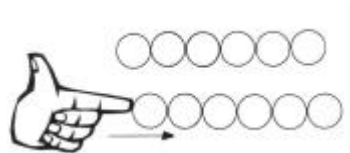


# Elektro-akoestiek

## 1.1. Geluid

Geluid is de verstoring van de evenwichtsituatie van luchtmoleculen die waarneembaar is voor het menselijk gehoor

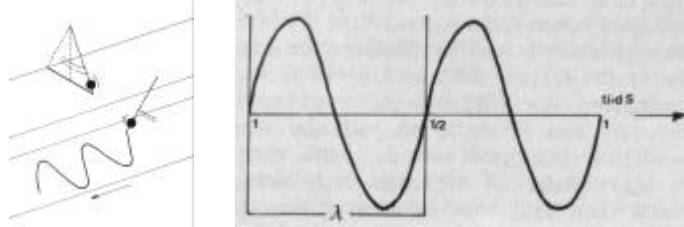
Stel luchtmoleculen voor als een rijtje vrij zwevende pingpong - balletjes : wanneer je 1 balletje verstoort zal het 2de balletje ook uit zijn evenwicht raken. Dus de verstoring heeft zich voortgeplant. Wanneer de balletjes onvervormbaar en massaloos zouden zijn, zou de voortplantingssnelheid oneindig groot zijn.



De voortplantingssnelheid is dus afhankelijk van de materie waarin het geluid zich voortplant

## 1.2. Trilling

De meest eenvoudige trilling is de sinus

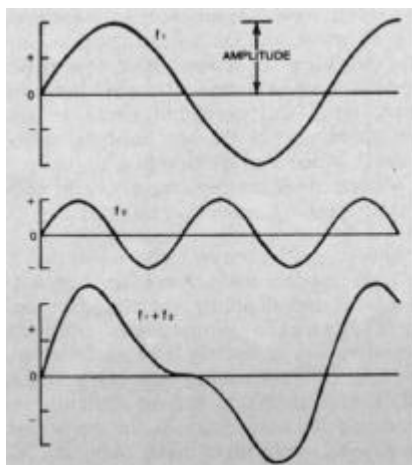


- amplitude = graad van uitwijking
- frequentie (  $f$  ) = 1 cyclus / seconde
- golflengte (  $\lambda$  ) = tijdsduur / cyclus

$$? \text{ 20Hz} : \frac{344 \text{ m/s}}{20 \text{ s}} = 17,2\text{m}$$

## 1.2. Trilling

In de natuur krijg je een opeenstapeling van verschillende golven.



Eerst en vooral heb je de grondtoon en zijn harmonischen, maar geluid kan ook verschillende grondtonen en respectievelijke harmonischen hebben.

De uiteindelijke totaal golf wordt gevormd door :

- de amplitude van de samenstellende golven en
- hun onderlinge fase

### 1.3. Ruis

Ruis is een wezenlijk bestanddeel van geluiden

- Witte ruis : gelijke hoeveelheid energie / frequentiecomponent
- Roze ruis : gelijke hoeveelheid energie / frequentieband

Roze ruis is het meest gebruikt voor akoestische metingen omdat deze ruis een gelijke aanwijzing geeft / bandfilter

Ruiscomponenten, ondanks soms heel zwak hoorbaar, kunnen heel bepalend zijn voor het totaalbeeld van het geluid

### 1.4. Het gehoor

' Horen ' moeten we in 2 gebieden onderverdelen :

- het omzetten van geluidssignalen in elektrische zenuwpulsen naar de hersenen
- de geluidsindruk van de hersenen ( subjectief )

Het geluid wordt via de gehoorgang, trommelvlies, gehoorbeentjes, slakkenhuis, haarcellen en gehoorzenuw naar het gehoorcentrum in de hersenen gebracht.

De vloeistof in het slakkenhuis brengt de haarcellen in trilling. Elke haarcel heeft een specifieke frequentieafhankelijke functie ( wij hebben +/- 24000 haarcellen / oor )

De haarcellen zetten deze trillingen om in elektrische pulsen, die via de gehoorzenuw naar de hersenen gebracht worden.

