID VAN
PERSONEN OP HET TOELAATBARE GELUIDNIVEAU BINNEN
HORECAGELEGENHEDEN



Stephan den Ridder
11056347

De Haagse Hogeschool
Technische natuurkunde

17 december 2015

ABSORPTIE VAN PERSONEN BINNEN HORECA

SIGNIFICANTIE VAN HET EFFECT VAN DE AANWEZIGHEID VAN
PERSONEN OP HET TOELAATBARE GELUIDNIVEAU BINNEN
HORECAGELEGENHEDEN

Stephan den Ridder
(11056347)
Technische Natuurkunde
17 december 2015



Eerste coach
Dhr. D.D. Land

Tweede coach
Dhr. C.A. Swarts



Bedrijfsbegeleider
Dhr. L. Duijvestijn

Voorwoord

De afgelopen 19 weken heb ik met veel plezier gewerkt aan mijn afstudeeronderzoek. Het resultaat van dit onderzoek ligt hier: ‘Het effect van aanwezige personen op het toelaatbare geluidniveau binnen horecabedrijven’. Gedurende de stageperiode heb ik veel geleerd over het meten van akoestiek en het bepalen van geluidniveaus. Ik ben dan ook blij dat mijn collega’s de tijd en moeite hebben genomen om mij mee te nemen tijdens metingen, uit te leggen wat en waarom ze de akoestische vraagstukken op de door hen gebruikte manier benaderden.

Het land Akoestiek is een belangrijk deel van de wereld van de natuurkunde. Er valt altijd nog meer te ontdekken en te verbeteren, zo ook bij dit onderzoek. Er is helaas nog geen algemene correctiefactor bepaald om de fout te corrigeren die ontstaat wanneer er in een horecaruimte het maximaal toegestane geluidniveau bepaald wordt zonder dat er personen in de ruimte aanwezig zijn. Hiervoor zal er nog veel meer onderzoek gedaan moeten worden naar bijvoorbeeld de gemiddelde inrichting van horecagelegenheden. Akoestiek in een ruimte hangt van veel parameters af, en zo ook de nagalmtijd.

Graag wil ik een aantal mensen bedanken, mede dankzij hen zijn dit onderzoek en dit verslag tot stand gekomen: al mijn collega’s van Het GeluidBuro vanwege hun geduld en de moeite die zij allen hebben genomen om mij zo veel mogelijk te laten zien en leren, met in het bijzonder de heer Lennard Duijvestijn die mij de mogelijkheid gaf om hier mijn afstudeerstage te doen en voor de goede zorg binnen het bedrijf. Ook wil ik de heer Fred van Dishoeck van de Hogeschool Windesheim te Zwolle bedanken voor het openstellen van de galmkamer en het helpen bij het doen van de metingen. Daarnaast wil ik mijn begeleider de heer Derek Land bedanken voor de begeleiding tijdens de stage en het geven van feedback op het conceptverslag.

Verder wil ik iedereen bedanken die hierboven niet genoemd is, maar er wel voor heeft gezorgd dat ik het naar me zin heb gehad en dat ik dit onderzoek heb kunnen uitvoeren.

Samenvatting

Voor horecabezitters is het van belang om een zo goed mogelijke muziekbeleving meegegeven aan hun klanten zonder de klant hierbij te storen. De twee idealen botsen zo nu en dan. En niet alleen klanten willen ongestoord met elkaar kunnen praten, ook omwonenden willen geen last hebben van de muziek. Voor dit soort vraagstukken worden akoestische experts ingeschakeld.

Bij een akoestisch horecaonderzoek wordt het maximaal toegestane geluid in de horecaruimte bepaald waarbij aanpandige woningen niet gehinderd worden. Dit gebeurt echter wanneer de horecaruimte leeg is, terwijl mensen ook geluid absorberen. Het resultaat: een te laag maximaal toegestaan geluidniveau. Uit dit onderzoek blijkt dat het niet zo zeer de mensen zelf zijn die het geluid absorberen, maar hun kleding. Door de absorptie die veroorzaakt wordt door de kleding absorberen personen vanaf ongeveer 250 Hz goed geluid. Wanneer er veel mensen aanwezig zijn in een ruimte, neemt de hoeveelheid absorptieoppervlakte sterk toe. De nagalmtijd neemt dan af en het maximaal toegestane geluidniveau wordt hoger. De modellen laten zien dat de nagalmtijd met ongeveer 50 % afneemt wanneer er een groep mensen in de ruimte aanwezig is.

Metingen die gedaan zijn in de galmkamer van de hogeschool Windesheim in Zwolle laten zien dat mensen die dicht bij elkaar staan minder geluid absorberen dan dezelfde hoeveelheid personen wanneer deze verspreidt over de ruimte staan. Dit heeft te maken met de reductie van het absorptieoppervlak wanneer iedereen dicht bij elkaar staat.

Met behulp van de verkregen waardes van de metingen in de galmkamer is de absorptiewaarde voor een persoon bepaald. Met modellen is vervolgens in diverse horecasituaties de nagalmtijd bepaald wanneer de horecaruimte leeg zou zijn en wanneer deze gevuld met personen is. In grote ruimtes komen de theoretische berekende waardes redelijk met elkaar overeen, maar in kleine ruimtes wordt de afwijking relatief groot.

Inhoudsopgave

	Voorwoord	3
	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Het GeluidBuro	6
1.2	Geluidmetingen bij horecagelegenheden	7
1.2.1	<i>De horecametingen</i>	7
2	Theorie	8
2.1	dB(A), dB(Z) en andere wegingen	8
2.2	Roze ruis	11
2.3	Nagalmtijd	11
2.3.1	<i>Het meten van de nagalmtijd</i>	13
2.4	Absorptie	14
2.4.1	<i>Definitie van geluidabsorptie</i>	15
2.4.2	<i>Poreuze materialen</i>	16
2.4.3	<i>Staande golven tussen muren, maximale deeltjesverplaatsing ξ en impedantie</i>	16
2.4.4	<i>Absorptie door personen</i>	20
2.4.5	<i>Helmholtzresonator</i>	21
3	Testopstellingen	24
3.1	Gemeten nagalmtijd in een ‘galmkamer’	24
3.2	Modellen van horecagelegenheden	24
3.2.1	<i>EASE, rekenen met een stralenmodel</i>	25
3.3	Nagalmtijdmetingen in horecagelegenheden	26
3.4	Nagalmtijdmetingen in een galmkamer	27
4	Meetresultaten	29
4.1	Gebruikte apparatuur	29
4.2	Nagalmtijdmetingen in Arnhem	29
4.3	Nagalmtijdmetingen bij horeca	31
4.3.1	<i>Horecameting bij restaurant Bird, Rotterdam</i>	31
4.3.2	<i>Horecameting bij Hospitalbar Casa Rosso, Amsterdam</i>	33
4.3.3	<i>Horecameting bij restaurant Amstelhaven, Amsterdam</i>	34
4.4	Grove benadering van de realiteit	35
4.5	Nagalmtijdmetingen in de galmkamer van hogeschool Windesheim	35
4.5.1	<i>Nagalmtijdmeting lege ruimte</i>	36
4.5.2	<i>Nagalmtijdmeting 30 stuks kleding, opeengepakt</i>	36
4.5.3	<i>Nagalmtijdmeting 30 stuks kleding, verspreidt over de ruimte</i>	37
4.5.4	<i>Nagalmtijdmeting 15 stuks kleding, opeengepakt</i>	37
4.6	Nagalmtijdberekening EASE	38
4.6.1	<i>Nagalmtijdberekening kleine bar</i>	38
4.6.2	<i>Nagalmtijdberekening grote bar</i>	39
4.6.3	<i>Nagalmtijdberekening klein restaurant</i>	39
4.6.4	<i>Nagalmtijdberekening groot restaurant</i>	40
5	Conclusie	41
6	Bronvermelding	43
Bijlage 1	– Afleiding eenheid impedantie z	46
Bijlage 2	– Volumes	47
Bijlage 3	– Meting Arnhem	48
Bijlage 4	– Meting Bird	49
Bijlage 5	– Meting Casa Rosso	50
Bijlage 6	– Meting Amstelhaven	51
Bijlage 7	– Galmkamermetingen	52
Bijlage 8	– Model kleine bar	53
Bijlage 9	– Model grote bar	54
Bijlage 10	– Model klein restaurant	57
Bijlage 11	– Model groot restaurant	58

1 Inleiding

Geluid binnen de horecabranche is erg veelzijdig. Aan de ene kant wil men een zo goed mogelijke geluidsbeleving bij een concert of optreden, maar aan de andere kant wil men aan het eind van het optreden geen pieptoon in de oren hebben. In een café wil men met elkaar praten of van een liveoptreden genieten, maar aan de andere kant wil de café-eigenaar geen overlast veroorzaken voor omwonenden. Festivalgangers willen op een festival over het algemeen de muziek zo hard mogelijk hebben terwijl omwonenden op enkele kilometers afstand nog steeds last kunnen hebben van de lage bastonen. Restaurants willen dat gasten prettig met elkaar kunnen praten en willen vaak rustige muziek op de achtergrond draaien zonder dat stemmen erg gaan galmen. Buren willen naast elkaar wonen zonder dat ze precies horen wat de ander doet. En zo zijn er nog tal van mogelijke problemen – met hun bijbehorende oplossingen – denkbaar waarvoor een gespecialiseerd akoestisch bureau ingeschakeld moet worden. De opdracht hiervoor kan komen van de overheid, een gemeente, een verhuurder of een particulier. Het GeluidBuro is een van die akoestische bureaus.

1.1 Het GeluidBuro

Het GeluidBuro is een ingenieursbureau dat gespecialiseerd is in akoestisch onderzoek. Het bedrijf is gestart in 2010 en heeft tegenwoordig drie vestigingen: het hoofdkantoor in Haarlem, een vestiging in Arnhem en een vestiging in Hannover (Duitsland) voor Duitse klanten. Vanuit die locaties worden overheden, gemeentes, bedrijven en particulieren geholpen die om een akoestische onderzoek vragen. In figuur 1 is het logo van Het GeluidBuro weergegeven.



Figuur 1 *Het logo van Het GeluidBuro.^[1]*

Tijdens het akoestisch onderzoek wordt het veroorzaakte geluid gemeten en op de vestigingen wordt hier vervolgens mee gerekend. Hierna wordt een akoestisch rapport opgesteld waarin Het GeluidBuro advies geeft over de manier waarop het geluid te reduceren of juist te optimaliseren is. Door de uitgebreide en ingewikkelde geluidregelgeving en het gedane onderzoek in “gewone mensentaal” aan de klant te presenteren, onderscheidt Het GeluidBuro zich van andere bedrijven in de geluidbranche.

Het GeluidBuro voert metingen uit aan onder andere industrie, infrastructuur, horecagelegenheden, evenementen en bouwplaatsen. Door zich op verschillende werkgebieden te profileren en specialiseren, is er voor elke klant de benodigde expertise aanwezig.

1.2 Geluidmetingen bij horecagelegenheden

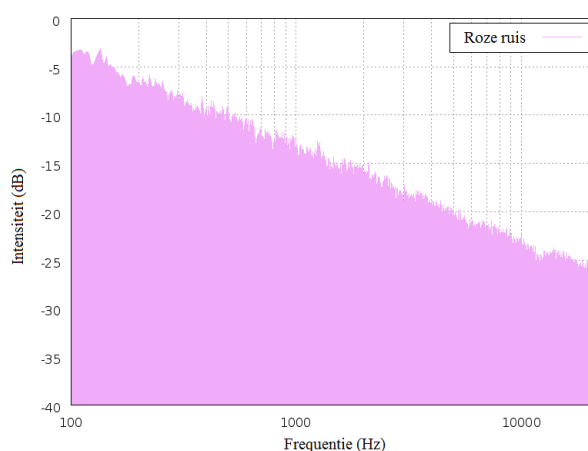
Mensen willen een zo levendig mogelijke beleving van geluid ervaren. Niet alleen op festivals en bij optredens, maar ook in horecagelegenheden zoals restaurants, bars en clubs. Bars en clubs draaien het liefst de muziek zo hard mogelijk om het jongerenpubliek aan te spreken.

Het vermoeden is dat het muziekgeluidniveau daalt wanneer er veel mensen in een horecagelegenheid aanwezig zijn. Wanneer er bijvoorbeeld 150 personen aanwezig zijn in een bar of club, kan dit zorgen voor 100 tot 900 % meer geluidabsorptieoppervlak⁽¹⁾ (afhankelijk van de octaafband). Dit zou betekenen dat het geluid vele malen meer geabsorbeerd wordt en het geluidniveau lager wordt. Dit zou kunnen betekenen dat hierdoor ook de geluidoverdracht naar de omgeving lager wordt en zodoende dat het maximaal toelaatbare geluidniveau van een horecagelegenheid verhoogd kan worden.

1.2.1 De horecametingen

Voor geluidmetingen in horecagelegenheden wordt gebruikgemaakt van een of meerdere luidsprekers die in de ruimte zijn geplaatst en waarmee een breedbandig ruissignaal (ook wel ‘roze ruis’ of $1/f$ -ruis, weergegeven in figuur 2) geproduceerd kan worden.

Tijdens het uitvoeren van de geluidmetingen moeten ramen en deuren van de horecagelegenheid gesloten zijn om ervoor te zorgen dat enkel het flankerende geluid in boven- of naastgelegen woningen wordt gemeten. Door vervolgens het geluidniveau in de ruimte en in de omliggende ruimtes te meten, kan per octaafband de afname van het geluid bepaald worden.



Figuur 2 Het signaal van ‘roze ruis’ of ‘ $1/f$ -ruis’.^[2]

De metingen worden – vanwege het veroorzaakte lawaai van de $1/f$ -ruis – uitgevoerd zonder dat er personen aanwezig zijn in de horecagelegenheid. Afhankelijk van de instelling van de luidsprekers en de inrichting van de ruimte ligt het uitgezonden geluidniveau rond de 109 dB(A)⁽²⁾. Aan de hand van deze metingen wordt de afname van het geluidniveau bepaald, en evenzo het maximaal toegestane te produceren geluid. Dit geldt dus voor een lege horecagelegenheid, met vaste absorptiematerialen (bar, stoelen en dergelijke voorwerpen). Een horecagelegenheid is in principe niet leeg wanneer er muziek wordt gedraaid. Omdat mensen ook geluid absorberen, is het voor het bedrijf misschien wel mogelijk om meer geluid te produceren omdat er ook meer geabsorbeerd wordt.

Het is tot dusverre onbekend of de aanwezigheid van personen in een horecagelegenheid een significant verschil maakt in de geluidoverdracht en dus het toelaatbare geluidniveau. In theater- en concertzalen wordt wel al mee gewerkt met de absorptie van zittende personen; voor deze zalen zijn stoelen ontwikkeld die met een persoon erop evenveel geluid absorberen als wanneer ze onbezet zijn.^[3]

⁽¹⁾ Ten opzichte van een horecaruimte zonder personen.

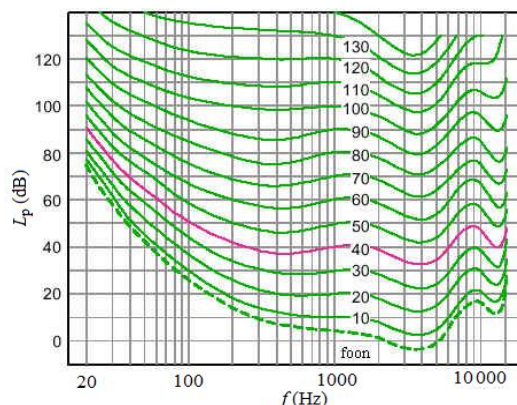
⁽²⁾ De eenheid dB(A) staat voor het A-gewogen geluidniveau (L_{Aeq}). De A-weging is een gehoorcorrectie voor lage en gemiddelde geluidniveaus. Zie ook 2.1 – dB(A), dB(Z) en andere wegingen.

2 Theorie

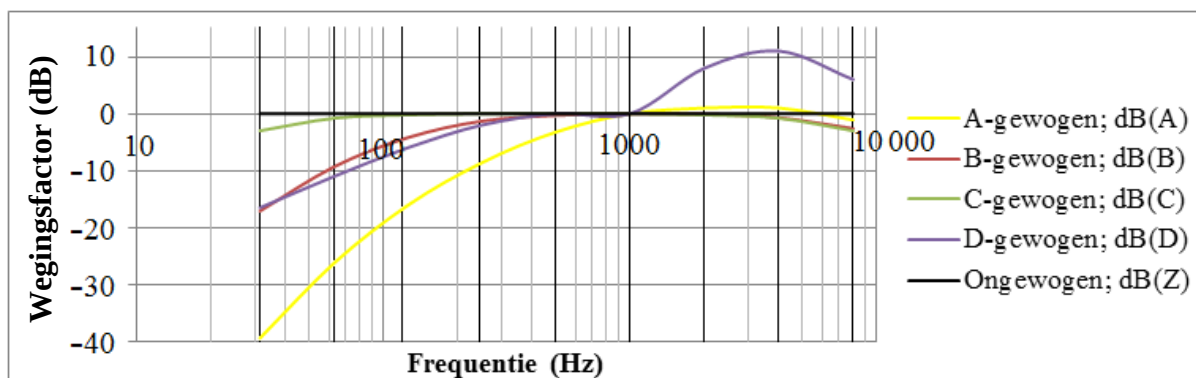
Voor een geluidmeting in een horecagelegenheid worden een of meer luidsprekers in de ruimte gezet. Hier wordt vervolgens op een hoog geluidniveau (rond de 109 dB(A), afhankelijk van de inrichting van de ruimte) een rozeruissignaal uitgezonden. Van dit geproduceerde geluid wordt het geluidniveau bepaald met een geluidmeter. Vervolgens wordt in de aanpandige woningen ook het geluid bepaald dat veroorzaakt wordt door de bron in de horecagelegenheid. Door achteraf in rekenmodellen deze twee geluidniveaus met elkaar te vergelijken, is er iets te zeggen over de geluidafname door de constructies. Vervolgens kan bepaald worden wat het maximaal toelaatbare geluidniveau in de horecagelegenheid is.

2.1 dB(A), dB(Z) en andere wegenen

De gevoeligheid van het menselijk gehoor is niet voor alle frequenties gelijk. Het gehoor heeft de grootste gevoeligheid voor frequenties rond de 1000 Hz. Lagere en hogere tonen worden minder goed waargenomen. De luidheid van een bepaalde toon, zoals deze door de mens ervaren wordt, hangt behalve van het geluidsdrukkniveau L_p ook af van de frequentie f . Dit blijkt uit het verloop van zogenaamde isofonen (figuur 3). Bij een isofoon hoort een foonwaarde die overeenkomt met het geluidsdrukkniveau bij 1000 Hz. Voor een 1000Hz-toon met een geluidsdrukkniveau van bijvoorbeeld 40 dB wordt gesproken van een isofoon van 40 foon⁽³⁾. De foon is de “exacte” manier om de luidheid van een geluid weer te geven. Het is echter een eenheid waar moeilijk mee te werken is. Daarom wordt in de praktijk in principe altijd de dB(A) gebruikt (deze geldt echter alleen voor lage geluidsdrukken, circa 20-40 foon).^[5]



Figuur 3 Isofooncurven, waarbij elke kromme geluiden voorstellen die even hard lijken te zijn. Met de gestippelde lijn de hoorbaarheidsgrens is. De pijn-grens ligt bij de isofoon van 120 foon.^[4]



Figuur 4 Correctiecurven van de gewogen geluidniveau. De zwarte verticale lijnen staan voor de octaafbanden. In tabel 1 zijn de waarden behorend bij deze curven weergegeven.

⁽³⁾ De foon is de eenheid voor het luidheidniveau. 1 foon is per definitie gelijk aan 1 dB bij een frequentie van 1 kHz.

Doordat het gehoorzintuig niet voor alle frequenties even gevoelig is, is het gemeten, lineaire geluidsdruk-niveau geen goede maat voor eventuele hinder ten gevolge van een bepaald geluid. Een betere maat voor hinder wordt verkregen wanneer het meetinstrument niet alle frequenties even zwaar meetelt. Dit kan gedaan worden door het instrument van een filter te voorzien dat het verloop van ons gehoor benadert. Wanneer er met een filter een geluidsdruk gemeten wordt, wordt dit een ‘gewogen geluidsniveau’ genoemd. Er zijn vier genormeerde filters voor de weging van geluid: A-, B-, C- en D-filter. Met de gemeten niveaus respectievelijk in dB(A), dB(B), dB(C) en dB(D). Daarnaast wordt het ongewogen niveau ook wel Z-gewogen (van zero) genoemd: dB(Z). In figuur 4 is het verloop van deze filters te zien, waarbij de verticale, zwarte lijnen de medianen zijn van de octaafbanden. De waarden uit figuur 4 zijn ook in tabel 1 hierna weergegeven.

Tabel 1 De demping van verschillende filters per octaafband.