De hoeveelheid pulsen en de repeteersnelheid geeft aan hoe sterk het inkomend signaal is

## 1.5. Werkgebied

- Benedengrens = gehoordrempel : geluidsdruk van 20 dB pascal of 0,0002 mikrobar ( onderlinge beweging van luchtmoleculen )
- Bovengrens = pijngrens : geluidsdruk van 200 pascal ( je hoort geen geluid meer maar je voelt pijn )
- Gezien een verhouding van 1/10.000.000 zeer onhandig werkt wordt de dB SPL ingevoerd :  
 $20 \log 10.000.000 = 20 \times 7 = 140 \text{ dB}$
- Het frequentiegebied van het gehoor is sterk afhankelijk van de leeftijd van de luisteraar,
- maar ook door de blootstelling aan hoge geluidsdrukken aangezien de haarcellen van de hoogste frequenties makkelijkst beschadigd raken bij hoge SPL 's

## 1.6. Geluids-in-druk

Ons gehoor heeft een frequentiekaracteristiek die afhankelijk is van de geluidsdruk

- Bij een lage geluidsdruk horen we de lage tonen minder hard
- Het middenoor veroorzaakt harmonische vervorming wanneer we aan bv. 1000 Hz 1500Hz toevoegen blijkt het oor meerder frequenties door te geven zoals 500Hz, 2000Hz en 2500Hz ( som- en verschilfrequenties ). Het oor schijnt tot 60 extra frequenties door te geven door het moduleren van hoofdtönen met elkaar.  
Bij meting aan de gehoorzenuw bleek dat er extra harmonischen werden doorgegeven naar de hersenen.  
Dus een duidelijke vorm van vervorming !

## 1.7. Transiënten

Ons gehoor is minder gevoelig voor korte transiënten.

Een puls van 1 sec. aan 1000Hz horen we ook als 1000Hz troon, maar een puls van 5 ms. horen we enkel als een klik, de puls zal ook veel zachter klinken hoewel de SPL gelijk is ( een puls van 5ms zou 14 dB sterker moeten zijn om even hard te klinken dan een puls van 1 sec.

Ons oor blijkt een integratietijd van 100ms. nodig te hebben. Dit is een zeer belangrijk gegeven als je weet dat onze spraak juist uit zeer veel korte pulsen bestaat. Medeklinkers hebben bv. een transiëntentijd tussen de 5 en de 25 ms.

## 1.8. Stereo

Stereo kan enkel ervaren worden door onze 2 oren te gebruiken. Het gehoor kan enkel op deze manier verschillende geluiden lokaliseren. Bovendien is ons gehoor zeer nauwkeurig ( een afwijking van 1 a 2° is reeds te horen ). Deze waarneming gebeurt voornamelijk in het horizontale vlak. Bovendien zijn samengestelde tonen beter te lokaliseren dan enkelvoudige tonen.

Het principe berust op zowel de vertragingstijd van signalen op het linker en rechter oor als op de verminderde hoge tonen voor het oor in de ' schaduw ' van het hoofd.

Bovendien is de nauwkeurigheid afhankelijk van de frequentie van het geluid. Geluiden met frequenties beneden de 200Hz zijn zelfs helemaal niet meer in een ruimte lokaliseerbaar.

## 1.9. Frequentie en toonhoogte

Frequentie is exact, toonhoogte is subjectief

Frequentie is onder alle omstandigheden te meten, toonhoogte is datgene dat ons gehoor waarneemt. De toonhoogte wordt sterk beïnvloedt door de luidheid:

bij stijgende luidheid hoor je een schijnbare *daling* van de toonhoogte bij lage tonen en een schijnbare *verhoging* bij de hoge tonen.

Bij het beluisteren van 2 tonen zoals 168Hz en 318Hz op een niveau van +/-65dB klinken deze 2 tonen vals. Naarmate de SPL verhoogt worden de 2 tonen meer harmonisch ervaren

## 1.10. Timbre of klankleur

Het geheel van grondtonen en boventonen in hun onderlinge verhouding die een instrument zijn eigen karakter geeft noemen we timbre

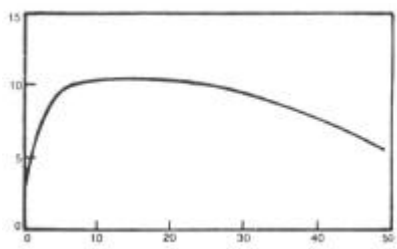
Deze verhoudingen zijn bepalend op het vlak van zowel sterkte en fase.

Die eigenschap is dus weer louter subjectief. Iedereen zal elk instrument naar zijn eigen beleving een klankleur geven.

## 2.1. Vroege reflecties

Het gehoor voegt het binnenkomend geluid voor een kort tijdsinterval samen ( Haas-effect )

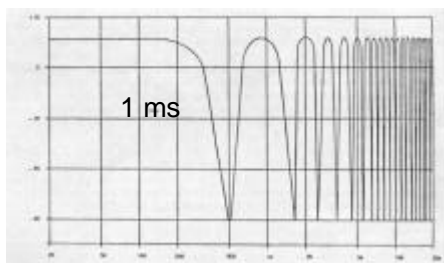
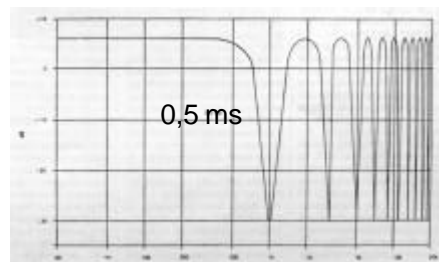
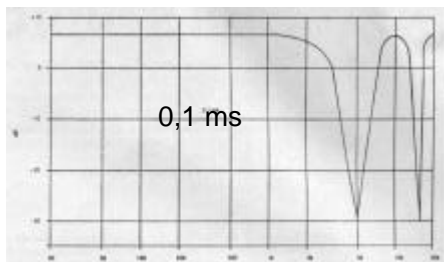
Dit heeft als gevolg dat een reflectie voor een bepaalde tijd met het origineel geluid opgeteld wordt.



wanneer men een reflectie van 6ms wil waarnemen moet deze reflectie 10 dB luider zijn dan het origineel, bij grotere vertragingstijden wordt dat verschil kleiner; tussen de 50 en 100ms krijgen we een overgangsfase.

Als je rekent dat  $50\text{ms} = 1,72\text{m}$  moet je er steeds op letten dat de luidsprekers minstens 86cm van elk obstakel verwijderd staan.

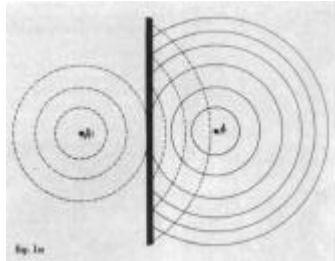
## 2.1. Vroege reflecties



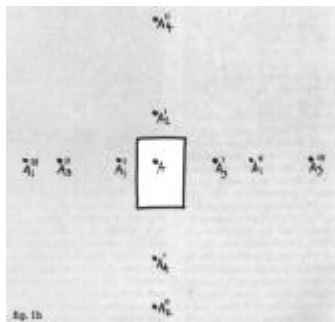
In deze grafieken zien wij de optelsom van het origineel signaal met de respectabele vertragingen.

Bedenk :  $1\text{ ms} = 34,4\text{ cm}$  of  $17,2\text{ cm}$  afgelegde weg

## 2.2 Reflecties

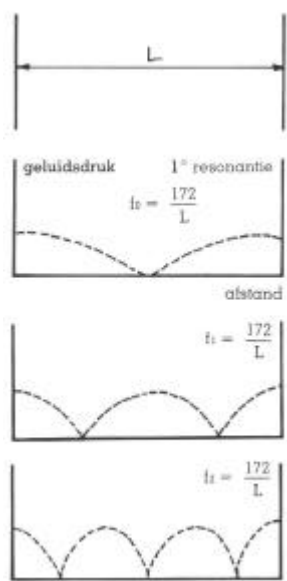


A is de reële geluidsbron,  
 A1 is de denkbeeldige geluidsbron  
 ( om het bronpunt van de reflectie te bepalen  
 gebruiken we een denkbeeldige geluidsbron )