Octaaf-band	Dempingsfactor				
	A-filter (dB)	B-filter (dB)	C-filter (dB)	D-filter (dB)	Z-filter (dB)
31,5	-39,4	-17,1	-3,0	-16,5	0,0
63	-26,2	-9,3	-0,8	-11,0	0,0
125	-16,1	-4,2	-0,2	-6,0	0,0
250	-8,6	-1,3	0,0	-2,0	0,0
500	-3,2	-0,3	0,0	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000	1,0	-0,1	-0,2	8,0	0,0
4000	1,0	-0,7	-0,8	11,0	0,0
8000	-1,1	-2,6	-3,0	6,0	0,0

A-gewogen geluidsniveau: dB(A)

De A-weging wordt vooral toegepast op door een geluidmeter gemeten geluidsniveau om de relatieve luidheid zoals het menselijk oor deze beleeft te benaderen. Het oor is namelijk minder gevoelig voor lage geluidsfrequenties. Deze weging wordt verkregen door rekenkundig een tabel met waarden, per octaaf (tabel 1), bij het geluidsniveau op te tellen. Hoewel de A-weging in principe bedoeld was voor metingen bij een laag geluidsniveau (40 foon), wordt deze tegenwoordig verplicht voor het meten van omgevingsgeluid en industriegeluid, alsook voor potentiële gehoorschade bij alle geluidsniveaus.^[6] De formule om de A-weegfactor $A(f)$ te berekenen is:^[7]

$$A(f) = 2,0 + 20 \log(R_A(f)), \quad [1.1]$$

met

$$R_A(f) = \frac{12200^2 \cdot f^4}{(f^2 + (20,6)^2) \cdot \sqrt{(f^2 + (107,7)^2)(f^2 + (737,9)^2)} \cdot (f^2 + 12200^2)}, \quad [1.2]$$

waarin:

$A(f)$ de A-wegingsfactor als functie van de frequentie [dB]
 f de frequentie [Hz]

B-gewogen geluidniveau: dB(B)

Waar het A-filter goed aansluit bij lagere geluidniveau – onder 55 dB – is het B-filter geschikt voor niveaus tussen 55 dB en 85 dB. Dit komt overeen met de 70-foonlijn (zie figuur 3). Met formule [2.1] wordt de B-weegfactor $B(f)$ berekend:

$$B(f) = 0,17 + 20 \log(R_B(f)), \quad [2.1]$$

met

$$R_B(f) = \frac{12\,200^2 \cdot f^3}{(f^2 + (20,6)^2) \cdot \sqrt{(f^2 + (158,5)^2)} \cdot (f^2 + 12\,200^2)}, \quad [2.2]$$

waarin:

$B(f)$ de B-wegingsfactor als functie van de frequentie [dB]
 f de frequentie [Hz]

C-gewogen geluidniveau: dB(C)

Het C-filter is geschikt voor geluidniveaus boven de 85 dB. Dit komt overeen met de 100-foonlijn (zie ook figuur 3). Dit filter wordt vaak gebruikt bij het meten van piekgeluid en hoge geluidniveaus. De formule om de C-weegfactor $C(f)$ te berekenen is:

$$C(f) = 0,06 + 20 \log(R_C(f)), \quad [3.1]$$

met

$$R_C(f) = \frac{12\,200^2 \cdot f^2}{(f^2 + (20,6)^2) \cdot (f^2 + 12\,200^2)}, \quad [3.2]$$

waarin:

$C(f)$ de C-wegingsfactor als functie van de frequentie [dB]
 f de frequentie [Hz]

De compensatiefactoren (ongeveer 2,0; 0,17 en 0,06 voor respectievelijk A-, B- en C-weging) zorgen voor de normalisatie naar 0 dB bij 1000 Hz. De precieze compensatiefactoren zijn: $-20 \log(R_A(1000))$, $-20 \log(R_B(1000))$, en $-20 \log(R_C(1000))$ (allen bij een frequentie van 1 kHz).

D-gewogen geluidniveau: dB(D)

Het D-filter is speciaal ontwikkeld voor het bepalen van hinder van luchtverkeerslawaai. De lage frequenties (~ 200 Hz) worden zwaarder gewogen dan de rest van het spectrum. De formule om de D-weegfactor $D(f)$ te berekenen is:

$$D(f) = 20 \log(R_D(f)), \quad [4.1]$$

met

$$R_D(f) = \frac{f}{6,897 \cdot 10^{-5}} \cdot \sqrt{\frac{h(f)}{(f^2 + 79913,29)(f^2 + 1345600)}}, \quad [4.2]$$

waarin

$$h(f) = \frac{(1037918,48 - f^2)^2 + 1080768,16 f^2}{(9837328 - f^2)^2 + 11723776 f^2}. \quad [4.3]$$

In formule [4.1] tot en met [4.3] is:

$D(f)$ de D-wegingsfactor als functie van de frequentie [dB]
 f de frequentie [Hz]

Z-gewogen geluidniveau: dB(Z)

Z-gewogen metingen zijn ongewogen metingen. Naast de eenheid dB, wordt ook wel dB(Z) gebruikt.

Hoewel er in theorie voor verschillende niveaus dus verschillende filters moeten worden toegepast, wordt in de praktijk vrijwel altijd het A-filter toegepast. Het B-filter wordt nooit toegepast, het C-filter wordt soms gebruikt voor zeer hoge geluidsniveaus en het D-filter voor vliegtuiglawaai wordt ook niet meer gebruikt. In plaats van het D-filter wordt de A-weging gebruikt.

2.2 Roze ruis

Bij een meting in een horecagelegenheid worden een of meer luidsprekers in de ruimte geplaatst. Deze worden dusdanig gepositioneerd dat het akoestische veld in de ruimte zo diffuus mogelijk is. Vervolgens wordt met behulp van een ruisbron roze ruis over de luidsprekers afgespeeld. De reden dat roze ruis gebruikt wordt is dat deze vorm van ruis evenveel energie bevat in elke octaafband (er zit dus evenveel energie tussen 40 tot 60 Hz als tussen 4000 tot 6000 Hz, zie ook figuur 2). Dit in tegenstelling tot witte ruis welke een gelijke hoeveelheid energie heeft per frequentie. Roze ruis neemt ongeveer 3 dB af per octaaf. De spectrale vermogensdichtheid (of power spectral density, PSD) van roze ruis is proportioneel met $1/f$. De spectrale vermogensdichtheid is de hoeveelheid vermogen per eenheid van bandbreedte van een signaal (in W/Hz). Hierom wordt roze ruis ook vaak $1/f$ -ruis genoemd.

2.3 Nagalmtijd

Door in de horecaruimte ook de nagalmtijd te meten, kan de totale absorptie in de ruimte bepaald worden. De nagalmtijd is de tijd dat een geluidverschijnsel in een ruimte nog hoorbaar is als de geluidbron al is gestopt. De nagalmtijd T is gedefinieerd als de tijd die nodig is voor een geluidafname met een factor 1 miljoen (60 dB)⁽⁴⁾. In de praktijk is de nagalm dan niet meer te horen.

⁽⁴⁾ In sommige teksten wordt de nagalmtijd T ook wel genoteerd als RT_{60} (van het Engelse *reverberation time* bij een afname van 60 dB, zie ook 2.3.1 – Het meten van de nagalmtijd).

De Amerikaanse natuurkundige Wallace Sabine⁽⁵⁾ wordt over het algemeen beschouwd als de grondlegger van de moderne architectonische akoestiek en als een pionier op het gebied van zaalakoestiek. Sabine heeft, door middel van het doen van experimenten⁽⁶⁾, onderzocht dat er een relatie bestaat tussen de kwaliteit van de akoestiek, de grootte van de ruimte, en de hoeveelheid aanwezig absorptieoppervlak A . Door deze experimenten kreeg hij zicht op de impact van het gebruik van diverse materialen. Sabines succes leidde ertoe dat hij om advies werd gevraagd bij de bouw van de Boston Symphony Hall (die in 1900 werd geopend). Deze concertzaal wordt sindsdien beschouwd als een van de beste zalen voor klassieke muziek ter wereld. Zijn formule voor de nagalmtijd is nog steeds de meest gebruikte methode voor het bepalen van de akoestische kwaliteit van een ruimte (hoewel niet de meest nauwkeurige in verband met de aanname dat de ruimte kubisch van vorm is):

$$T = \frac{k \cdot V}{\alpha \cdot S} = \frac{k \cdot V}{A}, \quad [5]$$

met:

T	de nagalmtijd	[s]
k	een constante, $k = 24 \ln(10)/c$	[s/m]
c	de geluidsnelheid in lucht bij 20 °C	[m/s]
V	het volume van de ruimte	[m ³]
α	de absorptiecoëfficiënt	[-]
S	het absorberende, geometrische oppervlak	[m ²]
A	het equivalente absorptieoppervlak, of het open-raam-oppervlak	[m ² of sabin]

Het equivalente absorptieoppervlak (of ‘open-raam-oppervlak’ of ‘het aantal vierkante meters open raam’) is de grootheid die ontstaat door de absorptiecoëfficiënt α te vermenigvuldigen met het absorberende, geometrische oppervlak S (voor meerdere materialen wordt dit dan: $\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n$). Wat is 1 m² open raam precies? Stel dat er een oppervlakte van 10 m² is van een bepaald materiaal met een absorptiecoëfficiënt van $\alpha = 0,1$. Dan wordt 10 % van het geluid dat op deze 10 m² valt door het oppervlak geabsorbeerd en niet terug in de ruimte gereflecteerd. Bij wijze van spreken is het oppervlak te vervangen door 9 m² materiaal met een absorptiecoëfficiënt van 0,0 (0 % absorptie, alles wordt nu gereflecteerd de ruimte in) en 1 m² met een absorptiecoëfficiënt van 1,0 (100 % absorptie, alles wordt geabsorbeerd). Die 1 m² is eigenlijk gelijk aan een open raam van 1 m² in datzelfde oppervlak (een open raam reflecteert immers niet).

Wanneer in formule [5] de factor k berekend wordt, zal de formule overgaan in⁽⁷⁾

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{A}. \quad [6]$$

⁽⁵⁾ Wallace Clement Sabine (13 juni 1868 – 10 januari 1919), Amerikaanse natuurkundige.

⁽⁶⁾ Zoals beschreven in Sabines *Collected Papers on Acoustics*, 1922.

⁽⁷⁾ De eenheid van de factor 0,161 is m/s. Wanneer in plaats van het metrische stelsel het empirische meetstelsel gebruikt wordt, zal de factor 0,161 m/s omgerekend moeten worden naar 0,049 ft/s. Hetzelfde geldt als de geluidsnelheid niet in meters ingevoerd wordt, maar in centimeters of een dergelijke afstandsmaat.

Naast de absorptiecoëfficiënt α wordt af en toe ook de energie-reflectiecoëfficiënt R gebruikt. De energie-reflectiecoëfficiënt beschrijft de verhouding tussen de uitkomende intensiteit I_{uit} en de invallende intensiteit I_{in} :

$$R = \frac{I_{\text{uit}}}{I_{\text{in}}}. \quad [7]$$

De relatie tussen R en α is:

$$\alpha = 1 - R. \quad [8]$$

2.3.1 Het meten van de nagalmtijd

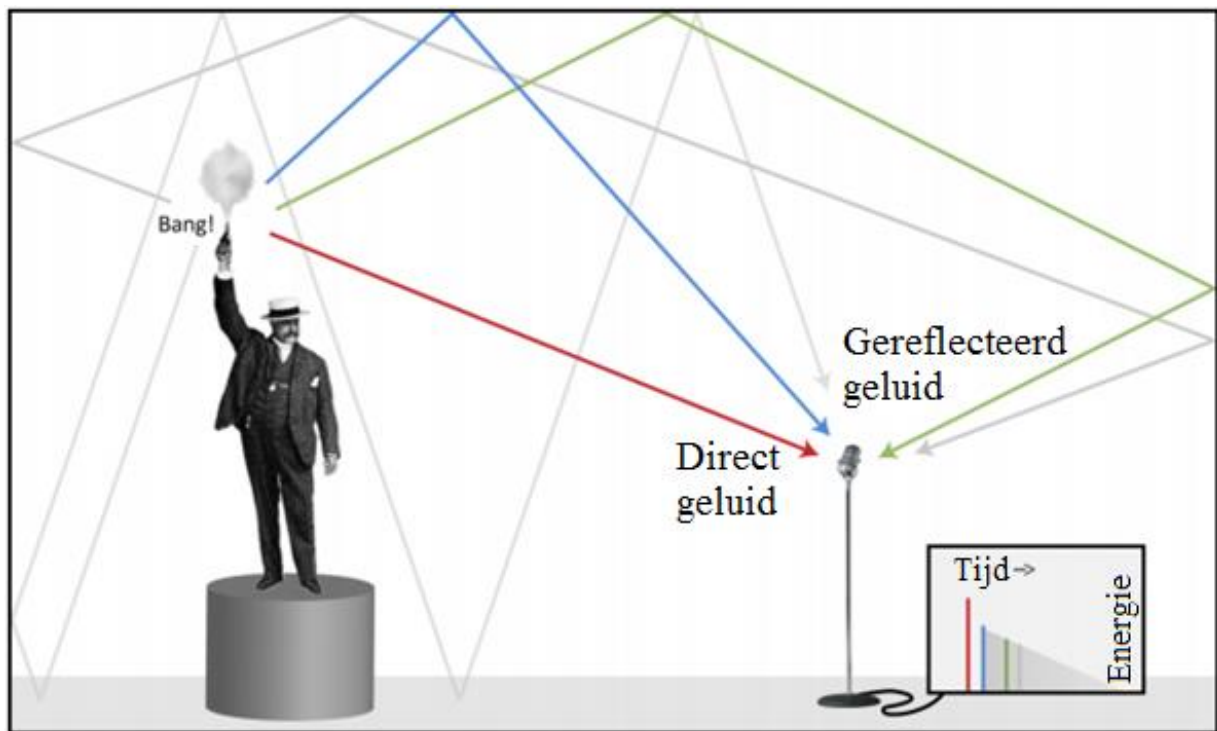
De nagalmtijd wordt meestal gemeten met een alarm-pistool of een bolbron (een dodecaëdervormige luidspreker). Een bolbron is een combinatie van luidsprekers die dusdanig gepositioneerd zijn dat de bron in elke richting geluid uitstraalt. In figuur 5 is een voorbeeld van een bolbron weergegeven.

De nagalmtijd is frequentieafhankelijk, vandaar dat deze voor verschillende octaafbanden gemeten wordt. In de late negentiende eeuw begon Sabine experimenten aan de universiteit van Harvard om de impact van absorptie en nagalmtijd te bepalen. Met een verplaatsbare windlade (een soort ruimte om gecomprimeerde lucht op te slaan bij een orgel) en orgelpijpen als geluidbron, een stopwatch en zijn oren, mat hij de tijd vanaf het uitzetten van de bron totdat het geluid niet meer hoorbaar was (dit was een verschil van ongeveer 60 dB). Hij heeft toen ontdekt dat de nagalmtijd evenredig is aan het volume van de ruimte en omgekeerd evenredig is aan de hoeveelheid absorptie (zie formule [5]).^[9] In figuur 6 is een schematische weergave weergegeven van het meten van de nagalmtijd.



Figuur 5 Voorbeeld van een bolbron, zoals deze veel gebruikt wordt bij nagalmmetingen.^[8]

Hoewel de nagalmtijd gedefinieerd is als de tijd die het geluid nodig heeft om 60 dB af te nemen, is dit slechts zelden te meten vanwege het achtergrondgeluid. Hierdoor wordt de nagalmtijd meestal gebaseerd op een geluidafname van 20 à 30 dB, beginnend bij 5 dB onder het gewone geluidsniveau om er zeker van te zijn dat directe reflecties geen rol meer spelen. De waarde die hieruit verkregen wordt, wordt geëxtrapoleerd naar 60 dB, waarbij er van uitgegaan wordt dat het gekozen gedeelte van de afname representatief is voor de volledige afname. De gebruikte spreiding wordt aangegeven met T_{20} , T_{30} , et cetera, afhankelijk van de gekozen afname. Wanneer bijvoorbeeld T_{20} wordt gemeten, wordt deze vervolgens met drie vermenigvuldigd om de T_{60} te verkrijgen.



Figuur 6 De impulsresponsie bestaat uit geluid dat wordt uitgezonden vanaf een bronpositie en arriveert bij de meetpositie. Dit ontvangen geluid bestaat dan zowel uit direct geluid als uit indirect geluid. Hier zijn de paden te zien van direct geluid (rood), gevolgd door een eersteordereflectie (blauw), een tweedeordereflectie (groen) en hogereordereflecties (grijs).^[10]

2.4 Absorptie

Geluid plant zich voort als een longitudinale golf. Deze golf comprimeert en expandeert lucht in dezelfde richting als hij zich voortplant. Een geluid zal de deeltjes in een materiaal – gas, vloeistof of vaste stof – laten vibreren waardoor de golf een klein beetje kinetische energie kwijtraakt bij elke beweging: absorptie.

De meest effectieve manier om geluid te stoppen is door ervoor te zorgen dat de geluidsgolf zich niet kan voortplanten, dus door het medium weg te halen. Een volledig vacuüm stopt dus de geluidsgolf. Elk materiaal laat in zekere mate een klein deel van de golf door, en afhankelijk van het soort materiaal en de doordringdiepte van de golf wordt het geluid meer gedempt; er wordt meer geluid geabsorbeerd.

Daarnaast wordt elke frequentie anders geabsorbeerd door het verschil in golflengte. Zo laten veel materialen lage frequenties beter door dan hoge frequenties.

2.4.1 Definitie van geluidabsorptie

Geluidenergie die invalt op een oppervlakte, zoals een wand, kan worden gereflecteerd, doorgelaten (transmissie) of geabsorbeerd (zie figuur 7). Wanneer geluidenergie geabsorbeerd wordt door de wand, wordt deze energie omgezet in warmte die gecreëerd wordt door de ontstane trillingen. Wanneer de invallende intensiteit I_{in} is, de gereflecteerde I_{r} , de doorgelaten I_{d} en de geabsorbeerde I_{a} is, dan geldt dat

$$I_{\text{in}} = I_{\text{r}} + I_{\text{d}} + I_{\text{a}}, \quad [9.1]$$

oftewel:

$$\frac{I_{\text{r}}}{I_{\text{in}}} + \frac{I_{\text{d}}}{I_{\text{in}}} + \frac{I_{\text{a}}}{I_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{in}}} = 1. \quad [9.2]$$

Uit formule [7] bleek al dat de energie-reflectiecoëfficiënt gelijk is aan $R = I_{\text{uit}}/I_{\text{in}}$. Ditzelfde geldt voor de doorlatingscoëfficiënt, D , en de absorptiecoëfficiënt, α . Zo zijn de coëfficiënten respectievelijk:

$$R = \frac{I_{\text{r}}}{I_{\text{in}}} \quad D = \frac{I_{\text{d}}}{I_{\text{in}}} \quad \alpha = \frac{I_{\text{a}}}{I_{\text{in}}} \quad [10]$$

Uit formule [9.1] en [10] volgt vervolgens:

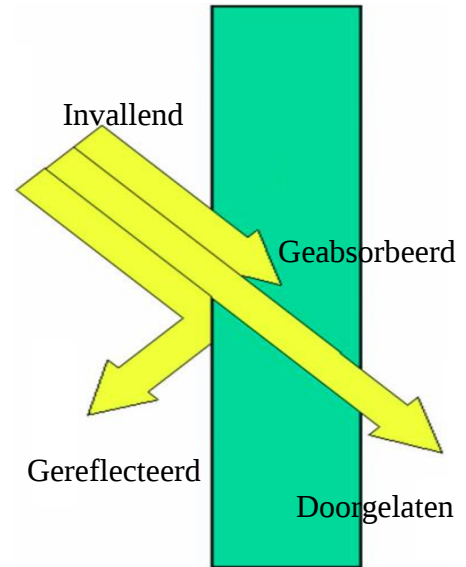
$$\alpha = 1 - R - D, \quad [11]$$

met:

α	de absorptiecoëfficiënt	[-]
R	de energie-reflectiecoëfficiënt	[-]
D	de doorlatingscoëfficiënt	[-]

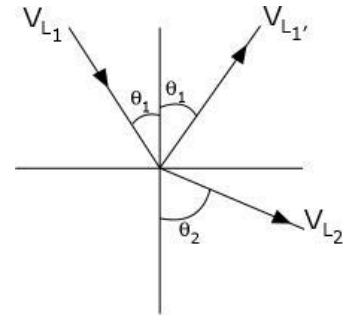
De doorlatingscoëfficiënt D is voor veel materialen dusdanig laag (voor glas 0,01, voor een halfsteensmuur 0,0001) dat deze doorgaans verwaarloosd wordt bij de bepaling van de geluidabsorptie. Zo wordt formule [8] verkregen ($\alpha = 1 - R$).

Wanneer de geluidgolven door het materiaal gaan, vervormen ze het materiaal (net zoals ze bij de lucht deden). Deze deformatie zet dankzij mechanische verliezen een deel van de geluidenergie om in warmte via akoestische attenuatie, vooral door de viscositeit van het materiaal. Met akoestische attenuatie wordt het energieverlies gemeten wanneer het geluid zich via een medium zoals water of lucht verplaatst. De meeste media hebben een bepaalde viscositeit. Hierdoor zijn ze niet ideaal voor akoestische demping. Wanneer geluid zich via dit soort media verplaatst, is er altijd sprake van thermische energieconsumptie die wordt veroorzaakt door de viscositeit van het materiaal.



Figuur 7 Schematische weergave van het invallende geluid, het gereflecteerde, het doorgelaten en het geabsorbeerde geluid.^[11]

De fractie van het geabsorbeerde geluid wordt bepaald door de akoestische impedantie van beide media en is een functie van frequentie en de invalhoek. De uitvalhoek is afhankelijk van de hoek waaronder de golven het medium binnentreden en de geluidssnelheden van de twee materialen (figuur 8). De wet van Snellius⁽⁸⁾ beschrijft de relatie tussen de hoeken en de golfsnelheden:^[12]



$$\frac{\sin(\theta_1)}{v_{L_1}} = \frac{\sin(\theta_2)}{v_{L_2}},$$

[12]

Figuur 8 Visualisatie bij formule [12].

met:

θ_1	de hoek van inval	[°]
v_{L_1}	de snelheid van de invallende longitudinale golf	[m/s]
θ_2	de hoek van uitval	[°]
v_{L_2}	de snelheid van de uitvallende longitudinale golf	[m/s]

2.4.2 Poreuze materialen

Bij poreuze materialen wordt de geluidabsorptie veroorzaakt door wrijving van de luchtdeeltjes in de poriën van het materiaal. Door de viscositeit van de lucht in de poriën wordt de deeltjessnelheid van de lucht door de wrijving omgezet in warmte. De ontwikkelde warmte-energie zorgt ervoor dat de geluidenergie van de invallende geluidgolf minder wordt.