Deze denkbeeldige bronpunten kunnen we  
 voor elke muur bepalen, maar elke denkbeel-  
 dige bron heeft weer zijn eigen denkbeeldige  
 bron, enz...  
 Het geluid in punt A wordt opgebouwd uit alle  
 bijdragen van alle echte en denkbeeldige  
 geluidsbronnen.  
 Hoe verder zo 'n bron van een muur aflight,  
 hoe geringer de bijdrage aan het totaal zal  
 zijn

## 2.3 Staande golven



Als je weet dat  $f = c / 2L$  dan hebben  
 2 muren op een afstand L van elkaar  
 volgende resonantie :  $\frac{344m/s}{2L}$  of  $\frac{172}{L}$

Via deze gegevens kunnen we voor meerdere  
 reflecties volgende formule samenstellen :

$$f = \frac{344}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{B^2} + \frac{r^2}{H^2}}$$

met volgende waarden :  
 L = lengte, B = breedte, H = hoogte;  
 p, q en r zijn de enige variabelen die ons  
 alle resonanties zullen weergeven.  
 Deze formule werd samengesteld door  
 Raleigh in 1869

### 2.3. Staande golven

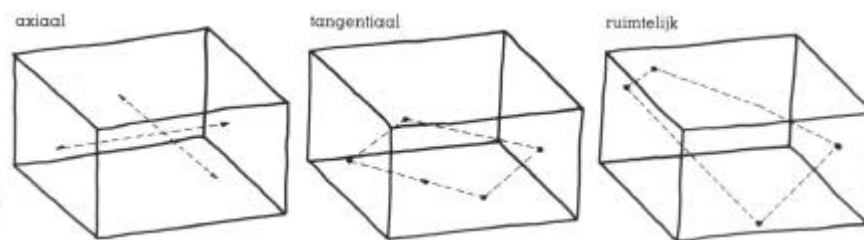
Nemen we terug onze formule :

$$f = \frac{344}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{B^2} + \frac{r^2}{H^2}}$$

wanneer 2 van de 3 variabelen = 0 dan hebben wij enkel reflectie tussen 2 muren, axiale resonantie genoemd

wanneer 1 van de 3 variabelen = 0 dan hebben wij reflecties tussen 3 vlakken, tangentiële resonantie genaamd

wanneer alle 3 variabelen > 0 dan hebben wij reflecties tussen 6 vlakken of ruimtelijke resonantie genaamd.



### 2.3. Staande golven

- Om een bruikbaar overzicht te hebben moeten wij alle berekeningen uitwerken tot 300Hz, de staande golven boven deze waarde hebben geen grote invloed meer op het totaalbeeld. Het zijn vooral de axiale modes die de grootste en sterkste invloed op de ruimte hebben.
- De tangentiële resonanties zijn maar half zo sterk als de axiale; de ruimtelijke hebben maar een kwart van de axiale energie. Toch kunnen tangentiële en ruimtelijke modes van invloed zijn en dit wanneer een frequentie toevallig samenvalt met een concentratie van axiale frequenties.
- Verschillende soorten resonanties hebben ook hun eigen uitsterftijd, dit kan grote gevolgen hebben op het gebruik van demping in de ruimte.
- Kleuring door resonanties kan verwoestend werken op de spraak-verstaanbaarheid ( vooral in het gebied 80 - 200 Hz )

## 2.4 Echo

- Een echo is een weerkaatste golf met dusdanige amplitude en vertraging dat hij apart van het oorspronkelijke geluid gehoord wordt.
- Een echo binnen een bepaalde waarde zal het oorspronkelijk geluid eerder verbeteren
- Een echo met grotere vertragingstijd maakt het geluid troebel tot onverstaaanbaar

De gebruikte formule is  $\frac{4V}{S}$  waarbij V = volume en S = totale oppervlakte van alle scheidingswanden

Nemen wij volgende afmetingen : L = 10 m, B = 7m en H = 3m dan krijgen wij volgende waarden :  $4 \cdot 10 \cdot 7 \cdot 3 / 242 = 3,47m$

Rekening houdend met een voortplantingssnelheid van 344m/s krijgen we een vertragingstijd van +/- 10ms ( dus zeer kort )

Bij afmetingen van bv. : L = 100 m, B = 50 m en H = 15m, dan krijgen wij andere waarden :  $4 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 15 / 14500 = 20,69m$ , of een vertragingstijd van +/- 70ms

## 2.4 Echo - Haas effect

Bij testen waarbij proefpersonen zowel een direct als een vertraagd signaal te horen krijgen, blijkt dat ons gehoor geluiden binnen een bepaalde vertragingstijd optelt bij het directe geluid. Ons gehoor werkt dus met een bepaalde "attack & release" tijd. Wat wij dus horen blijkt niet analytisch maar eerder "gefilterd" te zijn.