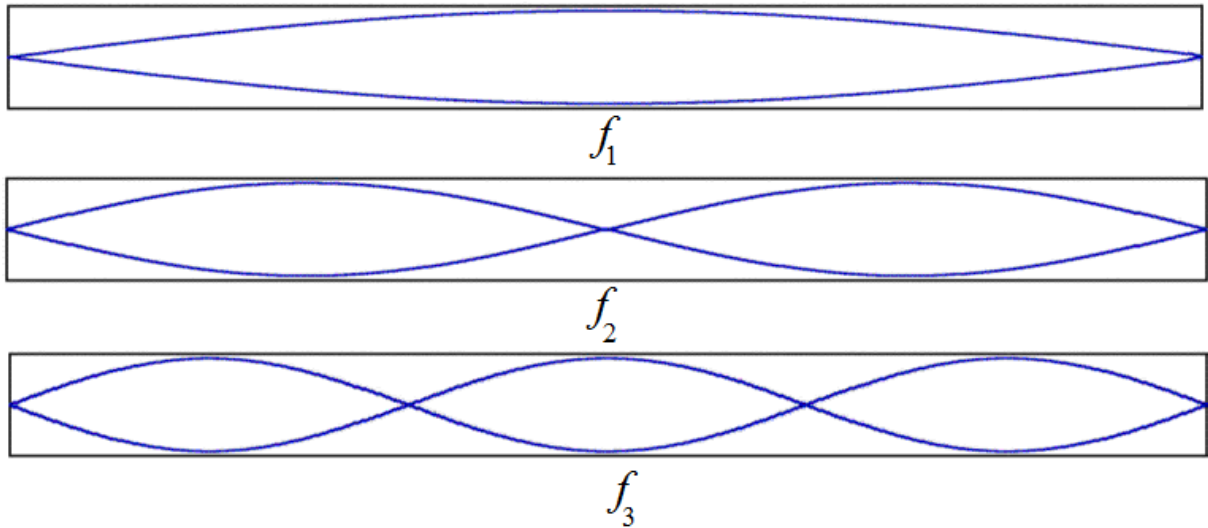
De afmetingen van de poriën en de golflengte van het invallende geluid bepalen de effectiviteit van de omzetting van akoestische energie in warmte. Grotere golflengtes (lagere frequenties) zullen minder interactie ondervinden ten gevolge van de – ten opzichte van de golflengte – kleine poriën. Voor een gelijke absorptiecoëfficiënt bij grote golflengtes is dus een grotere laagdikte vereist dan bij kleine golflengtes (de hoge frequenties).

2.4.3 Staande golven tussen muren, maximale deeltjesverplaatsing $\hat{\xi}$ en impedantie

Resonanties die ontstaan in een ruimte worden “staande golven” genoemd. Deze ontstaan wanneer een veelvoud van de halve golflengte ($\lambda/2$) tussen de grensvlakken van de ruimte past (zie figuur 9). De bij de staande golf horende frequentie wordt de “eigenfrequentie” of “resonantiefrequentie” genoemd.

De laagste frequentie (in figuur 9: f_1) wordt ook wel de “grondfrequentie” genoemd, deze correspondeert met één buik (dit komt overeen met een knoop in de verplaatsing van de luchtdeeltjes). In figuur 9 is te zien dat de gehele lengte van de ruimte overeenkomt met een halve golflengte: $\ell = \frac{1}{2} \lambda_1$, met λ_1 de golflengte van de grondfrequentie. De andere eigenfrequenties worden “boventonen” genoemd, dit zijn veelvouden van de grondfrequentie. De eerste en de tweede boventoon zijn ook weergegeven in figuur 9. De lengte van de ruimte ℓ bij de eerste boventoon komt overeen met één hele golflengte: $\ell = \lambda_2$. Voor de tweede boventoon geldt $\ell = \frac{3}{2} \lambda_3$. In het algemeen kan geschreven worden:

⁽⁸⁾ Willebrord Snel van Royen (1580 – 30 oktober 1626), Nederlandse wis- en natuurkunde en astronoom.



Figuur 9 Staande golven tussen twee muren waarbij f_1 de grondtoon wordt genoemd en f_2 en f_3 respectievelijk de eerste en tweede boventoon zijn.^[13]

$$\ell = \frac{n\lambda_n}{2}, \quad \text{met } n = 1, 2, 3, \dots \quad [13.1]$$

Het getal n geeft in formule [13.1] het nummer van de tonen aan: $n=1$ voor de grondtoon, $n=2$ voor de eerste boventoon, enzovoort. Formule [13.1] is om te schrijven naar

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n}, \quad \text{met } n = 1, 2, 3, \dots \quad [13.2]$$

Om de frequentie van de golven te bepalen kan $f = v/\lambda$ gebruikt worden:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2\ell} = nf_1, \quad \text{met } n = 1, 2, 3, \dots \quad [13.3]$$

Wanneer een longitudinale geluidsgolf wordt verdeeld in de bijbehorende geluidsdruk p , de deeltjessnelheid v en de deeltjesverplaatsing ξ is de relatie tussen deze drie eigenschappen goed te zien. In figuur 9 is dat gedaan. Hierin is duidelijk te zien dat de geluidsdruk p dezelfde amplitude en fase heeft als de geluidsgolf: wanneer de geluidsgolf een maximum (dan wel minimum) heeft, heeft de geluidsdruk ook een maximum (of minimum). Het tegenovergestelde geldt voor de deeltjessnelheid v : wanneer de geluidsgolf een maximum (of minimum) heeft is de deeltjessnelheid gelijk aan 0. Daarnaast is de deeltjesverplaatsing (de tweede rij bolletjes) maximaal en minimaal wanneer de deeltjessnelheid v gelijk is aan 0 (en de geluidsdruk p dus ook maximaal en minimaal is). De eerste rij bolletjes geeft de statische toestand van de deeltjes aan.

De deeltjessnelheid $\vec{v}$ (in m/s) is:^[14]

$$\vec{v} = \frac{d\vec{\xi}}{dt} = \dot{\vec{\xi}}, \quad [14]$$

met:

ξ	de deeltjesverplaatsing ten opzichte van de evenwichtsstand	[m]
t	de tijd	[s]
$\dot{\xi}$	een andere notatie voor $\vec{v}$	[m/s] ⁽⁹⁾

Formule [14] geeft de deeltjessnelheid $\vec{v}$ op elk willekeurig moment t . De deeltjessnelheid hangt af van de deeltjesverplaatsing ξ op een willekeurig moment t (figuur 10). Om de maximale deeltjesverplaatsing $\hat{\xi}$ te bepalen kan gebruikgemaakt worden van onderstaande formule:^[15]

$$\hat{\xi} = \frac{\hat{v}}{\omega} = \frac{\hat{p}}{\omega z} = \frac{\hat{p}}{\omega \rho v} = \frac{\hat{p}}{2\pi f \rho v}, \quad [15]$$

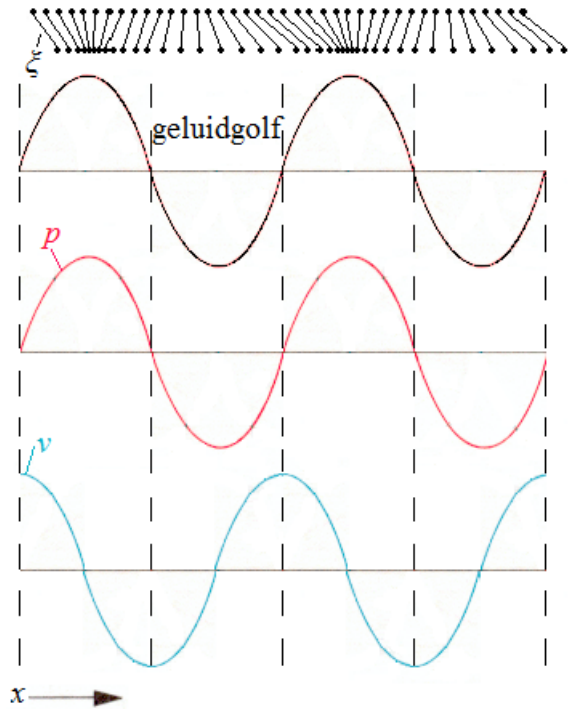
In formule [15] is:

$\hat{\xi}$	de maximale deeltjesverplaatsing	[m]
$\hat{v}$	de maximale deeltjessnelheid	[m/s]
ω	de hoekfrequentie van de golf	[s ⁻¹]
$\hat{p}$	de maximale geluidsdruk	[Pa]
z	de specifieke akoestische impedantie	[N · s/m ³] ⁽¹⁰⁾

De specifieke akoestische impedantie $z = \rho \cdot c = p/v$ beschrijft hoe gemakkelijk de golf zich voortplant in een medium. In deze formule is ρ de dichtheid van het materiaal (in kg/m³) en c de geluidssnelheid in het medium (in m/s). De specifieke akoestische impedantie is de verhouding tussen de geluidsdruk p (in Pa) en de momentane deeltjessnelheid v (in m/s). Naast de specifieke akoestische impedantie wordt ook de akoestische impedantie Z gebruikt.

Wanneer een eendimensionale golf door een opening met oppervlakte A (in m²) gaat, is U de volumestroom per seconde door de opening (in m³/s). Wanneer de stroom een afstand $dy = v dt$ aflegt (met v de akoestische deeltjesstroomsnelheid in m/s), is het volume dat door de opening gaat $A dy$, dus:

$$U = \frac{dV}{dt} = A \frac{dy}{dt} = A v \quad [16]$$



Figuur 10 Relatie van de geluidsdruk p en de deeltjessnelheid v in verhouding met het verloop van een geluidsgolf. Wanneer de geluidsgolf maximaal is, is p maximaal en v minimaal. Boven de geluidsgolf is de deeltjesverplaatsing ξ weergegeven.

⁽⁹⁾ Deze notatie laat zien dat de variabele met een punt (of *fluxion*) een afgeleide is. Zo is $\dot{v} = dx/dt$ de snelheid (afgeleide van de afstand naar de tijd) en $\ddot{a} = d^2x/dt^2$ de versnelling (tweede afgeleide van x naar t).

⁽¹⁰⁾ Zie ook bijlage 1 voor een afleiding van de eenheid van de akoestische impedantie Z_0 .

De akoestische impedantie Z is de verhouding tussen de geluiddruk en de volumestroom, voor een eendimensionale golf geldt:

$$Z = \frac{p}{U} = \frac{p}{Av} = \frac{z}{A} \quad [17]$$

In de praktijk is het bepalen van de akoestische impedantie Z vaak lastiger: wanneer een golf in een buis met invoeroppervlak A wordt gestuurd, zijn er reflecties van het andere eind van de buis, gesloten of open. Er is dus een som van golven van rechts naar links – dit is vooral belangrijk voor muziekinstrumenten.

Er zijn dus enkele verschillen tussen de akoestische impedantie Z en de specifieke akoestische impedantie z . Hieronder zijn de formules voor de twee impedanties weergegeven met hun bijbehorende eenheid.^{[16][17]}

$$Z = \frac{p}{U} = \frac{\rho c}{A} \quad (\text{kg}/(\text{m}^4 \cdot \text{s})) \qquad z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})) \quad [18]$$

De specifieke akoestische impedantie z is een materiaaleigenschap. Zo is z van lucht of water te bepalen. De akoestische impedantie Z is een eigenschap van een geometrische vorm en het medium. Zo is Z van een bepaald kanaal gevuld met lucht te bepalen. Voor de specifieke akoestische impedantie z wordt als eenheid ook wel de rayl gebruikt (Ry). Zo is 1 Ry gelijk aan $1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ of $1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$.

Voor lucht en water gelden de volgende specifieke impedanties z :^{[18][19][20]}

Lucht: $\rho_{\text{lucht}} = 1,20 \text{ kg}/\text{m}^3$ en $c_{\text{lucht}} = 343 \text{ m/s}$. Dit geeft een specifieke akoestische impedantie van $z_{\text{lucht}} = 412 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = 412 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$.

Water: $\rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ en $c_{\text{water}} = 1484 \text{ m/s}$. Dit geeft een specifieke akoestische impedantie van $z_{\text{water}} = 1,48 \text{ MPa} \cdot \text{s}/\text{m}$.

Deze gegevens zijn bij een standaardtemperatuur van $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ en bij atmosferische druk.

Wanneer een golf door een draad gaat die aan beide zijde vast zit, ontstaan bij de uiteindes knopen. Een golf tussen twee harde muren wordt gezien als een geluiddruk golf met losse uiteindes. Hierdoor ontstaan bij de muur maxima – of buiken – in de geluiddruk. In figuur 11.a is een schematische weergave weergegeven van een staande golf die reflecteert tegen een akoestisch harde muur. Op een afstand $\lambda/4$ van de muur is de geluiddruk $p = 0$. De absorptie van een materiaal vergroot wanneer de deeltjessnelheid hoog is.^[21] Het absorberende materiaal moet effectief zijn in het snelheidsmaximum op een afstand $\lambda/4$ van de muur. De snelheid van de geluidgolf zal dan afnemen en daarmee de energie van de golf waardoor deze eerder geabsorbeerd wordt.

Bij een akoestisch zachte muur (zie figuur 11 is op een afstand van $\lambda/4$ vanaf de muur de geluidsdruk p maximaal. De deeltjessnelheid v is hier dan minimaal.

Bij een harde, reflecterende muur (een gesloten buis) is er een buik in de geluidsdruk en op hetzelfde moment een knoop in de deeltjesverplaatsing (zie figuren 10 en 11). Wanneer er over staande golven gesproken wordt, worden daar de amplitudes van de drukverandering die het trommelvlies in beweging brengen bedoeld. De relatie tussen de maximale drukverandering $\hat{p}$ en de maximale deeltjesverplaatsing $\hat{\xi}$ wordt verkregen door formule [15] om te schrijven:

$$\hat{p} = \omega \rho v \hat{\xi} = 2\pi f \rho v \hat{\xi} \quad [19]$$

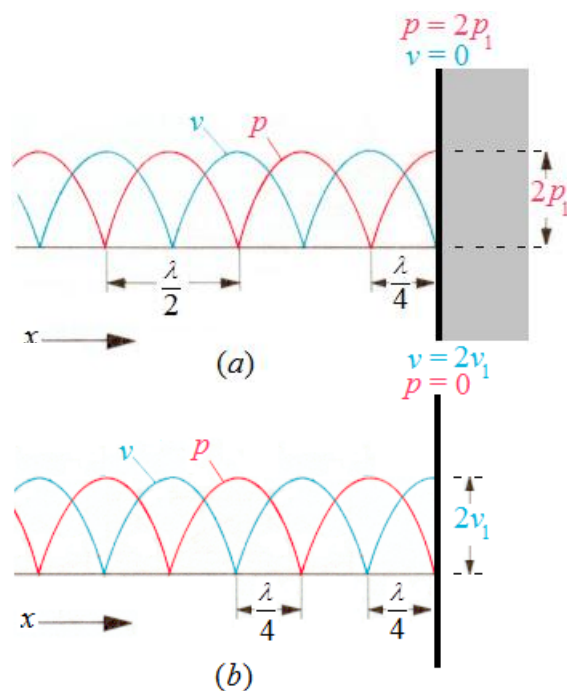
2.4.4 Absorptie door personen

Dat personen geluid absorberen is bekend. In de meeste concertzalen wordt hier tegenwoordig rekening mee gehouden door de absorptie van de stoelen dusdanig te maken dat de aanwezigheid van een persoon op die stoel geen invloed heeft op de totale absorptie van persoon en stoel. In figuur 33 in bijlage 7 is te zien dat – bij metingen in een galmkamer – personen⁽¹¹⁾

midden- en hoogfrequent geluid (vanaf ongeveer 250 Hz) beter absorberen dan laagfrequent geluid. Een persoon kan gezien worden als een akoestisch zacht obstakel (vanwege de absorberende kleding). Wanneer de geluidsgolf een grote amplitude (maximale deeltjesverplaatsing $\hat{\xi} = \hat{p}/2\pi f \rho v$) heeft, betekent dit dat de energie van deze golf ook groot is.^[23] Uit formule [15] blijkt dat de amplitude $\hat{\xi}$ afhangt van de maximale geluidsdrukverandering $\hat{p}$ en de frequentie f . Des te groter f , des te kleiner $\hat{\xi}$. Dit betekent dat het voor de golf gemakkelijker is de persoon te “raken”. Bij een lage frequentie is de amplitude groter en kan de golf de persoon “missen”.

Een naakt persoon absorbeert nagenoeg geen geluid. Weefsel heeft bijvoorbeeld een akoestische impedantie z van $1,99 \cdot 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.^[24] De impedantie geeft aan hoe lastig het is voor het geluid om een materiaal binnen te dringen. De admittantie Y (in $\text{m}^2 \cdot \text{s}/\text{kg}$) daarentegen laat zien hoe gemakkelijk het is voor een geluid om een materiaal in te dringen:

$$Y \equiv \frac{1}{z}. \quad [20.1]$$



Figuur 11 Verdeling van de geluidsdruk p (in rood) en de deeltjessnelheid v (in blauw) in een staande golf bij totale (a) totale reflectie van een akoestische harde muur (akoestisch reflecterend) en (b) totale reflectie van een akoestische zachte muur. De deeltjessnelheid en de geluidsdruk zijn beide absoluut in deze figuur.

⁽¹¹⁾ Er is in de galmkamer van de hogeschool Windesheim niet met echte personen gemeten, in plaats daarvan is gebruikgemaakt van kleding, op een dusdanig manier opgehangen dat de kleding overeenkomt met personen. Hierbij is ervan uitgegaan dat het weefsel van mensen nagenoeg niet absorbeert ($\sim 1\%$).^[22] Vrijwel alle absorptie veroorzaakt door een persoon komt dus van de kleding van die persoon.

Zo is de admittantie van weefsel gelijk aan:

$$Y = \frac{1}{1,99 \cdot 10^6} = 5,03 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s} / \text{kg}. \quad [20.2]$$

Daarnaast is met behulp van formule [15] en [18] ($z = \rho \cdot c$) het verband tussen de frequentie f en de akoestische impedantie z te bepalen:

$$\hat{\xi} = \frac{\hat{p}}{2\pi f v \frac{z}{c}}, \quad [21.1]$$

waarin de deeltjessnelheid v en de geluidssnelheid c aan elkaar gelijk zijn (bij lucht 343 m/s). Dit resulteert in:

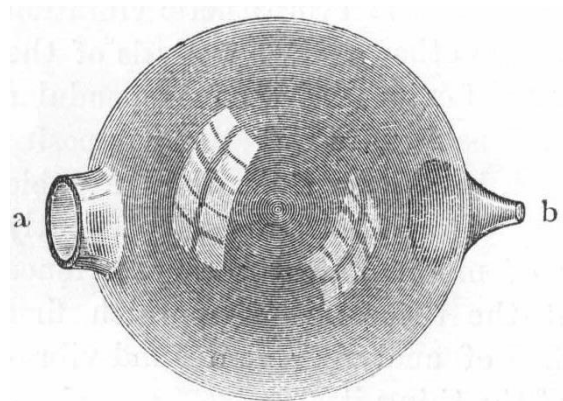
$$\hat{\xi} = \frac{\hat{p}}{2\pi f z} \rightarrow z = \frac{\hat{p}}{2\pi f \hat{\xi}}, \quad [21.2]$$

Hieruit blijkt dat de akoestische impedantie vergroot wanneer de frequentie klein is. Wanneer de frequentie groot is, is de impedantie klein. Dit is de reden dat (de kleding van) een persoon beter de hoge frequenties absorbeert.

2.4.5 Helmholtzresonator

Een andere manier om geluid te absorberen is met behulp van een zogeheten helmholtzresonator⁽¹²⁾ (zie figuur 12). Dit is een akoestische resonator die bestaat uit een volume van een bepaald gas (bijvoorbeeld lucht) dat via een opening in een hals in verbinding staat met de buitenlucht. Wanneer de opening wordt geraakt door een geluidsgolf ontstaat er een overdruk aan de ingang van de hals. De massa van het gas dat zich in de hals bevindt, wordt onder invloed van die overdruk heen en weer bewogen en zal hierdoor het volume gas in de ruimte doen comprimeren en expanderen. Een helmholtzresonator is dus in principe een massa-veersysteem.

De dimensies van een helmholtzresonator moeten kleiner zijn dan de golflengte van het geproduceerde geluid. Door deze aanname zijn de drukvariaties in het volume van de grote ruimte verwaarloosbaar. De druk is dan gelijk in de gehele ruimte. De lucht in de hals heeft een effectieve lengte L_{eff} (in m) – $L_{\text{eff}} = L + 1,46R$ – en een doorsnedeoppervlak A (in m). De correctiefactor voor de effectieve lengte is toegevoegd vanwege de afwijking die ontstaat doordat de massa van de lucht die in beweging is

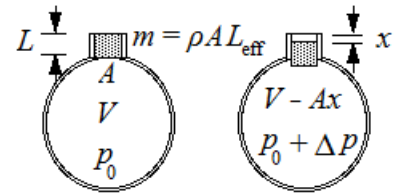


Figuur 12 Schematische weergave van een helmholtzresonator zoals deze geïntroduceerd is door Hermann von Helmholtz. Door opening a kwam de toon binnen en opening b stopte hij – omhuld met was – in zijn oor om de geresoneerde toon te horen.^[25]

⁽¹²⁾ Vernoemd naar Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (31 augustus 1821 – 8 september 1894), Duitse medicus en natuurkundige.

groter is dan de massa van de lucht die aanwezig is in de hals. Hierdoor ontstaat een hals met een effectieve lengte L_{eff} die groter is dan de geometrische lengte L .

De massa van de lucht in de hals is $A \cdot L_{\text{eff}} \cdot \rho_{\text{lucht}}$. Wanneer de hoeveelheid lucht uit de hals een kleine afstand x de grote ruimte in gaat, comprimeert dit de lucht in de ruimte zodanig dat het statische volume V verandert in $V - Ax$. Hierdoor zal de druk van de lucht stijgen van atmosferische druk p_0 naar $p_0 + \Delta p$. In figuur 13 is dit weergegeven.



Figuur 13 Schematische weergave van de werking van een helmholtzresonator.

Wanneer de compressie $p_0 + \Delta p$ langzaam genoeg ging om de temperatuur van de lucht niet te veranderen, zou de drukverhoging evenredig zijn met de volumeverkleining. Dit is echter niet het geval. Door het comprimeren en expanderen van de lucht in de hals warmt de lucht op en zal dit resulteren in een grotere verandering van de druk. Dit gebeurt adiabatisch en de warmte heeft geen tijd om zich te verplaatsing. De formule die hieruit volgt bevat de verhouding tussen de warmtecapaciteiten γ :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad [22]$$

met:

c_p de specifieke warmtecapaciteit bij constante druk [J/K]

c_v de specifieke warmtecapaciteit bij constant volume [J/K]

Voor lucht met een temperatuur van 20 °C is γ ongeveer 1,4.^[26] Hierdoor is de drukverandering Δp die ontstaat door een volumeverandering ΔV gelijk aan:

$$\frac{\Delta p}{p_0} = -\gamma \frac{\Delta V}{V} = -\gamma \frac{Ax}{V} \quad [23]$$

De massa m ($A \cdot L_{\text{eff}} \cdot \rho_{\text{lucht}}$) wordt verplaatst door de verandering in druk tussen de boven- en de onderzijde van de hals, met een nettokracht $\Delta p \cdot A$. Newtons tweede wet geeft voor de versnelling a :

$$F = ma, \text{ of} \quad [24.1]$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{F}{m}. \quad [24.2]$$

Wanneer wordt ingevuld $F = \Delta p \cdot A$ en $m = A \cdot L_{\text{eff}} \cdot \rho_{\text{lucht}}$, wordt

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{\Delta p \cdot A}{A \cdot L_{\text{eff}} \cdot \rho_{\text{lucht}}} = -\gamma \frac{Ap_0}{\rho_{\text{lucht}} V L_{\text{eff}}} x \quad [24.3]$$

verkregen⁽¹³⁾. De kracht is dus evenredig met de verplaatsing. Dit is de vereiste voor een enkelvoudige harmonische oscillator⁽¹⁴⁾ (een massa-veersysteem, zie figuur 14). Voor een helmholtzresonator geldt:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma A p_0}{\rho_{\text{lucht}} V L_{\text{eff}}}} \quad [25]$$

De geluidssnelheid in lucht c wordt bepaald door (bij standaarddruk p_0 en standaardtemperatuur):^[28]

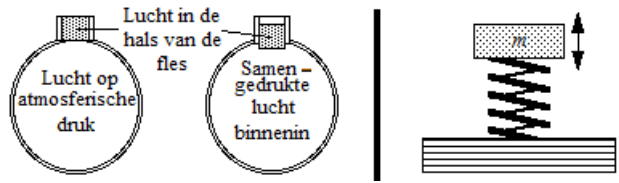
$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_{\text{lucht}}}}. \quad [26]$$

De frequentie wordt dan:

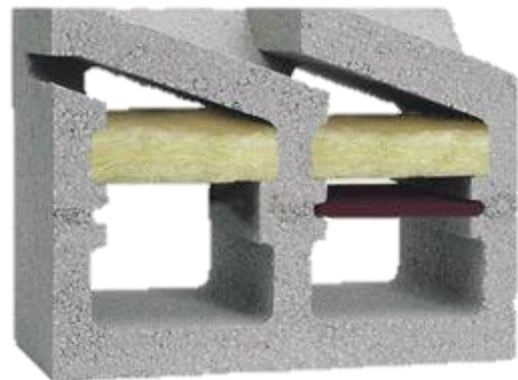
$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V L_{\text{eff}}}} \quad [27]$$

Wanneer de grote ruimte van de resonator een volume $V = 1 \text{ L} = 0,001 \text{ m}^3$ heeft, met een doorsnedeoppervlak van de hals van $A = 3 \text{ cm}^2 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ en een effectieve halslengte van $L_{\text{eff}} = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$, is de frequentie $f \approx 130 \text{ Hz}$. De golflengte is dan ongeveer 2,6 m, wat veel groter is dan de resonator. Dus de aanname dat de drukvariaties in het volume klein zijn wanneer de resonator kleiner is dan de golflengte klopt.

Doordat de lucht in de hals opwarmt, raakt de geluidsgolf een beetje energie kwijt. Daarnaast wordt de golf als het ware opgesloten in de resonator totdat hij uitdooft. Bij een groot oppervlak met helmholtzresonatoren is het effect hiervan dusdanig groot dat het geluid voor een groot deel geabsorbeerd wordt (zie figuur 15).



Figuur 14 Schematische weergave van een helmholtzresonator waarin deze wordt vergeleken met een enkelvoudige harmonische oscillator, oftewel een massa-veersysteem.



Figuur 15 Een deel van een wand-paneel dat gebruikmaakt van het helmholtzresonatorprincipe. Het geluid gaat de opening in en komt via de glaswol terecht in de resonatorruimte.^[29]

⁽¹³⁾ $\Delta p \cdot A / (A \cdot L_{\text{eff}} \cdot \rho_{\text{lucht}}) = -\gamma A p_0 x / \rho_{\text{lucht}} V L_{\text{eff}}$ wordt verkregen door formule [23] om te schrijven naar: $\Delta p = -\gamma A x p_0 / V$.

⁽¹⁴⁾ De enkelvoudige harmonische oscillator heeft als formule $f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$, met k een evenredigheidsfactor (in dit geval de veerconstante) en m de massa.^[27]

3 Testopstellingen

Om de absorptie van een persoon te bepalen is het nodig om het verschil in de nagalmtijd te berekenen in de situatie dat er personen aanwezig zijn in een ruimte en de situatie dat er geen personen aanwezig zijn. Vervolgens kan bepaald worden wat de absorptie A van een persoon is. Dit is gedaan in de ‘galmkamer’ bij het kantoor in Arnhem (zie hierna en 4.2 – *Nagalmtijdmeting in Arnhem*) en in een echte galmkamer bij de hogeschool Windesheim (zie 4.5 – *Nagalmtijdmetingen in de galmkamer van hogeschool Windesheim*). Daarnaast is de nagalmtijd in enkele horecagelegenheden bepaald om vervolgens met de gemeten absorptiewaardes voor een persoon te rekenen en op deze manier een theoretische benadering van de werkelijkheid te simuleren. Ook zijn er enkele modellen gemaakt waar in berekend kan worden wat de nieuwe nagalmtijd van een ruimte wordt wanneer er bijvoorbeeld 150 personen aanwezig zijn (zie 4.6 – *Nagalmtijdberekening EASE*).

3.1 Gemeten nagalmtijd in een ‘galmkamer’

Op de locatie van Het GeluidBuro in Arnhem is een soort galmkamer aanwezig (zie figuur 16). Een galmkamer is een ruimte met uitsluitend kale, zo min mogelijk absorberende wanden, vloer en plafond. Deze staan vaak in verschillende hoeken ten opzichte van elkaar om eenvoudige staande golven te voorkomen. In een ideale galmkamer heerst een ‘ideaal galmend geluidsveld’. Dit wil zeggen dat de geluidsgolven in alle richtingen en op alle posities even sterk zijn. Een galmkamer kan gebruikt worden om de geluidsabsorptie van een materiaal te bepalen: hiervoor wordt de nagalmtijd in de kamer bepaald met en zonder het voorwerp. Door de absorptie van het voorwerp wordt de nagalmtijd korter.

De galmkamer in Arnhem is geen ideale galmkamer, maar heeft dusdanig harde (slecht geluidsabsorberende) oppervlakken dat een echte galmkamer benaderd wordt. In deze galmkamer zijn vijftien metingen verricht waarbij de bron (het alarmpistool) zich midden in de ruimte bevond en de aanwezige personen zo diffuus mogelijk verspreid waren. Vervolgens is er op 1, 3 en 5 m afstand van de bron gemeten en bij elke meetsituatie waren er 1, 3, 5, 7 of 9 personen aanwezig in de ruimte. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in tabel 4 bij hoofdstuk 4.2 – *Nagalmtijdmetingen in Arnhem*.

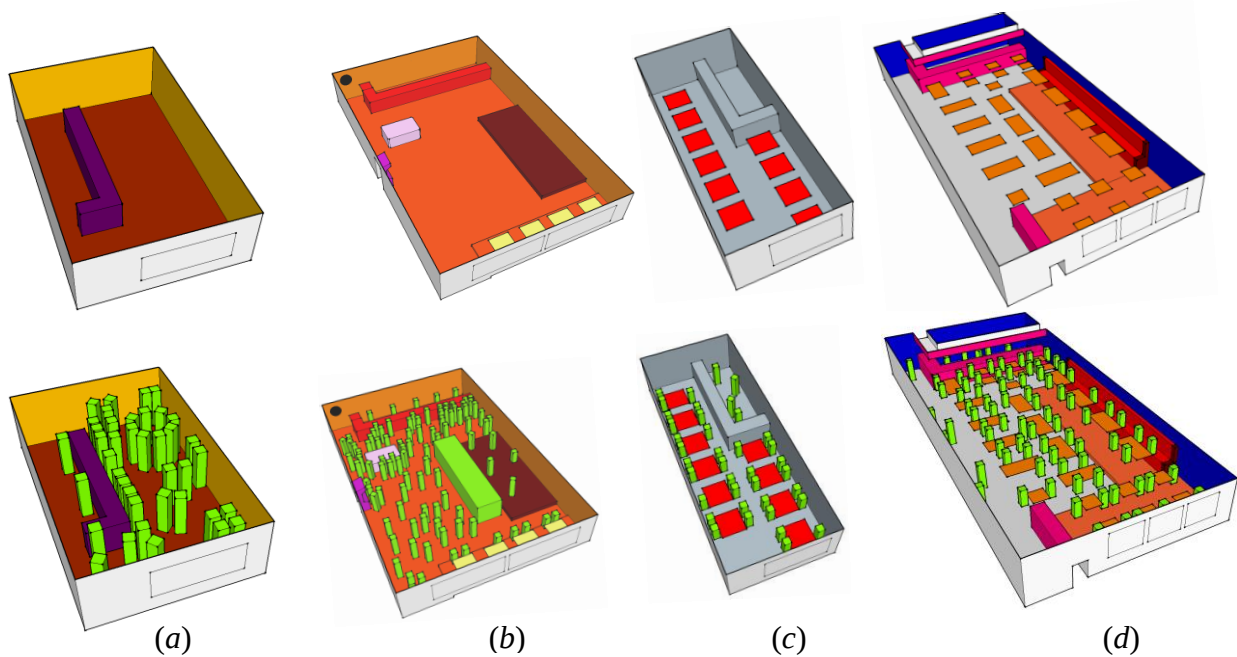


Figuur 16 De ‘galmkamer’ in Arnhem. Deze ruimte is een benadering van een echte galmkamer.

3.2 Modellen van horecagelegenheden

Met behulp van computermodellen is het mogelijk om realistische situaties te simuleren. Door een model te maken in Google SketchUp en deze te importeren in het akoestische rekenprogramma EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) kan aan elk oppervlak een absorptiewaarde worden gegeven.^{[30][31]} Wanneer twee dezelfde modellen worden gemaakt, waarvan er een zonder personen en een met personen, kan met EASE het verschil in nagalmtijd bepaald worden.

Er zijn verschillende horecagelegenheden gesimuleerd: een grote en een kleine bar en een groot en een klein restaurant. Deze modellen zijn weergegeven in figuur 17.



Figuur 17 De computermodellen, waarbij het bovenste model steeds zonder en het onderste met personen is, met in (a) een kleine bar, in (b) een grote bar met pooltafel en twee verhogingen, in (c) een klein restaurant met een bar en een tiental vierkante tafels en open keuken en in (d) een groot restaurant met een door de bar afgescheiden keuken, een welkomstbalie, een verhoging en diverse maten tafels.

Voor de simulatie van personen wordt gebruikgemaakt van een rechthoekige vorm welke de absorptiewaardes van een persoon krijgt. Dit zijn de absorptiewaardes die met de galmkamer van de hogeschool Windesheim zijn verkregen. In figuur 17.b stelt de grote balk een groep mensen voor. Wanneer personen dichter bijeengepakt zijn, zal geluid anders geabsorbeerd worden dan wanneer hetzelfde aantal personen verspreid over de ruimte is.^[32] De tafels in de restaurants en bars hebben een hoogte van 0,70 m (de gemiddelde tafelhoogte), staande personen hebben een hoogte van 1,7 m, en zittende personen hebben een hoogte van 1,20 m.^[33]

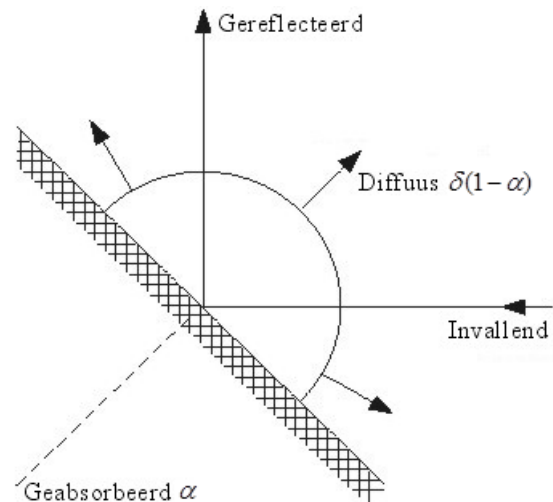
3.2.1 EASE, rekenen met een stralenmodel

Nadat het model ge-3D-tekend is in een CAD-programma (*computer-aided design*, 3D-tekenprogramma) zoals Google SketchUp, kan het geopend worden in een rekenprogramma zoals EASE. Dit computerprogramma kan met behulp van akoestische rekenmethodes berekenen wat de nagalmtijd wordt wanneer er een bepaalde hoeveelheid absorptiemateriaal wordt toegevoegd. Het is mogelijk om in EASE luidsprekers in de ruimte op te hangen. EASE bevat een interne bibliotheek met allerlei vormen, maten en merken luidsprekers met hun bijbehorende specificaties. Vervolgens kan er door de luidsprekers een puls worden gezonden waarna met behulp van het stralenmodel berekend kan worden wat de nagalmtijd wordt.

In een stralenmodel wordt het geluidveld van de bron beschouwd als een aantal lijnvormige ‘stralen’. Die stralen zijn oneindig smalle geluidbundels met vlakkegolfeigenschappen. Bij elke reflectie aan een grensvlak (bijvoorbeeld een muur, persoon of tafel) verliest de straal een fractie α van zijn energie door absorptie. Daarnaast wordt een deel $\delta(1-\alpha)$ op een vrijwel

diffuse manier spiegelend gereflecteerd. De factor δ is de diffusiecoëfficiënt. Die bepaald in welke mate een geluidgolf verstrooid wanneer deze weerkaatst tegen een object. De absorptiecoëfficiënt en de diffusiecoëfficiënt zijn in het model handmatig in te voeren per materiaal. In figuur 18 is schematisch het verloop van een straal weergegeven.

In het computermodel wordt de microfoon voorgesteld als een bol met een eindige diameter. De reden hiervoor is dat de geluidbundel als een oneindig smalle straal wordt voorgesteld: wanneer voor de microfoon een puntbron wordt gekozen, is de waarschijnlijkheid dat de straal de microfoon raakt oneindig klein.



Figuur 18 Een schematische weergave van de reflectie van een 'straal' in een akoestische stralenmodel. Er wordt een deel geabsorbeerd, verstrooid en gereflecteerd. De gereflecteerde straal botst vervolgens tegen een volgend object en reflecteert weer waar hetzelfde proces opnieuw plaatsvindt.

3.3 Nagalmtijdmetingen in horecagelegenheden

In diverse horecaruimtes is de nagalmtijd gemeten. Met behulp van Sabines formule [5] is het mogelijk om een grove en theoretische benadering te geven van de nagalmtijd wanneer er personen aanwezig zijn in de ruimte.

Voor de metingen in de horecagelegenheden zijn er op diverse plaatsen in de horecaruimte bronposities gekozen (waar het alarmpistool afgeschoten wordt) en op diverse plaatsen microfoonposities (waar met de geluidmeter de nagalmtijd gemeten wordt). Hierbij is de afstand tussen de bron en de microfoon dusdanig gekozen dat deze groter is dan de minimale afstand $d_{\min}$ om zo te voorkomen dat het inkomende geluid gedomineerd wordt door direct geluid. De minimale afstand is gedefinieerd als^[34]

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{c\hat{T}}}, \quad [28]$$

met:

$d_{\min}$	de minimale afstand	[m]
V	het volume van de ruimte	[m ³]
c	de geluidsnelheid	[m/s]
$\hat{T}$	de geschatte of verwachte nagalmtijd	[s]

Deze formule wordt slechts gebruikt als vuistregel omdat voor het berekenen van de minimale afstand het nodig is om de nagalmtijd te schatten.

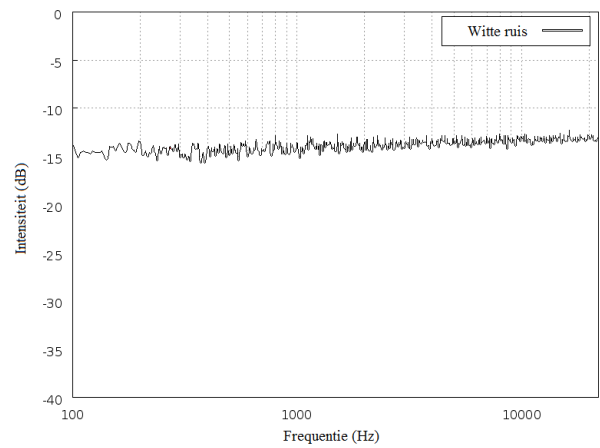
3.4 Nagalmtijdmetingen in een galmkamer

Zoals in hoofdstuk 2.4.4 – *Absorptie door personen* al bepaald was, absorbeert de huid van mensen slecht geluid. Hetgeen aan mensen wat goed geluid absorbeert is de kleding. Dit is verder onderzocht in de galmkamer van de hogeschool Windesheim in Zwolle. In deze galmkamer zijn diverse testen gedaan: de nulmeting van de lege ruimte, een meting waar de kleding van 30 personen dicht bij elkaar hing (als het ware een grote groep opeengepakte mensen), een meting waarbij de kleding van 30 personen diffuus verspreid was over de ruimte, en een meting waarbij kleding van 15 personen diffuus over de ruimte verdeeld was. Voor de kledingsetjes is gebruikgemaakt van gemiddelde kleding die personen in een restaurant of bar aan zouden kunnen hebben: T-shirts, truien, vesten, spijkerbroeken, rokjes en dergelijke kledingstukken. De galmkamer heeft een volume van 163 m^3 en er staan twee bolbronnen (zie figuur 5). Bij elke bronpositie worden 8 microfoonposities genomen. Dit staat dus gelijk aan 16 metingen per serie.



Figuur 19 Een collage van foto's van de vier gedane metingen, met linksboven: nulmeting; rechtsboven: 30 stuks kleding opeengepakt; linksonder: 30 stuks kleding verspreidt; rechtsonder: 15 stuks kleding verspreidt over de ruimte.

Voor de nagalmmetingen wordt witte ruis gebruikt. Witte ruis is een ruissignaal waarvoor geldt dat de gemiddelde amplitude in het frequentiespectrum voor iedere frequentie gelijk is (zie figuur 20).



Figuur 20 *Het signaal van 'witte ruis'.*^[35]

4 Meetresultaten

Voor het onderzoek zijn op meerdere locaties metingen gedaan: in de ‘galmkamer’ in Arnhem (zie: 3.1 – *Gemeten nagalmtijd in een ‘galmkamer’*), in diverse horecagelegenheden (zie: 1.2.1 – *De horecametingen*), en in het laboratorium van de hogeschool Windesheim in Zwolle. De resultaten die verkregen zijn bij de hogeschool zijn ingevoerd in de modellen (zie: 3.2 – *Modellen van horecagelegenheden*) en met behulp van de modellen is de ‘nieuwe’ nagalmtijd berekend (de nagalmtijd wanneer er personen aanwezig zijn).

4.1 Gebruikte apparatuur

Voor de nagalmtijdmetingen in de ruimte in Arnhem en de horecagelegenheden is de in tabel 2 genoemde apparatuur gebruikt.

Tabel 2 *Gebruikte apparatuur bij de meting in Arnhem en bij horeca.*

Functie	Merk	Type	Nauwkeurigheid	Gevoeligheid
Geluidniveaumeter	Brüel & Kjær	2250 Klasse I	-	-
Microfoon ^{[36][37]}	Brüel & Kjær	4189	± 1,5 dB	50 mV/Pa
Start-/alarmpistool	Röhm	RG3	-	-
Digitale afstandmeter ^[38]	Leica	DISTO X310	± 1 mm	-

Voor de metingen in de galmkamer bij de hogeschool Windesheim is gebruikgemaakt van de apparatuur in tabel 3.

Tabel 3 *Gebruikte apparatuur bij de meting in de galmkamer in Zwolle.*

Functie	Merk	Type	Nauwkeurigheid	Gevoeligheid
Geluidniveaumeter	Brüel & Kjær	2260 Klasse I	-	-
Microfoon	Brüel & Kjær	4189	± 1,5 dB	50 mV/Pa
Geluidbron (2×)	Cesva	BP012	-	-
Versterker ^{[39][15]}	Samson	S1000, 500 W	0,04 %	-

4.2 Nagalmtijdmetingen in Arnhem

In Arnhem zijn nagalmtijdmetingen gedaan met het alarmpistool. Door achtereenvolgens met negen, zeven, vijf, drie en één persoon in de ruimte op drie posities de nagalmtijd te meten (op 1, 3 en 5 m afstand van de bron), kan bepaald worden wat de invloed van deze aanwezige personen is op de nagalmtijd. Omdat er rekening gehouden moet worden met de minimale meetafstand $d_{\min}$ (zie formule [28] hiervoor), zijn de metingen op 1 m afstand van de bron niet meegenomen⁽¹⁶⁾. Omdat theoretisch gezien de nagalmtijd in de gehele ruimte hetzelfde is, zijn de gemiddeldes berekend van de meetdata op 3 m en op 5 m afstand. De berekende gegevens zijn weergegeven in tabel 4.

⁽¹⁵⁾ Dit is de totale harmonische vervorming (THD): de verhouding van de som van de vermogens van alle harmonische tonen en het vermogen van de grondtoon: $THD = \frac{\sum \text{totaal vermogen}}{\text{vermogen van de grondtoon}}$.

⁽¹⁶⁾ De geschatte nagalmtijd van de ruimte is $\hat{T} = 1,0$ s. Wanneer dit in formule [5] ingevuld wordt, samen met het volume $V = 152,3 \text{ m}^3$ (zie bijlage 2) en de snelheid van het geluid bij 20 °C, $c = 343 \text{ m/s}$, de minimale meetafstand $d_{\min} = 1,3 \text{ m}$.

Tabel 4 Nagalmtijd T_{20} per octaafband voor 1, 3, 5, 7 en 9 personen.