Volgens Haas moet een signaal met een vertraging van 5-35ms minstens 10dB sterker zijn dan het directe signaal om even sterk te horen.

In alle kleine ruimtes is de reflectie kleiner dan 35ms, deze reflecties zullen bij het directe geluid opgeteld worden en aldus een verkleuring veroorzaken.

Bij alle proefpersonen wordt deze kleuring als aangenaam omschreven.

De overgangsfase tussen het apart horen van vertraagd signaal en niet apart horen is zeer geleidelijk en bevindt zich rond de 50ms

Deze resultaten werden door Helmut Haas in 1951 gepubliceerd

## 2.5 Echo - reflecties in ruimtes

Wanneer we naar een film kijken weten we dat we geen continu beeld bekijken maar een opeenstapeling van losse beeldjes. Dit effect noemen wij *visuele integratie*. Op dezelfde manier zal ons gehoor alle echo's die binnen de 50ms opgevangen worden als 1 geluid herkennen.

De verhouding van al deze korte echo's zal uiteindelijk de "sound" van de ruimte bepalen.

Daarom is het van uiterst belang om te weten wat nu eigenlijk deze sound veroorzaakt.

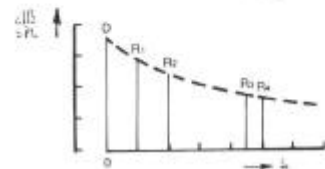
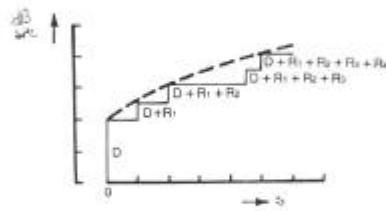
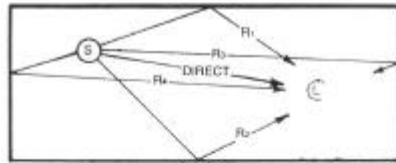
## 2.6 Galm

Galm is een optelling van een groot aantal reflecties met verschillende vertragingstijden en sterkten.

Is galm goed of slecht voor het uiteindelijk geluid ?

De BBC heeft als studie een aantal orkesten opgenomen in een "dode ruimte". Het resultaat was absoluut niet te beluisteren. Ze verkregen een dun, schel en onsamenhangend geluid. Elk instrument bleek bovendien apart hoorbaar in plaats dat er een ensemble gevormd werd. Hieruit blijkt dat we uiteindelijk galm nodig hebben om goed geluid te vormen

## 2.6. Galm - hoe ontstaat galm?



Bron S genereert geluid.

Na een korte tijd ( S-L ) hoort L het geluid met een sterkte iets kleiner dan bij S.

Even later hoort L de eerste reflectie R1.

Dit geluid wordt opgeteld bij D.

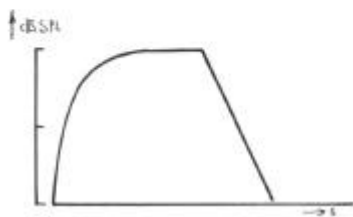
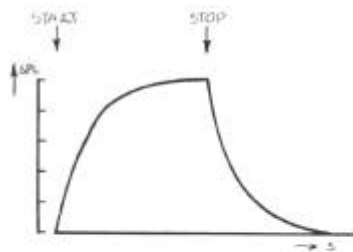
Nog wat later komt R2 en wordt nu opgeteld bij D en R1.

Het duurt dus een beetje vooraleer de laatste reflectie bij L aankomt.

Stoppen we *plotseling* de energie toevoer van S, dan zal het geluid bij L niet *plotseling* maar *langzaam* afnemen.

Het directe geluid stopt wel meteen, maar alle reflecties, die kris kras door de ruimte vliegen blijven doorgaan.