Aantal personen	Octaafband							
	64 Hz (s)	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1 kHz (s)	2 kHz (s)	4 kHz (s)	8 kHz (s)
1	1,21	1,39	1,28	1,09	1,01	0,88	0,79	0,59
3	1,08	1,35	1,28	1,13	0,96	0,88	0,75	0,60
5	1,01	1,32	1,38	1,11	0,90	0,79	0,68	0,56
7	0,92	1,23	1,20	1,06	0,86	0,79	0,65	0,52
9	1,09	1,21	1,20	1,00	0,85	0,72	0,64	0,48

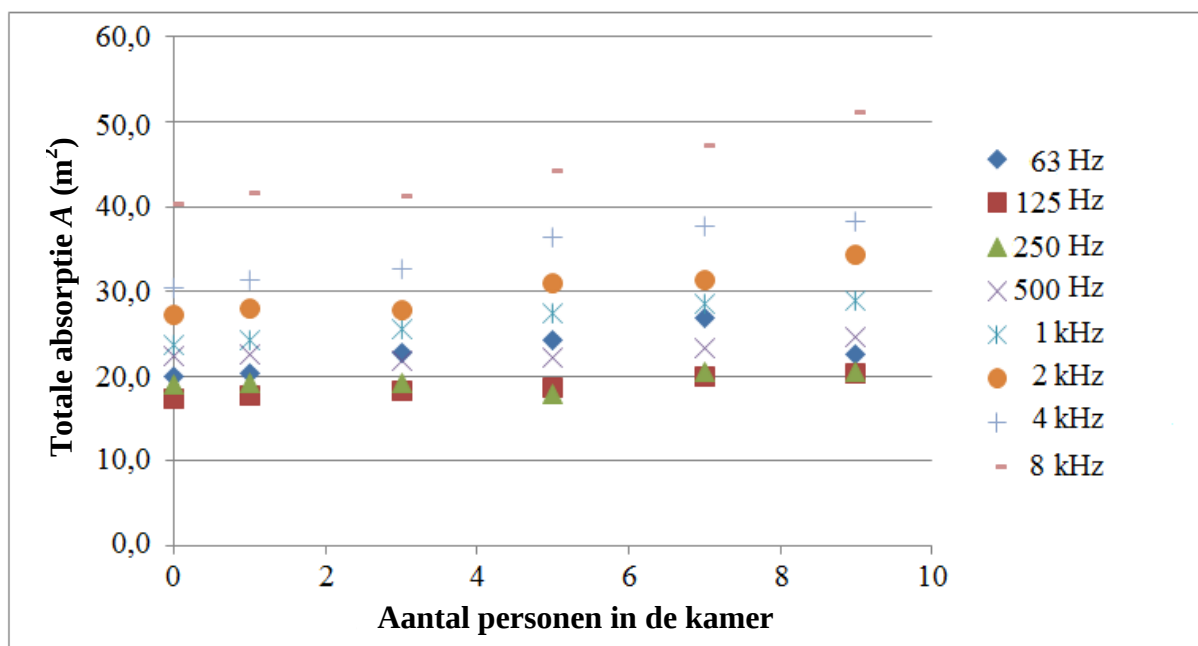
Wat opvalt in deze tabel is dat des te meer personen er aanwezig zijn in de ruimte, des te kleiner de nagalmtijd wordt (wanneer de 64Hz- en de 8kHz-band niet meegenomen worden vanwege de relatief grote meetonnauwkeurigheden door het lage geluidniveau van het pistool bij die frequenties).

Met behulp van de gegevens uit tabel 4, en formule [5] en [6], kan de absorptie van de ruimte en van een persoon bepaald worden. Dit is gedaan in tabel 5 hierna. Hierin is $A_{\text{ruimte},9}$ de absorptie van de ruimte inclusief 9 personen, berekend met formule [6] waarbij het volume gelijk is aan $V = 152,32 \text{ m}^3$ en T de nagalmtijd is bij 9 personen. Hetzelfde geldt voor $A_{\text{ruimte},1}$ bij 1 persoon in de ruimte. $A_{8 \text{ pers}}$ wordt verkregen door $A_{\text{ruimte},1}$ af te trekken van $A_{\text{ruimte},9}$. De absorptie van één persoon, $A_{1 \text{ pers}}$, wordt vervolgens verkregen door $A_{8 \text{ pers}}$ te delen door 8. En A_{ruimte} kan berekend worden met $A_{\text{ruimte}} = A_{\text{ruimte},1} - A_{1 \text{ pers}}$.

Tabel 5 Absorptiewaardes per octaafband van de metingen in Arnhem.

	Octaafband							
	64 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$A_{\text{ruimte},9} (\text{m}^2)$	22,60	20,27	20,52	24,65	28,85	34,30	38,32	51,09
$A_{\text{ruimte},1} (\text{m}^2)$	20,27	17,71	19,23	24,60	24,28	28,03	31,24	41,57
$A_{8 \text{ pers}} (\text{m}^2)$	2,34	2,56	1,29	2,04	4,57	6,27	7,08	9,53
$A_{1 \text{ pers}} (\text{m}^2)$	0,29	0,32	0,16	0,26	0,57	0,78	0,88	1,19
$A_{\text{ruimte}} (\text{m}^2)$	19,98	17,39	19,07	22,35	23,71	27,24	30,36	40,38

Wat opvalt in tabel 5 is dat in de hogere octaafbanden (vanaf 1 kHz) het equivalente absorptieoppervlak groter is. Zowel van de ruimte als van de absorptie van één persoon. Een persoon absorbeert hogere frequenties dus goed. In figuur 21 is een grafiek weergegeven die dit illustreert. In deze figuur is de absorptie van de ruimte plus die van het aantal aanwezige personen uitgezet tegenover het aantal personen in de ruimte. In de grafiek is ook te zien dat metingen van de 63Hz- en de 8kHz-octaafband niet realistisch zijn. Zo zouden de 63Hz-meetpunten onder de 125Hz-metingen moeten liggen en zou de 8kHz-meting dicht bij de 4kHz-lijn moeten liggen.



Figuur 21 De totale absorptie (persoon plus ruimte) uitgezet tegenover het aantal in de ruimte aanwezige personen. De data is weergegeven in tabel 9 in bijlage 3.

4.3 Nagalmtijdmetingen bij horeca

Naast de metingen in Arnhem zijn er ook bij diverse horecabedrijven nagalmmetingen gedaan. Door de resultaten van de metingen in Arnhem te gebruiken bij deze metingen, kan er een grove voorspelling gedaan worden qua “nieuwe” nagalmtijd (wanneer er bijvoorbeeld 150 personen aanwezig zijn).

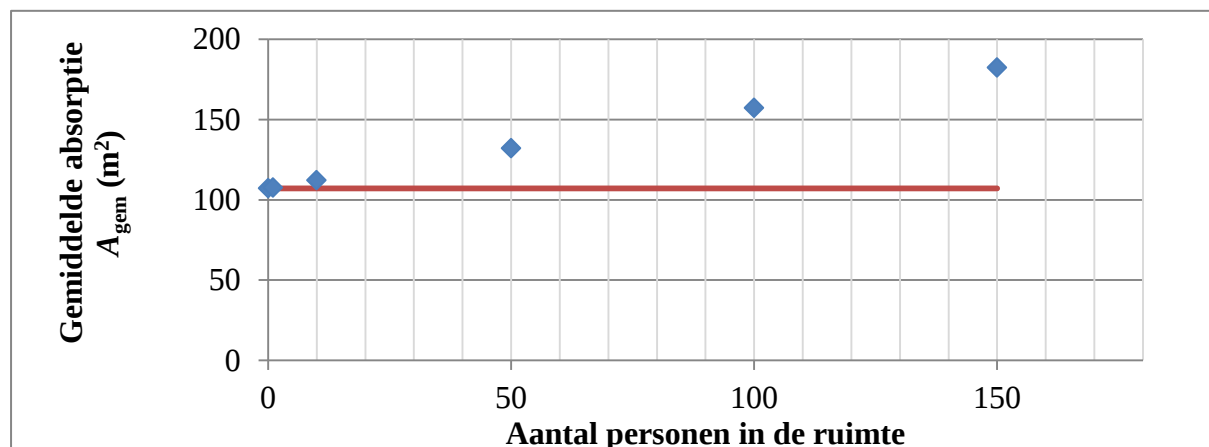
4.3.1 Horecameting bij restaurant Bird, Rotterdam

Restaurant Bird leverde een nieuwe zaal waar feesten gegeven worden en waar bands of dj's op kunnen treden. Bij de nagalmmeting zijn drie bronposities gekozen en ten opzichte van de bron is op 3 en op 6 m afstand gemeten. In tabel 10 in bijlage 4 zijn de diverse metingen weergegeven inclusief de absorptiewaardes per octaafband van de ruimte plus twee personen. In tabel 6 hierna is de gemiddelde nagalmtijd van alle meetposities per octaafband weergegeven evenals de absorptie van 150 personen en de “nieuwe” nagalmtijd ten gevolge van die hoeveelheid aanwezige personen.

Tabel 6 Absorptiewaardes per octaafband van metingen bij Bird.⁽¹⁷⁾

	Octaafband							
	64 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
T_{gem} (s)	1,14	1,05	0,96	0,71	0,50	0,43	0,41	0,36
$A_{\text{ruimte, gem}}$ (m ²)	54,36	60,19	65,22	87,79	124,15	143,24	149,94	171,93
$A_{\text{ruimte, 150 pers}}$ (m ²)	98,14	61,56	68,24	126,13	209,84	260,84	282,65	350,53
T_{nieuw} (s)	0,64	1,01	0,91	0,50	0,30	0,24	0,22	0,18
$A_{\text{ruimte, 130 pers}}$ (m ²)	92,31	61,37	67,84	121,01	198,42	245,16	264,95	326,72
T'_{nieuw} (s)	0,68	1,02	0,92	0,52	0,31	0,25	0,24	0,19

In tabel 6 is T_{gem} de gemiddelde nagalmtijd van alle meetposities per octaafband. $A_{\text{ruimte, gem}}$ is de gemiddelde absorptie van alle meetposities per octaafband, $A_{\text{ruimte, 150 pers}}$ is de absorptie van 150 personen (150 maal de waarde zoals die verkregen is bij de metingen in Arnhem) plus de absorptie van de ruimte. De “nieuwe” nagalmtijd T_{nieuw} is vervolgens berekend met behulp van formule [6], waarbij het volume gelijk is aan $V = 387,41 \text{ m}^3$.⁽¹⁸⁾ Doordat personen hoge frequenties meer absorberen dan lage frequenties, is het verschil in nagalmtijd veel groter voor de hoge octaafbanden (zie 4.5 – Nagalmtijdmetingen in de galmkamer van hogeschool Windesheim). In figuur 22 is de toename in absorberend oppervlak te zien wanneer er meer personen in de ruimte aanwezig zouden zijn.



Figuur 22 De gemiddelde absorptie uitgezet tegenover het aantal in de ruimte aanwezige personen. De rode lijn het de absorptie van de lege ruimte weer.

⁽¹⁷⁾ Doordat deze bar overeenkomsten heeft met het model van de grote bar, is er ook een berekening gedaan met 130 personen. Deze berekening en de uitkomsten van het model worden vergeleken in 5 – Conclusie.

⁽¹⁸⁾ Zie bijlage 2.

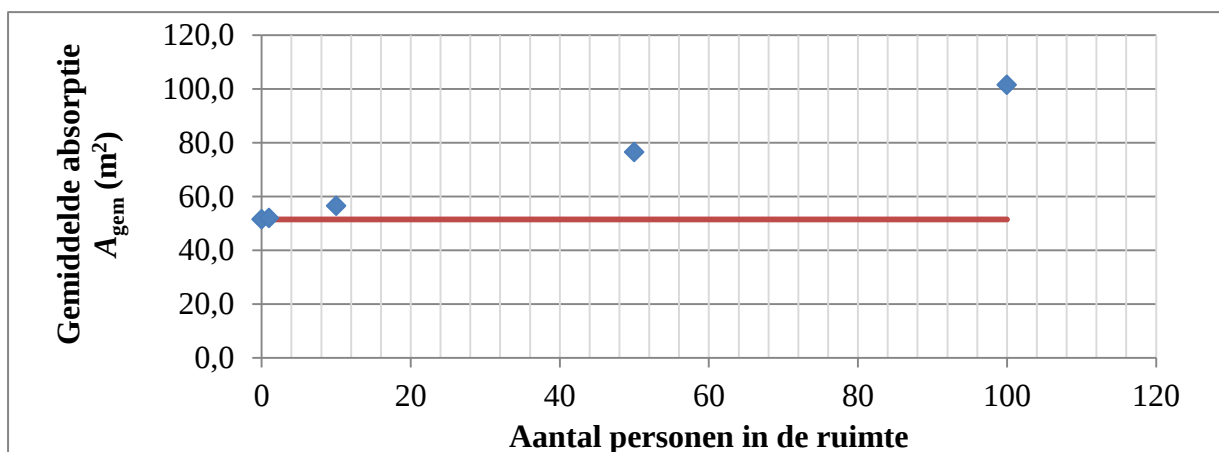
4.3.2 Horecameting bij Hospitalbar Casa Rosso, Amsterdam

Hospitalbar Casa Rosso is een erotische bar met een ziekenhuisthema. Voor de nagalm-tijdmeting zijn twee bronposities gekozen en ten opzichte van de bron is op 3 en op 6 m afstand de nagalmtijd gemeten. In tabel 11 in bijlage 4 zijn de diverse metingen weergegeven inclusief de absorptiewaardes (per octaafband) van de ruimte met daarin twee personen. In tabel 7 is de gemiddelde nagalmtijd van alle meetposities (per octaafband) weergegeven samen met de absorptie van 100 personen⁽¹⁹⁾ en de nagalmtijd als gevolg van deze personen.

Tabel 7 Absorptiewaardes per octaafband van metingen bij Hospitalbar Casa Rosso.⁽²⁰⁾

	Octaafband							
	64 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
T_{gem} (s)	0,46	0,45	0,42	0,49	0,54	0,53	0,51	0,46
$A_{\text{ruimte, gem}}$ (m ²)	66,70	54,22	58,01	48,84	44,32	44,22	45,54	50,01
$A_{\text{ruimte, 100 pers}}$ (m ²)	95,89	55,13	60,02	74,40	101,46	122,62	134,01	169,08
T_{nieuw} (s)	0,25	0,44	0,40	0,33	0,24	0,20	0,18	0,14
$A_{\text{ruimte, 42 pers}}$ (m ²)	78,96	54,61	58,86	59,58	68,32	77,15	82,70	100,02
T'_{nieuw} (s)	0,31	0,45	0,41	0,41	0,36	0,31	0,29	0,24

In tabel 7 is de “nieuwe” nagalmtijd T_{nieuw} berekend met behulp van formule [6], waarbij het volume gelijk is aan $V = 150,46 \text{ m}^3$.⁽²¹⁾ Doordat personen hoge frequenties meer absorberen dan lage frequenties, is het verschil in nagalmtijd veel groter voor de hoge octaafbanden. Uit tabel 7 blijkt ook weer dat de meting van de 63Hz-octaafband erg onnauwkeurig is. In figuur



Figuur 23 De gemiddelde absorptie uitgezet tegenover het aantal in de ruimte aanwezige personen. De rode lijn is de absorptie van de lege ruimte.

⁽¹⁹⁾ Voor deze ruimte is gekozen om te rekenen met een aantal van 100 personen omdat dit qua grootte van de desbetreffende ruimte realistischer is.

⁽²⁰⁾ Doordat deze bar overeenkomsten heeft met het model van de kleine bar, is er ook een berekening gedaan met 42 personen. Deze berekening en de uitkomsten van het model worden vergeleken in 5 – Conclusie.

⁽²¹⁾ Zie bijlage 2.

23 is de toename in absorberend oppervlak te zien wanneer er meer personen in de ruimte aanwezig zouden zijn.

4.3.3 Horecameting bij restaurant Amstelhaven, Amsterdam

Restaurant Amstelhaven is een restaurant gelegen aan de Amstel in Amsterdam. Het is een restaurant met een aangebouwde serre. Voor de nagalmmeting zijn twee bronposities gekozen en bij beide bronposities zijn twee meetposities gekozen, op ongeveer 7 en 10 m afstand. In tabel 12 in bijlage 6 zijn de verschillende metingen weergegeven met de bijbehorende absorptiewaardes van de ruimte waarin twee personen aanwezig waren. In tabel 8 is de gemiddelde nagalmtijd van alle meetposities (per octaafband) weergegeven evenals de absorptie van 100 personen en de nagalmtijd ten gevolge van deze personen.

Tabel 8 Absorptiewaardes per octaafband van metingen bij restaurant Amstelhaven.⁽²²⁾

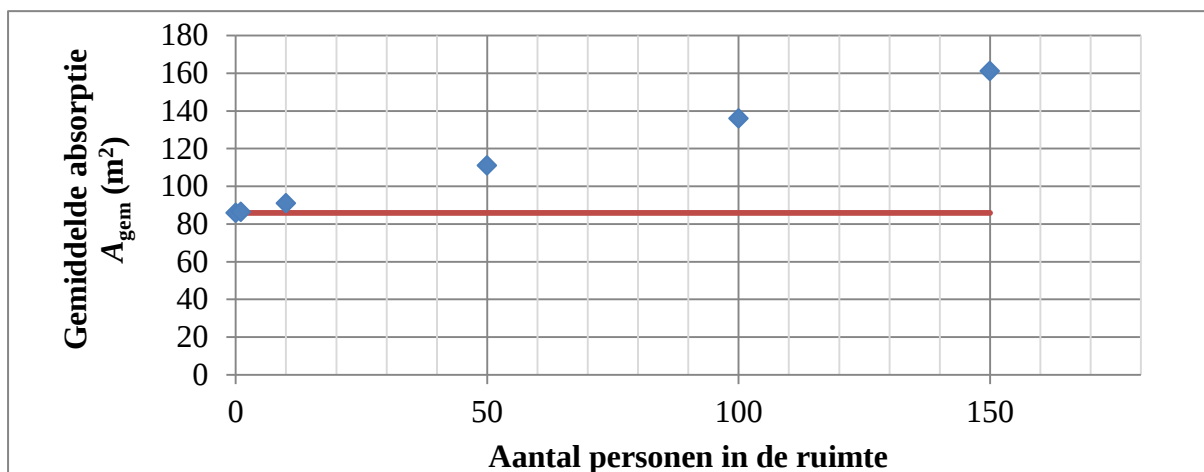
	Octaafband							
	64 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
T_{gem} (s)	0,43	0,59	0,65	0,74	0,82	0,83	0,79	0,66
$A_{\text{ruimte, gem}}$ (m ²)	132,11	99,00	88,33	76,96	68,46	67,64	70,94	83,67
$A_{\text{ruimte, 150 pers}}$ (m ²)	175,89	100,37	91,35	115,29	154,16	185,24	203,65	262,28
T_{nieuw} (s)	0,25	0,44	0,40	0,33	0,24	0,20	0,18	0,14
$A_{\text{ruimte, 90 pers}}$ (m ²)	175,89	142,78	132,12	120,74	112,24	111,42	114,72	127,45
T'_{nieuw} (s)	0,32	0,40	0,43	0,47	0,51	0,51	0,50	0,45

In tabel 8 is de “nieuwe” nagalmtijd T_{nieuw} berekend met behulp van formule [6], waarbij het volume gelijk is aan $V = 354,39 \text{ m}^3$.⁽²³⁾ Uit de tabel blijkt ook weer dat de meting van de 63Hz-octaafband erg onnauwkeurig is. Uit de tabel blijkt ook weer dat personen geluid met hogere frequenties beter absorberen dan geluid met lage frequenties. Dit is ook te zien aan de afname van de nagalmtijd.

In figuur 24 hierna is de toename in absorberend oppervlak te zien wanneer er meer personen in de ruimte aanwezig zouden zijn.

⁽²²⁾ Doordat dit restaurant overeenkomsten heeft met het model van het grote restaurant, is er ook een berekening gedaan met 90 personen. Deze berekening en de uitkomsten van het model worden vergeleken in 5 – Conclusie.

⁽²³⁾ Zie bijlage 2.



Figuur 24 De gemiddelde absorptie uitgezet tegenover het aantal in de ruimte aanwezige personen. De rode lijn is de absorptie van de lege ruimte.

4.4 Grove benadering van de realiteit

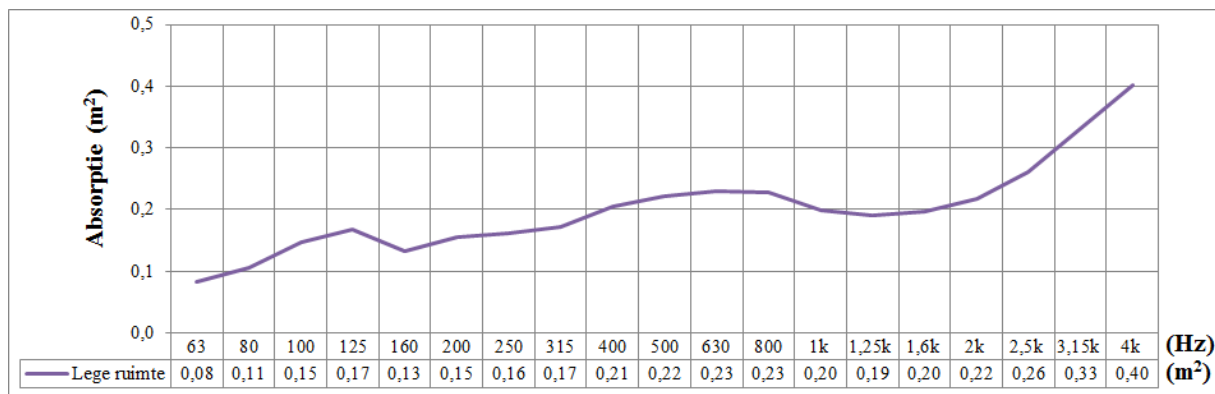
De in de voorgaande paragrafen genoemde metingen kunnen slechts als grove benadering gezien worden. Bij de simpele berekeningen zijn enkele aannames gedaan. Zo is er van uitgegaan dat een grote groep mensen op dezelfde manier geluid absorbeert als één of twee personen, terwijl geluidabsorptie zich anders gedraagt bij een groep personen die dicht op elkaar staan. Vervolgens is er van uitgegaan dat de formule van Sabine (formule [6]) geldt voor alle gemeten ruimtes. De formule van Sabine is in principe alleen geschikt voor ruimtes met uniform absorberende oppervlaktes. Dit komt in de praktijk eigenlijk niet voor. Ramen, deuren, lampen, en andere voorwerpen aan de muren of het plafond zorgen er al voor dat de absorptie niet meer uniform is.^[40] Hierdoor kunnen bovenstaande berekeningen slechts beschouwd worden als een benadering. Met het computermodel in EASE is het echter wel mogelijk om een nauwkeurige voorspelling te doen van de nagalmtijd wanneer er veel personen aanwezig zijn in een ruimte.

4.5 Nagalmtijdmetingen in de galmkamer van hogeschool Windesheim

In de galmkamer van de hogeschool Windesheim zijn vier series van zestien metingen gedaan. Als eerste is een nulmeting gedaan waarbij de galmkamer leeg was. Vervolgens is er kleding dicht bij elkaar opgehangen om een groepje van dertig mensen te simuleren (aangezien mensen zelf niet absorberen, maar hun kleding wel; zie 2.4.4 – *Absorptie door personen*). Daarna zijn deze dertig kledingsets verdeeld over de ruimte om de standaard verdeling van personen in een restaurant of bar na te bootsen. Op het laatst zijn van deze dertig setjes er vijftien weggehaald om een kleiner aantal personen te simuleren. De galmkamer heeft een volume van 163 m^3 , de relatieve luchtvochtigheid voor elke meting was 57 %, de temperatuur $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$ en het absorptieoppervlak per persoon was gelijk gesteld aan $1,2 \text{ m}^2$ ($\ell \cdot b \cdot 2 = 1,7 \cdot 0,35 \cdot 2$). Een combinatie van de drie metingen in één figuur is weergegeven in bijlage 7, figuur 33.

4.5.1 Nagalmtijdmetering lege ruimte

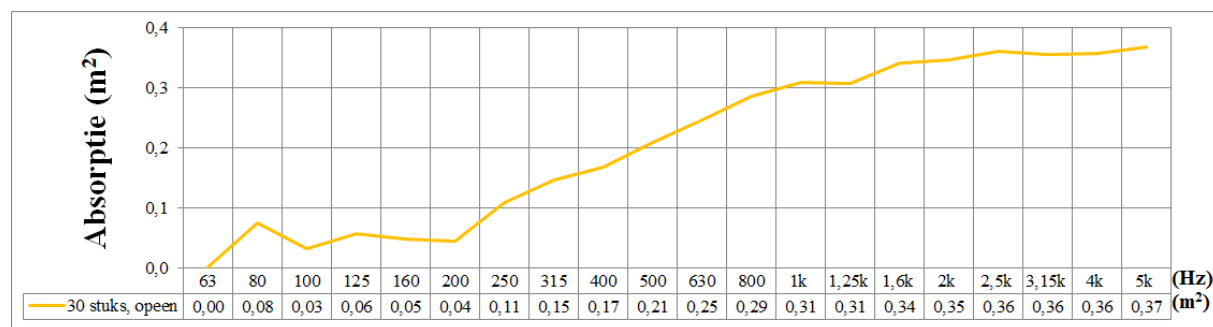
Als nulmeting is de nagalmkamer gemeten terwijl deze leeg was (wel met bolbronnen en microfoon aangezien die tijdens de meetseries ook in de ruimte staan, zie figuur 19 linksboven). Voor deze meting is een serie van zestien microfoonposities gekozen, acht voor elke bronpositie. De resultaten van de meting zijn weergegeven in figuur 25.⁽²⁴⁾ Deze waarden moeten van de metingen met kleding afgetrokken worden.



Figuur 25 Meting van de lege galmkamer. Deze waarden moeten van de andere metingen afgetrokken worden. De meetdata is per tertsbands weergegeven.

4.5.2 Nagalmtijdmetering 30 stuks kleding, opeengepakt

Om de absorptie van een groep personen te bepalen, zijn dertig kledingsetjes opgehangen aan het plafond zodanig dat de broeken net boven de grond hangen (en dus de staande positie van een persoon simuleren, zie figuur 19 rechtsboven). Voor deze meting zijn ook twee bolbronposities gebruikt en bij elke bronpositie acht microfoonposities. De meetwaarden zijn weergegeven in figuur 26, hier zijn de waarden van de lege ruimte al van afgetrokken.

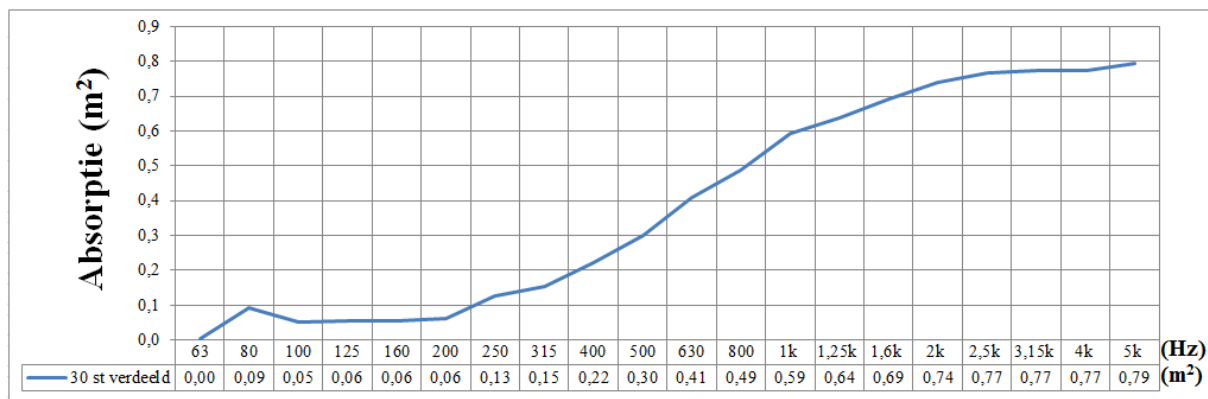


Figuur 26 Meting met 30 kledingsetjes dicht op elkaar in de galmkamer. De waarden van de meting van de lege ruimte is hier al van afgetrokken. De meetdata is per tertsbands weergegeven. Het totale absorptieoppervlak was gelijk aan $A = 30 \cdot 1,2 = 36 \text{ m}^2$.

⁽²⁴⁾ Elke octaafband kan verdeeld worden in 3 tertsbands (ook wel 1/3 octaafbanden genoemd). De waarde van de octaafband is de middelste waarde van de tertsbands (bijvoorbeeld de octaafband 125 Hz in de tertsbands 100, 125 en 160 Hz).

4.5.3 Nagalmtijdmeting 30 stuks kleding, verspreidt over de ruimte

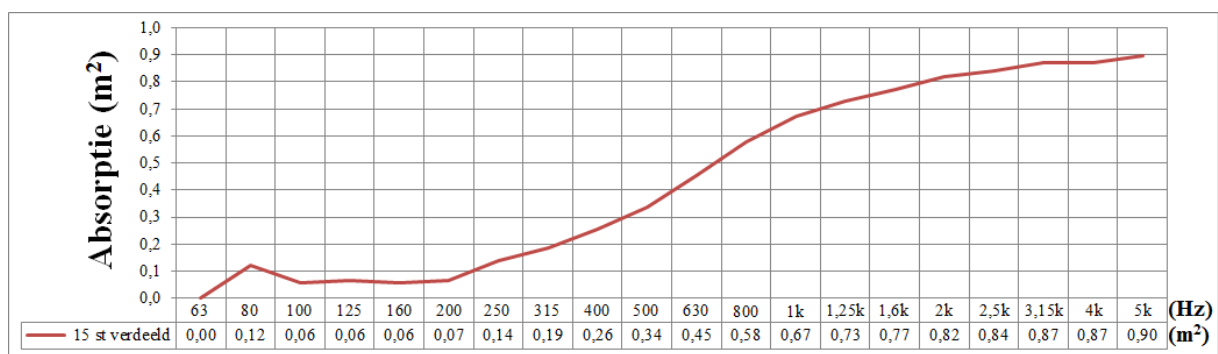
Om de absorptie van mensen verdeeld over een ruimte te bepalen, zijn aan het plafond dertig kledingsetjes opgehangen zodanig dat ze verspreidt over de ruimte zijn en de broeken net boven de grond hangen (en dus de staande positie van een persoon simuleren, zie figuur 19 linksonder). Voor deze meting zijn ook twee bolbronposities gebruikt en bij elke bronpositie acht microfoonposities. De meetwaarden zijn weergegeven in figuur 27, hier zijn de waarden van de lege ruimte al van afgetrokken.



Figuur 27 Meting met 30 kledingsetjes verdeeld in de galmkamer. De waarden van de meting van de lege ruimte is hier al van afgetrokken. De meetdata is per tertsbands weergegeven. Het totale absorptieoppervlak was gelijk aan $A = 30 \cdot 1,2 = 36 \text{ m}^2$.

4.5.4 Nagalmtijdmeting 15 stuks kleding, verspreidt over de ruimte

Om de absorptie van mensen verdeeld over een ruimte te bepalen, zijn aan het plafond vijftien kledingsetjes opgehangen zodanig dat ze verspreid over de ruimte zijn en de broeken net boven de grond hangen (en dus de staande positie van een persoon simuleren, zie figuur 19 rechtsonder). Voor deze meting zijn ook twee bolbronposities gebruikt en bij elke bronpositie acht microfoonposities. Aangezien er minder ‘personen’ aanwezig zijn in de ruimte, wordt er verwacht dat de nagalmtijd langer wordt, daarentegen is er minder absorptieoppervlak aanwezig waardoor deze meting gelijk zou moeten zijn aan de meting waarbij 30 kledingsetjes verdeeld over de ruimte hingen. De meetwaarden zijn weergegeven in figuur 28, hier zijn de waarden van de lege ruimte al van afgetrokken.



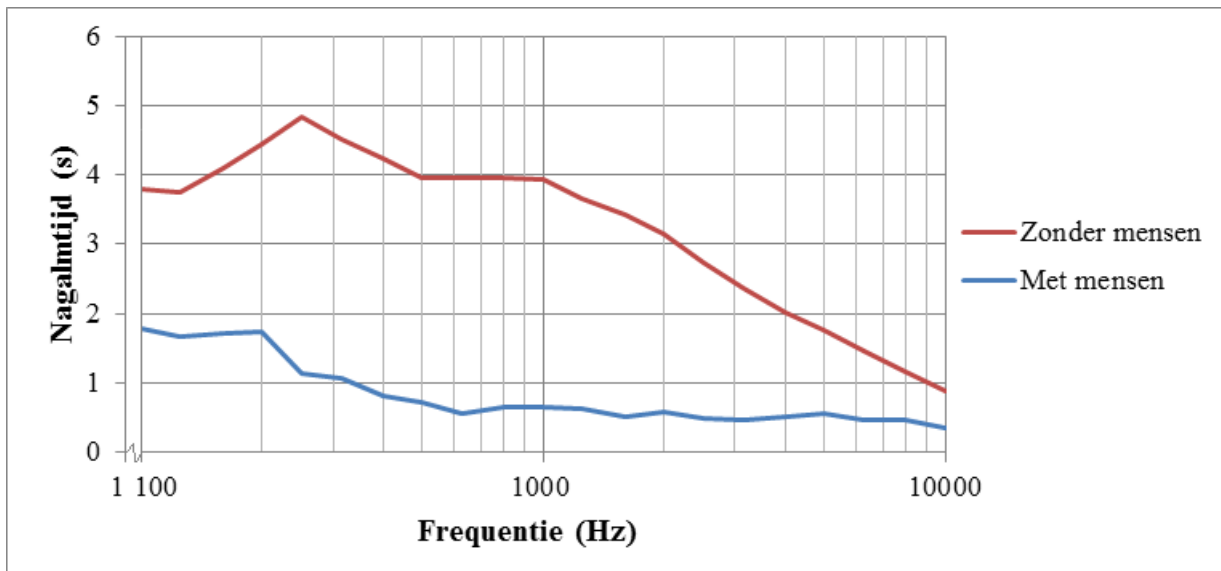
Figuur 28 Meting met 15 kledingsetjes verdeeld in de galmkamer. De waarden van de meting van de lege ruimte is hier al van afgetrokken. De meetdata is per tertsbands weergegeven. Het totale absorptieoppervlak was gelijk aan $A = 15 \cdot 1,2 = 18 \text{ m}^2$.

4.6 Nagalmtijdberekening EASE

Met het akoestische computerrekenprogramma EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) is voor de vier modellen (zie 3.2 – *Modellen van horecagelegenheden*) de nagalmtijd berekend wanneer zij leeg zijn en wanneer er personen aanwezig zijn in de ruimte. In bijlage 8 tot en met 11 zijn de door het model berekende waarden weergegeven evenals een aantal afbeelding van de modellen.

4.6.1 Nagalmtijdberekening kleine bar

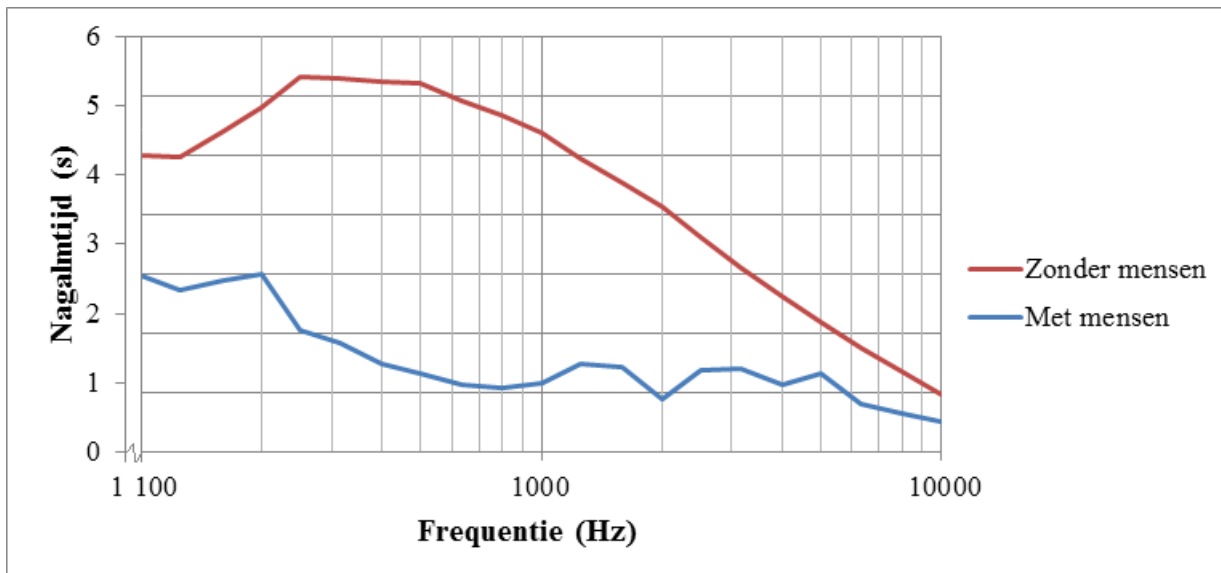
Voor een kleine bar zijn twee situaties gemodelleerd: een lege bar en een bar gevuld met mensen. Deze mensen zijn weergegeven in de vorm van balkjes met de absorptiewaarden zoals die verkregen zijn in 4.5 – *Nagalmtijdmetingen in de galmkamer van hogeschool Windesheim*. In het model zijn twee luidsprekers opgehangen van waaruit de stralen het model in worden gestuurd. Het programma bepaald op elke positie van het model per octaafband de nagalmtijd en middelt deze om per octaafband een nagalmtijd voor het gehele model te verkrijgen. De nagalmtijd die berekend wordt is de T_{30} (zie ook 2.3.1 – *Het meten van de nagalmtijd*). In figuur 29 is de nagalmtijd per frequentie weergegeven voor beide situaties. In bijlage 8, tabel 13 zijn de gegevens van de berekening door het model te zien.



Figuur 29 Nagalmtijd per octaafband voor de situatie waarin de kleine bar leeg is, en wanneer deze vol mensen is.

4.6.2 Nagalmtijdberekening grote bar

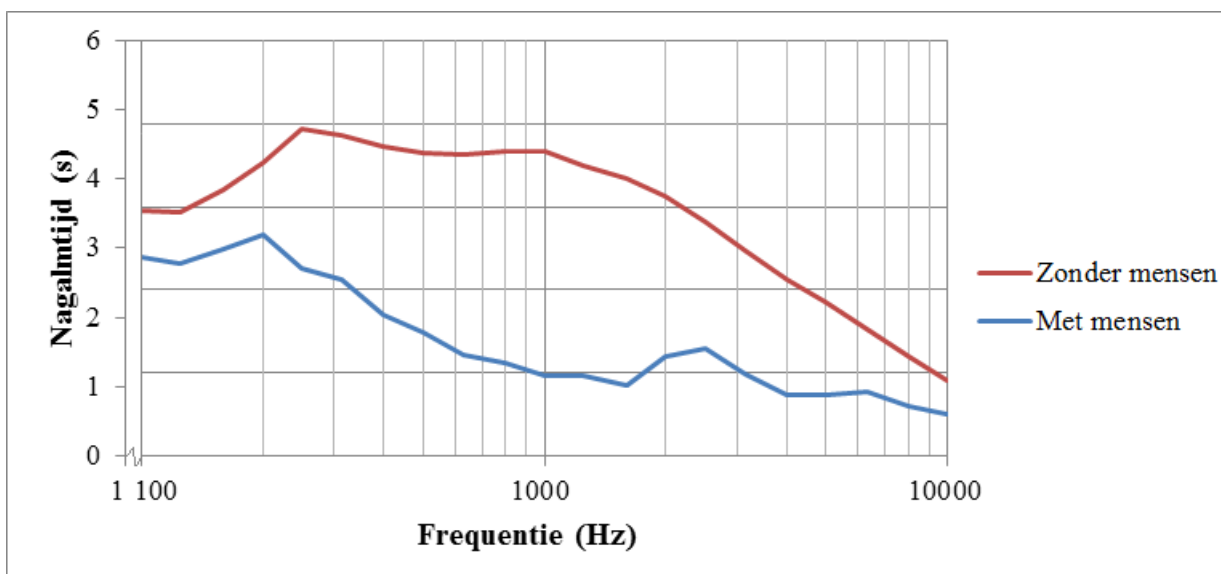
Voor een grote bar zijn eveneens twee situaties gemodelleerd: een lege bar en een bar met mensen. De balkjes zijn weer de absorptiewaardes toegekend die verkregen zijn in het onderzoek in de galmkamer van de hogeschool Windesheim. In het model zijn twee luidsprekers opgehangen die de bron voor de stralen zijn. Vervolgens bepaald het rekenprogramma op elke positie in het model de nagalmtijd per octaafband. Deze wordt vervolgens gemiddeld om voor het gehele model een nagalmtijd per octaafband te verkrijgen. In figuur 30 is de nagalmtijd per frequentie voor beide situaties weergegeven. In bijlage 9, tabel 14 zijn de berekende waardes weergegeven.



Figuur 30 Nagalmtijd per octaafband voor de situatie waarin de grote bar leeg is, en wanneer deze vol mensen is.

4.6.3 Nagalmtijdberekening klein restaurant

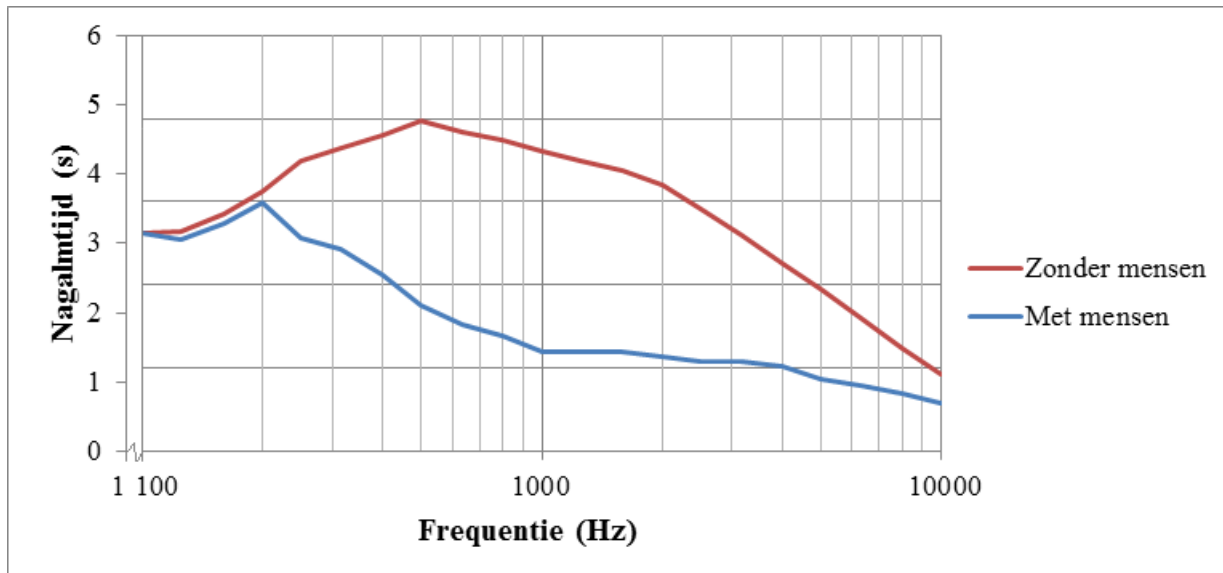
Voor een klein restaurant zijn ook twee situaties berekend: een leeg restaurant en een vol restaurant. Hier hebben eveneens de balkjes de absorptiewaardes die bij de tests in de galmkamer verkregen zijn. In dit model zijn ook twee luidsprekers opgehangen. In figuur 31 is de nagalmtijd voor beide situaties weergegeven, per frequentie. In bijlage 10, tabel 15 zijn de met het model berekende waardes weergegeven.



Figuur 31 Nagalmtijd per octaafband voor de situatie waarin het kleine restaurant leeg is, en wanneer deze vol mensen is.

4.6.4 Nagalmtijdberekening groot restaurant

Voor een groot restaurant zijn ook twee modellen gemaakt: een leeg en een vol met mensen. De balkjes hebben de absorptiewaardes gekregen die bij de metingen in de galmkamer zijn verkregen. In het model zijn eveneens twee luidsprekers opgehangen. In figuur 32 hierna is de nagalmtijd per frequentie voor beide situaties weergegeven. In bijlage 11, tabel 16 zijn de berekende waardes weergegeven.



Figuur 32 Nagalmtijd per octaafband voor de situatie waarin het grote restaurant leeg is, en wanneer deze vol mensen is.

5 Conclusie

Wat in alle tabellen en grafieken opvalt is dat de absorptie van personen een groot verschil maken in de hoeveelheid aanwezige absorptie en zodoende ook in de nagalmtijd. Wanneer gekeken wordt naar de uitkomsten van de metingen en berekeningen van Bird (4.3.1 – *Horecameting bij restaurant Bird, Rotterdam*) is duidelijk te zien dat een groep van 150 personen ongeveer 50 % meer absorptie toe zal voegen aan de ruimte. Voor Hospitalbar Casa Rosso geldt eveneens dat in de 500Hz-octaaftband de absorptie met ongeveer 50 % toeneemt. Dit terwijl er dan slechts 100 personen aanwezig zijn. Voor restaurant Amstelhaven is deze toename in absorptieoppervlak ook ongeveer 150 %. Daarnaast neemt de nagalmtijd aanzienlijk af: bij restaurant Bird is het verschil in nagalmtijd in sommige octaafbanden 0,2 s. Voor Hospitalbar Casa Rosso is dit zelfs 0,3 s. Bij restaurant Amstelhaven ligt het verschil in nagalmtijd tussen de 0,2 en 0,4 s. Hoewel deze berekeningen erg grof zijn (er wordt immers aangenomen dat de absorptietoename telkens constant is, ongeacht bijvoorbeeld de diffusiteit van de aanwezige personen) geven ze toch een duidelijk weer wat de rol van een persoon is qua absorptieoppervlak.

Uit figuur 33 in bijlage 7 wordt duidelijk dat personen die dicht bij elkaar staan minder geluid absorberen dan personen die verdeeld over een ruimte staan. Uit metingen in de galmkamer van de hogeschool Windesheim kwam ook dat 15 verdeelde personen in verhouding evenveel absorptieoppervlak hebben als 30 verdeelde personen. Dit was al verwacht aangezien het totale absorptievlak afneemt en het aantal personen ook; het absorptieoppervlak per persoon blijft dan gelijk. Uit figuur 33 blijkt ook dat de kleding van personen vooral geluid absorbeert in de midden- en hoge frequenties (vanaf ongeveer 250 Hz). Dit is in 2.4.4 – *Absorptie door personen* verklaard en komt door de akoestisch absorberende werking van kleding. De reden dat mensen dicht bij elkaar minder absorberen dan mensen die zich verspreidt over de ruimte bevinden is dat bij de personen die bij elkaar stonden het absorptieoppervlak verkleind. Doordat iedereen daar dicht op elkaar staat en elkaar aanraakt, komt het geluid ten eerste lastiger op plekken waar het anders wel had gekomen, en ten tweede komt het geluid minder absorptieoppervlak tegen.

Ook in de uitkomsten van de modellen van de twee bars en de twee restaurants is te zien dat de nagalmtijd aanzienlijk korter wordt wanneer er personen in de ruimte aanwezig zijn. In tabel 9 hierna zijn deze uitkomsten samengevat.

Tabel 9 Door EASE berekende nagalmtijden van de modellen.

	Nagalmtijd (s)			
	Kleine bar	Grote bar	Klein restaurant	Groot restaurant
Zonder personen	3,2	4,4	2,9	2,9
Met personen	0,8	1,8	1,4	1,6

In het model van de kleine bar waren 42 mensen aanwezig, bij de grote bar 130, bij het kleine restaurant 39 en bij het grote restaurant waren 90 mensen aanwezig.

Tabel 9 laat zien dat de nagalmtijd erg afhankelijk is van de aanwezigheid van personen. De nagalmtijd neemt minimaal 50 % af. Hoewel het model gemodelleerd is als een akoestische harde ruimte, zonder enige vorm van aankleding op tafels na, laat dit duidelijk zien wat de invloed van personen is. Uit de figuren 25 tot 28 is ook weer te zien dat personen vanaf ongeveer 250 Hz gaan absorberen.

Wanneer de modellen met de puur theoretisch berekende waarden vergeleken worden, blijkt dat deze deels overeenkomen. In een grote bar (de ruimte van Bird) neemt de nagalmtijd vanaf de 500Hz-octaaftband met ongeveer 50 % af. Dit komt overeen met de 50%-afname die met de modellen van een groot café bepaald is. Bij de kleine bar (Hospitalbar Casa Rosso) is het verschil tussen de modellen en de berekende waardes groter. Waar in het model de aanwezigheid van personen zorgt voor een nagalmtijdafname van ongeveer 1,5 s, neemt deze in de berekende waardes slechts 0,1 tot 0,2 s af. Dit komt door de onnauwkeurigheid van een nagalmtijdmeting in een kleine ruimte. Het geluid weerkaatst dan dusdanig vaak binnen een korte tijd dat het voor de geluidmeter lastig wordt om de juiste signalen te onderscheiden waardoor er een grotere ruis optreedt. Voor een groot restaurant (Amstelhaven) komen de berekende waardes redelijk overeen met de met het model gegenereerde waardes. In het model neemt de nagalmtijd met ongeveer 50 % af en bij de berekende waardes neemt de nagalmtijd met 30 tot 40 % af.

Uit de vergelijkingen van de uitkomsten van de modellen met de berekende waardes blijkt dat nagalmtijdmetingen in een kleine ruimte relatief onnauwkeurig zijn in vergelijking met metingen in een grote ruimte. De onzekerheden die de modellen met zich mee brengen zijn: de vorm van de ruimte, de gebruikte absorptiecoëfficiënten voor de muren en andere obstakels en de opstelling van de luidsprekers. De verschillen in de nagalmtijden kunnen te verklaren zijn door de afwezigheid van vaste absorptie in de modellen (gordijnen, kussen en dergelijk materialen). De horecagelegenheden waren volledig ingericht waardoor zij meer vaste absorptie bevatten.

Uit het onderzoek wordt duidelijk dat mensen inderdaad een grote invloed hebben op de nagalmtijd in een ruimte. Omdat het geluid minder lang blijft nagalmen in de horecaruimte, kan het maximaal toegestane geluidniveau hoger zijn. Er is echter nog meer onderzoek nodig naar dit onderwerp, waaronder het modelleren van meerdere situaties en het gebruik van andere materialen in de modellen. Ook is er onderzoek nodig naar de bijdrage van de absorptie van personen wanneer er al absorptie in de ruimte aanwezig is (neemt de bijdrage van personen af, of blijft deze gelijk). Daarnaast moet er voor een algemene correctiefactor meer data worden verzameld van nagalmtijdmetingen bij horecagelegenheden. Daarnaast zal de factor altijd een benadering zijn vanwege de vele parameters die dit onderzoek met zich meebrengt. In de zomer zijn mensen over het algemeen luchtiger gekleed en zullen dan minder geluid absorberen.

6 Bronvermelding

- [1] <http://www.burojan.nl/wp-content/uploads/2015/04/portfolio-burojan-huisstijl-het-geluidburo-1.jpg>, bewerkt, 25-08-2015.
- [2] <http://mansquito.com/storyimages/pinkNoiseGraph.png>, bewerkt, 26-08-2015.
- [3] Choi, Y., Jeon, D., Bradley, J.S., Faculty of Architectural Engineering, Chonbuk National University, Institute for Research in Construction, National Research Council (2013). *The effects of occupancy on theatre chair absorption characteristics*. International Symposium on Room Acoustics.
- [4] <http://educinno.intec.ugent.be/luidheid/images/isofonen.jpg>, bewerkt, 25-11-2015.
- [5] <https://nl.wikipedia.org/wiki/Phon>, 25-11-2015.
- [6] [https://nl.wikipedia.org/wiki/DB\(A\)#Oor_heeft_geen_vlakke_respons_over_de_frequenties](https://nl.wikipedia.org/wiki/DB(A)#Oor_heeft_geen_vlakke_respons_over_de_frequenties), 26-11-2015.
- [7] Aarts, R.M. (1993). *A Comparison of Some Loudness Measures for Loudspeaker Listening Tests*. Philips Research Laboratories, Audio Engineering Society, vol. 40, nummer 3.
- [8] http://www.bksv.com/~media/New_Products/Sound%20sources/Omni%20Power/Type%204292L/OmniPowerSoundSource_Type4292%20L_600x600.ashx, 26-11-2015.
- [9] Sabine, W.C. (1922). *Collected Papers on Acoustics*. Cambridge, Harvard University Press. ISBN-13: 978-0932146601.
- [10] Smaart. (2015). *Smaart 7 Impulse Response Measurement and Analysis Guide*. Rational Acoustics, LLC, blz. 2, bewerkt, 07-12-2015.
- [11] <https://etorgerson.files.wordpress.com/2011/05/light-reflect-refract-absorb-label.jpg>, bewerkt, 07-12-2015.
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s_law, 07-12-2015.
- [13] <http://www.audiologieboek.nl/hfm/hfd10/beelden/10-2-1-3.gif>, bewerkt, 08-12-2015.
- [14] https://nl.wikipedia.org/wiki/Deeltjessnelheid#Wiskundige_beschrijving, 10-12-2015.
- [15] <https://de.wikipedia.org/wiki/Auslenkung>, 10-12-2015.
- [16] Rienstra, S.W., Hirschberg, A. (2015). *An Introduction to Acoustics*. Eindhoven University of Technology.
- [17] <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/sound-impedance-intensity.htm>, 11-12-2015.

- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air, 11-12-2015.
- [19] NVON-commissie. (2004). *BINAS*. Wolters Noordhoff, vijfde druk, tabel 11. ISBN-13: 978-9001893804.
- [20] NVON-commissie. (2004). *BINAS*. Wolters Noordhoff, vijfde druk, tabel 15A. ISBN-13: 978-9001893804.
- [21] <http://www.sofsci.com/some-info>, 08-12-2015.
- [22] Ackerman, E., Oda, F. (1962). *Acoustic Absorption Coefficients of Human Body Surfaces*. Pennsylvania State University.
- [23] <http://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-2/Energy-Transport-and-the-Amplitude-of-a-Wave>, 12-12-2015.
- [24] Azhari, H. (2010). *Basics of Biomedical Ultrasound for Engineers*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN-13: 978-0470465479.
- [25] Von Helmholtz, H.L.F. (1875). *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. Vertaald door Ellis, A.J. ISBN-13: 978-0511701801, blz. 68.
- [26] http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-ratio-d_602.html, 14-12-2015.
- [27] Giancoli, D.C. (2010). *Natuurkunde – Deel 1: Mechanica en thermodynamica*. Pearson Education, 4^e editie. Vertaald door Poelman, D. ISBN-13: 978-9043013246, blz. 431.
- [28] https://nl.wikipedia.org/wiki/Geluidssnelheid#Geluidssnelheid_in_lucht, 14-12-2015.
- [29] <https://s-media-cache-ak0.pinning.com/736x/43/e1/ed/43e1ed80598235dfd334118eb020102d.jpg>, 14-12-2015.
- [30] <http://www.sketchup.com/>, 23-11-2015.
- [31] <http://ease.afmg.eu/>, 23-11-2015.
- [32] <http://www.wetenschapsforum.nl/index.php/topic/125946-nagalmtijd-kerk/>, 23-11-2015.
- [33] https://nl.wikipedia.org/wiki/Eettafel#Vorm_en_functie, 14-12-2015.
- [34] Smaart. (2015). *Smaart 7 Impulse Response Measurement and Analysis Guide*. Rational Acoustics, LLC, blz. 43, bewerkt, 07-12-2015.
- [35] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/White_noise_spectrum.png, bewerkt, 14-15-2015.
- [36] <http://www.gracey.co.uk/specifications/bk-2250-s1.htm>, 07-12-2015.
- [37] <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4189-A-21?tab=specifications>, 07-12-2015.

- [38] <http://www.gracey.co.uk/specifications/bk-2250-s1.htm>, 07-12-2015.
- [39] Samson Technologies Corp. (1998). *S1000 / S799 Power Amplifier Owners Manual*. Samson Technologies Corp., blz. 10.
- [40] Everest, F.A. (2001). *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill/TAB Electronics, ISBN-13: 978-0071360975.

Bijlage 1 – Afleiding eenheid impedantie z

De specifieke akoestische impedantie z heeft de eenheid $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$. Hieronder is de afleiding van z te zien.

$$z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c, \quad [29.1]$$

met:

p	de geluidsdruk	[Pa]
v	de deeltjessnelheid	[m/s]
ρ	de dichtheid van het materiaal	[kg/m ³]
c	de geluidssnelheid	[m/s]

$$\begin{aligned} z = \frac{p}{v} &= \frac{[\text{Pa}]}{\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]} = \frac{[\text{kg}] \cdot [\text{m}^{-1}] \cdot [\text{s}^{-2}]}{[\text{m}] \cdot [\text{s}^{-1}]} = [\text{kg}] \cdot [\text{m}^{-2}] \cdot [\text{s}^{-1}] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \\ &= \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \text{s} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m} = \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \end{aligned} \quad [29.2]$$

Hetzelfde geldt voor $z = \rho \cdot c$:

$$z = \rho \cdot c = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] \cdot \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \quad [29.3]$$

Bijlage 2 – Volumes

Om de absorptie van de gemeten ruimtes te berekenen is het nodig om het volume te bepalen. Hieronder zijn de volumes van de gemeten ruimtes bepaald:

“Galmkamer” Arnhem

De ruimte in Arnhem was rechthoekig.

$$V = \ell \cdot b \cdot h \quad [30.1]$$

$$V = 9,98 \cdot 4,36 \cdot 3,50 = 152 \text{ m}^3 \quad [30.2]$$

Restaurant Bird, Rotterdam

De nieuwe zaal van restaurant Bird was ook rechthoekig met een cilindervormig dak.

$$V = \ell \cdot b \cdot h + \frac{1}{2} \pi r^2 \cdot \ell, \quad [31.1]$$

waarin $\ell \cdot b \cdot h$ het volume is van het rechthoekige gedeelte en $\frac{1}{2} \pi r^2 \cdot \ell$ het volume van het cilindrische dak, met ℓ de lengte van de cilinder.

$$V = 15,16 \cdot 7,47 \cdot 2,53 + \frac{1}{2} \pi \cdot (2,07)^2 \cdot 15,16 = 398 \text{ m}^3 \quad [31.2]$$

Hospitalbar Casa Rosso, Amsterdam

De ruimte van hospitalbar Casa Rosso was eveneens rechthoekig.

$$V = \ell \cdot b \cdot h \quad [32.1]$$

$$V = 9,81 \cdot 6,13 \cdot 2,50 = 150 \text{ m}^3 \quad [32.2]$$

Restaurant Amstelhaven, Amsterdam

Restaurant Amstelhaven was rechthoekig.

$$V = \ell \cdot b \cdot h \quad [33.1]$$

$$V = 14,76 \cdot 9,68 \cdot 2,48 = 354 \text{ m}^3 \quad [33.2]$$

Bijlage 3 – Meting Arnhem

Tabel 9 *Absorptiewaardes per aantal in de ruimte aanwezige personen in Arnhem.*

	Octaafband							
	64 Hz (s)	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1 kHz (s)	2 kHz (s)	4 kHz (s)	8 kHz (s)
A_{ruimte} (m ²)	19,98	17,39	19,07	22,35	23,71	27,24	30,36	40,38
$A_{\text{ruimte},1}$ (m ²)	20,27	17,71	19,23	22,60	24,28	28,03	31,24	41,57
$A_{\text{ruimte},3}$ (m ²)	22,71	18,17	19,23	21,80	25,55	27,87	32,70	41,22
$A_{\text{ruimte},5}$ (m ²)	24,28	18,65	17,84	22,09	27,40	31,04	36,33	44,19
$A_{\text{ruimte},7}$ (m ²)	26,80	20,02	20,52	23,25	28,52	31,24	37,73	47,16
$A_{\text{ruimte},9}$ (m ²)	22,60	20,27	20,52	24,65	28,85	34,30	38,32	51,09

Bijlage 4 – Meting Bird

Tabel 10 Nagalmtijden en absorptiewaardes per octaafband in restaurant Bird.

	Octaafband							
	64 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$T_{2 \text{ pers, 3 m}}$ (s)	-	1,19	0,97	0,70	0,51	0,43	0,43	0,35
$T_{2 \text{ pers, 6 m}}$ (s)	-	1,02	1,03	0,69	0,52	0,47	0,43	0,38
$T_{2 \text{ pers, 3 m}}$ (s)	-	1,01	1,00	0,69	0,48	0,41	0,41	0,36
$T_{2 \text{ pers, 6 m}}$ (s)	1,09	0,96	0,89	0,73	0,48	0,41	0,39	0,35
$T_{2 \text{ pers, 3 m}}$ (s)	1,13	0,91	0,90	0,71	0,49	0,44	0,41	0,37
$T_{2 \text{ pers, 6 m}}$ (s)	1,19	1,19	0,96	0,72	0,51	0,43	0,40	0,34
$A_{r, 2, 3 \text{ m}}$ (m ²)	-	52,41	64,30	89,10	122,30	145,05	145,05	178,21
$A_{r, 2, 6 \text{ m}}$ (m ²)	-	61,15	60,56	90,40	119,95	132,71	145,05	164,14
$A_{r, 2, 3 \text{ m}}$ (m ²)	-	61,76	62,37	90,40	129,94	152,13	152,13	173,26
$A_{r, 2, 6 \text{ m}}$ (m ²)	57,22	64,97	70,08	85,44	129,94	152,13	159,93	178,21
$A_{r, 2, 3 \text{ m}}$ (m ²)	55,20	68,54	69,30	87,85	127,29	141,76	152,13	168,58
$A_{r, 2, 6 \text{ m}}$ (m ²)	52,41	52,41	64,97	86,63	122,30	145,05	155,93	183,45
$A_{2 \text{ pers}}$ (m ²)	0,58	0,02	0,04	0,51	1,14	1,57	1,77	2,38
A_{gem} (m ²)	54,36	60,19	65,22	87,79	124,15	143,24	149,94	171,93
$A_{150 \text{ pers}}$ (m ²)	98,14	61,56	68,24	126,13	209,84	260,84	282,65	350,53
T_{nieuw} (s)	0,64	1,01	0,91	0,50	0,30	0,24	0,22	0,18

De streepjes in de tabel bij de 64Hz-octaafband staan voor een *overload*-meting. Het geluidsniveau was hier te luid voor de geluidmeter. Dit geldt ook voor tabel **Y**. $A_{r, 2, x \text{ m}}$ staat voor het absorptieoppervlak van de ruimte plus twee personen op x m afstand.

Bijlage 5 – Meting Casa Rosso

Tabel 11 *Nagalmtijden en absorptiewaardes per octaafband in Hospitalbar Casa Rosso.*

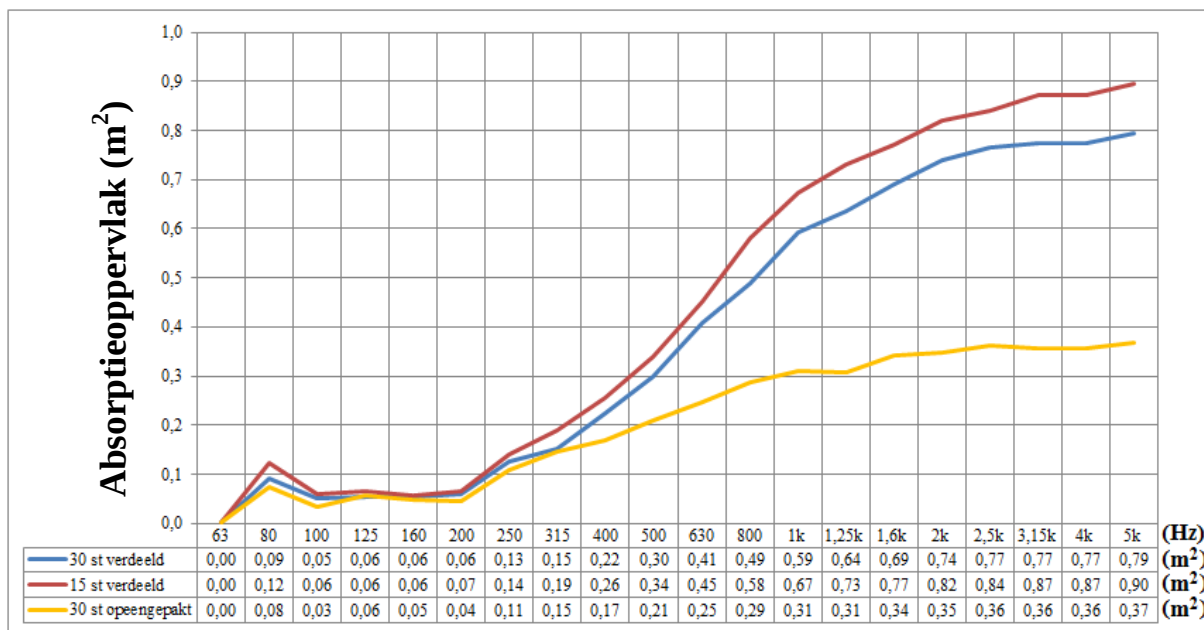
	Octaafband							
	64 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$T_{2 \text{ pers, 3 m}}$ (s)	0,52	0,45	0,37	0,45	0,50	0,52	0,49	0,47
$T_{2 \text{ pers, 6 m}}$ (s)	0,44	0,43	0,45	0,53	0,51	0,50	0,51	0,46
$T_{2 \text{ pers, 3 m}}$ (s)	0,51	0,48	0,45	0,49	0,59	0,56	0,53	0,47
$T_{2 \text{ pers, 6 m}}$ (s)	0,36	0,43	0,41	0,50	0,54	0,54	0,52	0,45
$A_{r, 2, 3 \text{ m}}$ (m ²)	46,58	53,83	65,47	53,83	48,45	46,58	49,44	51,54
$A_{r, 2, 6 \text{ m}}$ (m ²)	55,05	56,33	53,83	45,71	47,50	48,45	47,50	52,66
$A_{r, 2, 3 \text{ m}}$ (m ²)	47,50	50,47	53,83	49,44	41,06	43,26	45,71	51,54
$A_{r, 2, 6 \text{ m}}$ (m ²)	67,29	56,33	59,08	48,45	44,86	44,86	46,58	53,83
$A_{2 \text{ pers}}$ (m ²)	0,58	0,02	0,04	0,51	1,14	1,57	1,77	2,38
A_{gem} (m ²)	66,70	54,22	58,01	48,84	44,32	44,22	45,54	50,01
$A_{100 \text{ pers}}$ (m ²)	95,89	55,13	60,02	74,40	101,46	122,62	134,65	169,08
T_{nieuw} (s)	0,25	0,45	0,40	0,33	0,24	0,20	0,18	0,14

Bijlage 6 – Meting Amstelhaven

Tabel 12 *Nagalmtijden en absorptiewaardes per octaafband in restaurant Amstelhaven.*

	Octaafband							
	64 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$T_{2 \text{ pers, 7 m}}$ (s)	-	0,60	0,61	0,67	0,82	0,86	0,78	0,67
$T_{2 \text{ pers, 10 m}}$ (s)	-	0,69	0,60	0,79	0,81	0,82	0,79	0,64
$T_{2 \text{ pers, 7 m}}$ (s)	-	0,50	0,58	0,73	0,85	0,79	0,79	0,67
$T_{2 \text{ pers, 10 m}}$ (s)	-	0,51	0,69	0,76	0,82	0,82	0,78	0,68
$T_{2 \text{ pers, 7 m}}$ (s)	-	0,53	0,66	0,74	0,81	0,84	0,81	0,67
$T_{2 \text{ pers, 10 m}}$ (s)	0,43	0,69	0,77	0,74	0,81	0,82	0,76	0,65
$A_{r, 2, 7 \text{ m}}$ (m ²)	-	95,09	93,54	85,16	69,58	66,35	73,15	85,16
$A_{r, 2, 10 \text{ m}}$ (m ²)	-	82,69	95,09	72,22	70,44	69,58	72,22	89,15
$A_{r, 2, 7 \text{ m}}$ (m ²)	-	114,11	98,37	78,16	67,13	72,22	72,22	85,16
$A_{r, 2, 10 \text{ m}}$ (m ²)	-	111,88	82,69	75,07	69,58	69,58	73,15	85,16
$A_{r, 2, 7 \text{ m}}$ (m ²)	-	107,65	86,45	77,10	70,44	67,92	70,44	168,58
$A_{r, 2, 10 \text{ m}}$ (m ²)	132,11	82,69	74,10	77,10	70,44	69,58	75,07	87,78
$A_{2 \text{ pers}}$ (m ²)	0,58	0,02	0,04	0,51	1,14	1,57	1,77	2,38
A_{gem} (m ²)	132,11	99,00	88,33	76,96	68,46	67,64	70,94	83,67
$A_{150 \text{ pers}}$ (m ²)	175,89	100,37	91,35	115,29	154,16	185,24	203,65	262,28
T_{nieuw} (s)	0,32	0,57	0,63	0,50	0,37	0,31	0,28	0,22

Bijlage 7 – Galmkammermetingen

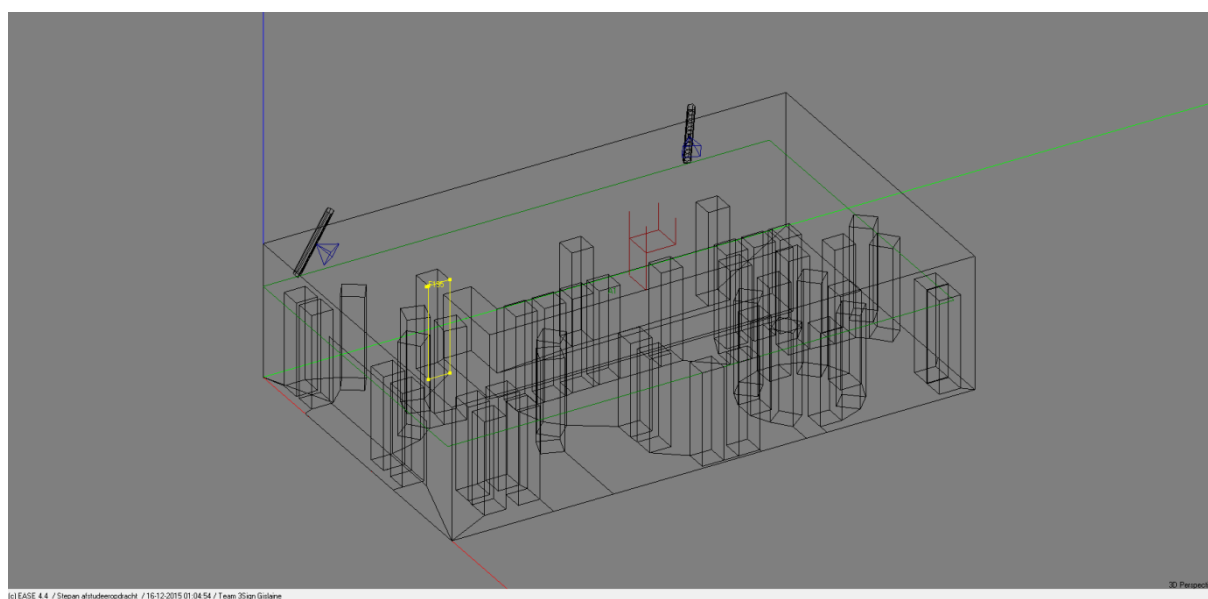


Figuur 33 Nagalmtijden van de metingen in de galmkamer van de hogeschool Windesheim. Hier zijn de drie metingen in één grafiek samengevoegd.

Bijlage 8 – Model kleine bar

Tabel 13 *Nagalmtijdberekeningen kleine bar.*

Tertsband (Hz)	Nagalmtijd (s)	
	Lege ruimte	Volle ruimte
100	3,79	1,79
125	3,76	1,67
160	4,09	1,71
200	4,45	1,75
250	4,83	1,13
315	4,52	1,06
400	4,23	0,81
500	3,96	0,72
630	3,96	0,56
800	3,97	0,64
1000	3,93	0,65
1250	3,67	0,62
1600	3,42	0,52
2000	3,14	0,59
2500	2,74	0,48
3150	2,37	0,46
4000	2,02	0,51
5000	1,76	0,55
6300	1,46	0,47
8000	1,16	0,47
10 000	0,89	0,36

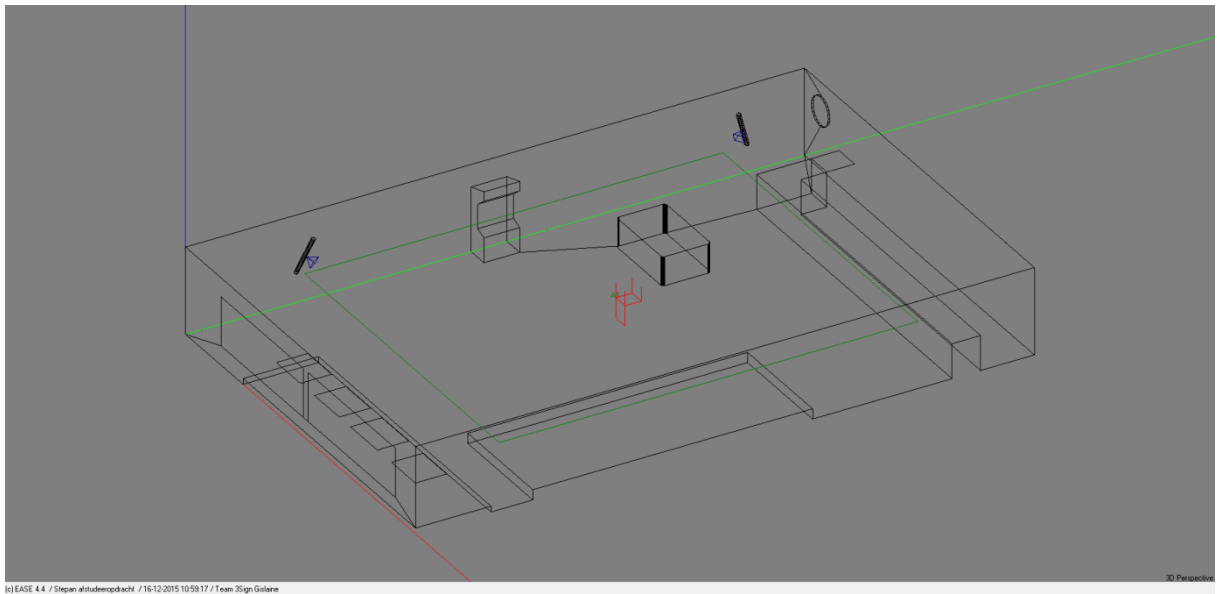


Figuur 34 *Tekenmodel van een kleine bar, met de aanwezigheid van personen.*

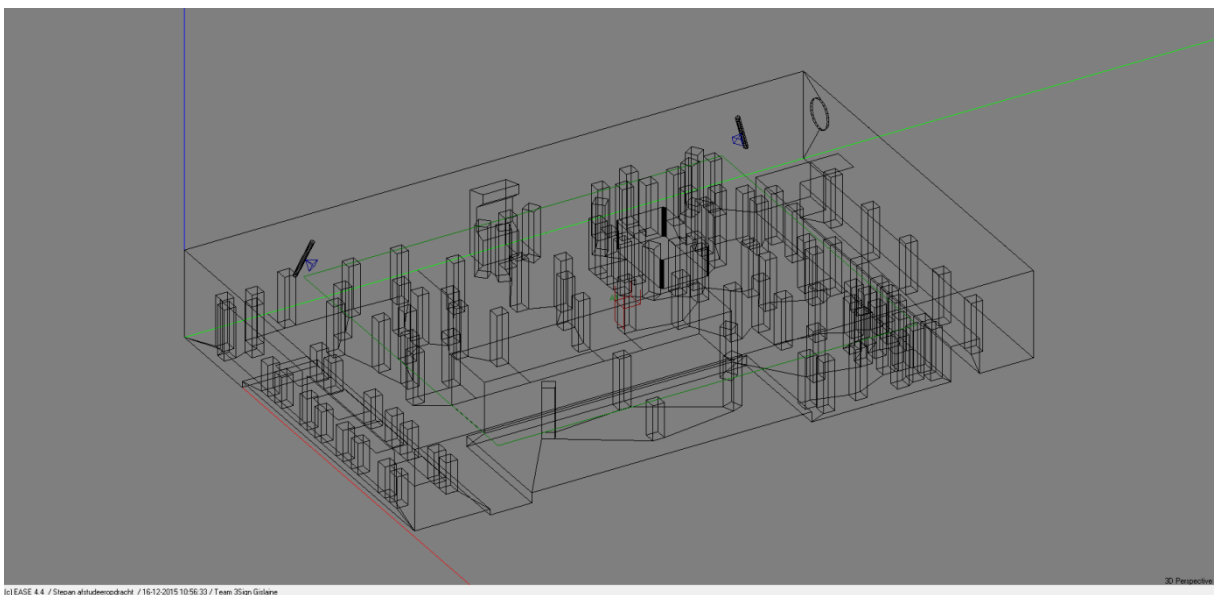
Bijlage 9 – Model grote bar

Tabel 14 *Nagalmtijdberekeningen grote bar.*

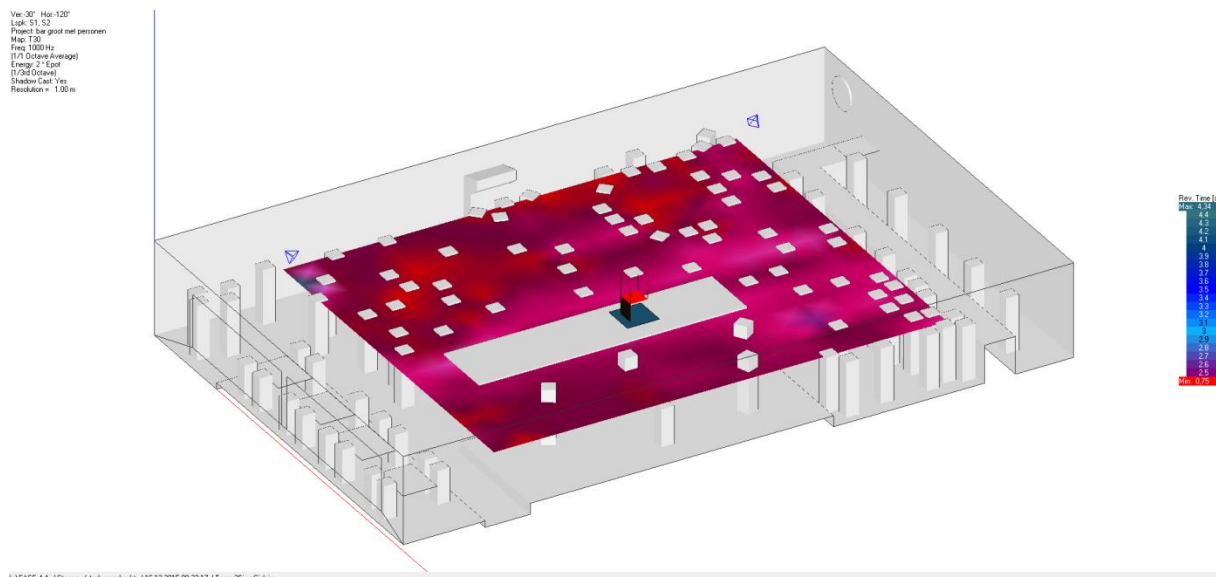
Tertsband (Hz)	Nagalmtijd (s)	
	Lege ruimte	Volle ruimte
100	5,00	2,97
125	4,98	2,73
160	5,39	2,90
200	5,80	3,00
250	6,31	2,06
315	6,29	1,82
400	6,25	1,49
500	6,20	1,33
630	5,91	1,12
800	5,68	1,07
1000	5,37	1,17
1250	4,95	1,49
1600	4,53	1,43
2000	4,12	0,90
2500	3,61	1,36
3150	3,11	1,40
4000	2,61	1,14
5000	2,19	1,33
6300	1,76	0,81
8000	1,34	0,65
10 000	0,98	0,51



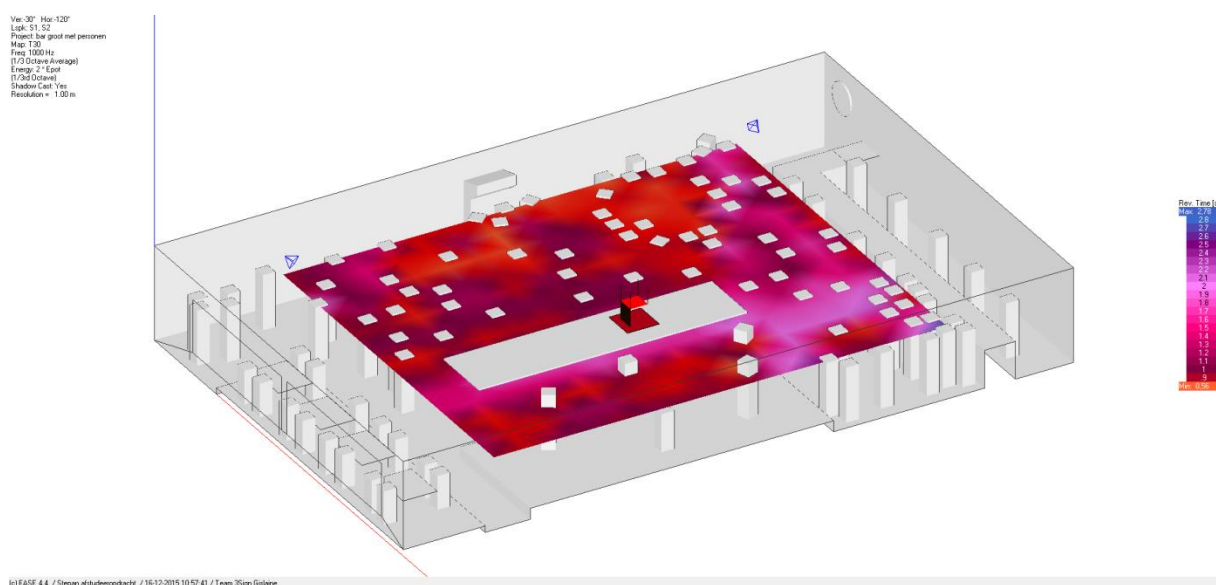
Figuur 35 *Tekenmodel van een grote bar, zonder de aanwezigheid van personen.*



Figuur 36 *Tekenmodel van een grote bar, inclusief de aanwezigheid van personen.*



Figuur 37 Uitkomsten van een grote bar, zonder de aanwezigheid van personen. Op de donkere plekken ligt de nagalmtijd tussen de 0,5 en 0,9 s. Op de lichte plekken is de nagalmtijd ongeveer 2,7 s.



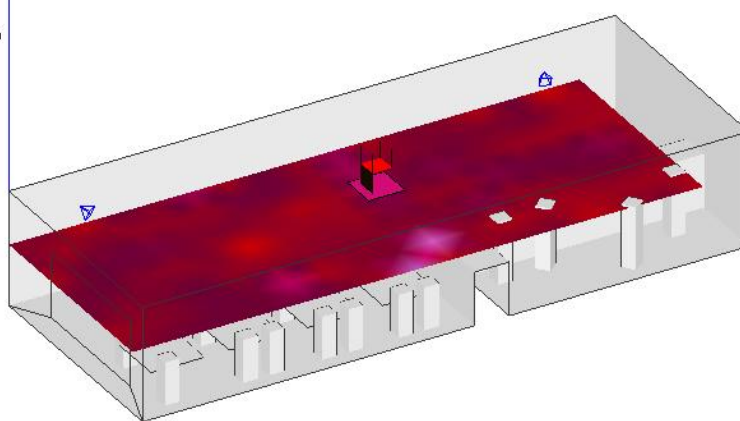
Figuur 38 Uitkomsten van een grote bar, inclusief de aanwezigheid van personen. Op de donkere plekken ligt de nagalmtijd rond de 0,7 s. Op de lichte plekken is de nagalmtijd ongeveer 3,4 s.

Bijlage 10 – Model klein restaurant

Tabel 15 Nagalmtijdberekeningen klein restaurant.

Tertsband (Hz)	Nagalmtijd (s)	
	Lege ruimte	Volle ruimte
100	2,95	2,40
125	2,93	2,32
160	3,21	2,49
200	3,54	2,66
250	3,94	2,26
315	3,85	2,12
400	3,72	1,69
500	3,65	1,48
630	3,63	1,21
800	3,67	1,12
1000	3,67	0,97
1250	3,50	0,97
1600	3,34	0,85
2000	3,13	1,19
2500	2,81	1,30
3150	2,47	0,98
4000	2,12	0,74
5000	1,85	0,74
6300	1,52	0,77
8000	1,20	0,61
10 000	0,91	0,51

Ver: 30° Hor: 120°
 Lspk: S1, S2
 Project: restaurant klein met personen
 Map: T30
 Freq: 1000 Hz
 (1/3 Octave Average)
 Energy: 2 * Epot
 (1/3rd Octave)
 Shadow Cast: Yes
 Resolution = 1.00 m



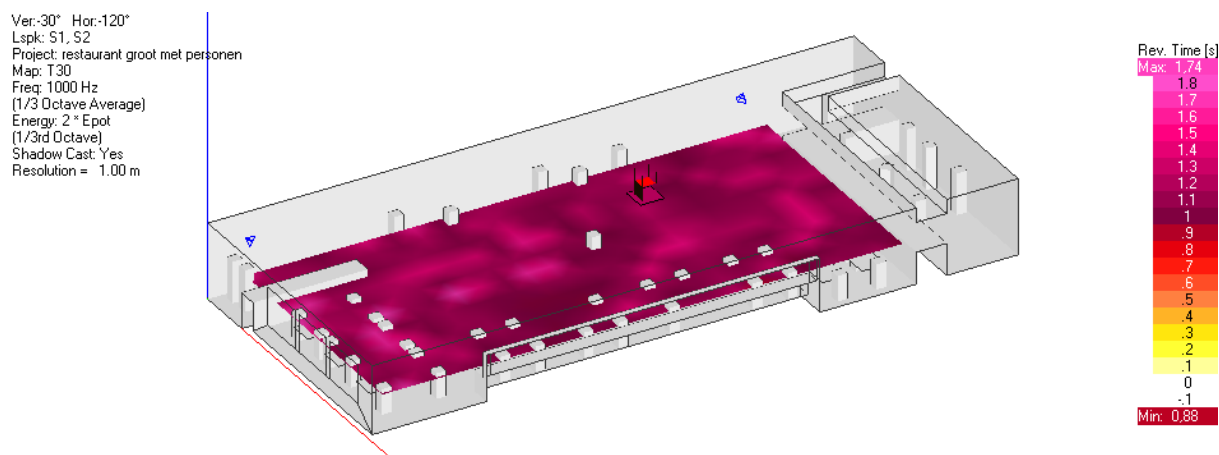
(c) EASE 4.4 / Stepan afstudeeropdracht / 16-12-2015 01:31:44 / Team 3Sign Gislaïne

Figuur 39 Uitkomsten van een klein restaurant, inclusief de aanwezigheid van personen. Op de donkere plekken ligt de nagalmtijd rond de 0,7 s. Op de lichte plekken is de nagalmtijd ongeveer 1,9 s.

Bijlage 11 – Model groot restaurant

Tabel 16 Nagalmtijdberekeningen klein restaurant.

Tertsband (Hz)	Nagalmtijd (s)	
	Lege ruimte	Volle ruimte
100	2,63	2,62
125	2,65	2,54
160	2,86	2,74
200	3,13	2,99
250	3,49	2,57
315	3,64	2,43
400	3,80	2,12
500	3,98	1,76
630	3,84	1,53
800	3,74	1,38
1000	3,61	1,20
1250	3,50	1,19
1600	3,38	1,19
2000	3,20	1,13
2500	2,92	1,08
3150	2,61	1,08
4000	2,26	1,02
5000	1,95	0,87
6300	1,60	0,78
8000	1,24	0,70
10 000	0,92	0,57



(c) EASE 4.4 / Stepan afstudeeropdracht / 16-12-2015 01:19:41 / Team 3Sign Gislaine

Figuur 40 Uitkomsten van een groot restaurant, inclusief de aanwezigheid van personen. Op de donkere plekken ligt de nagalmtijd rond de 1,1 s. Op de lichte plekken is de nagalmtijd ongeveer 1,4 s.