## 2.6. Galm



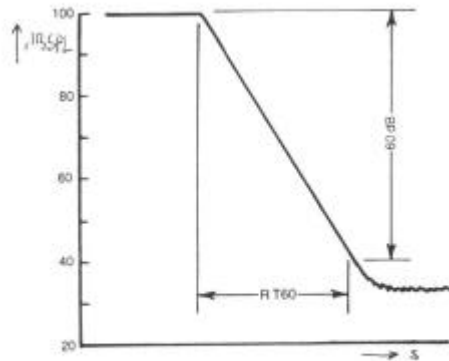
Het afnemen van de energie gebeurt met een exponentieel verloop.

Tekening a is recht evenredig of lineair ( de waarde tussen 1 en 10 is even groot als de waarde tussen 10 en 20 ), tekening b toont ons een logaritmisch verloop ( waarde 1 tot 10 = waarde 10 tot 100 ).

Het uitsterven van de galm wordt weergegeven door een rechte.

Deze lijn is de basis voor het meten van de galmtijd in een ruimte : RT60

## 2.7 Galmtijd : RT60

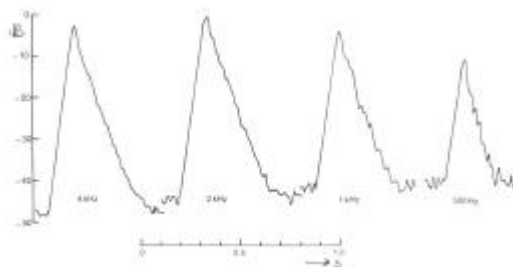


De RT60 van een ruimte is de tijd die nodig is om de galm 60 dB te laten afnemen. Een vermindering van 60dB betekent een vermindering van 1.000.000 maal de geluidsdruk. Het was W.C. Sabine die het RT60 gebeuren berekend en uitgewerkt heeft.

## 2.7 Hoe RT60 meten ?

Sabine begon zijn waarnemingen met een harmonium, extra lange orgelpijpen, een chronometer en een stel goede oren. Deze resultaten waren niet echt betrouwbaar. Nadien gebruikte men een microfoon aangesloten op een oscilloscoop; alleen kan je deze opstelling enkel gebruiken in zalen met een lange galmtijd.

Met een schrijver kan je dan wel in een kleinere ruimte meten. Belangrijk is wel dat je een geluidsbron hebt die je in zeer korte tijd aan en uit kan zetten of eventueel een pulsbron. In de figuur zien we de resultaten met een startpistool ( 144dB @ 1m ) en een pulslengte van 1ms. We zien dat in de lage frequenties meer vervorming



optreedt, de rechte lijn loopt minder recht. Dit komt door het feit dat een pistool vrij weinig energie in het laag heeft.

## 2.7. Hoe RT60 meten ?

Om nog betere resultaten te verkrijgen worden de metingen met ruis bursts en via filters gemaakt.

Men moet er bovendien ook op letten om in dezelfde ruimte op verschillende plaatsen te meten ( zeker voor lage frequenties ). Elke plaats zal een ander resultaat geven.

Meestal worden er 4 tot 5 microfoons opgesteld.

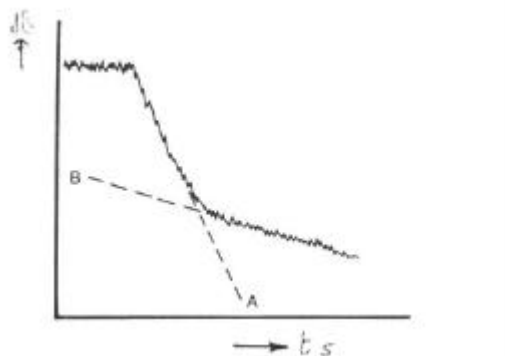
Als je bedenkt dat je minstens 5 metingen maakt op 10 verschillende octaven en met 4 microfoons, kom je aan een slordige 200 metingen. Bedenk wel : hoe meer metingen, hoe beter het gemiddelde.

## 2.7. RT60 verloop van 2 zalen

In onderstaande figuur zien we metingen van 2 zalen met een gemeenschappelijke doorgang. Zaal A is vrij gedempt, zaal B heeft blijkbaar veel harde muren.

Wanneer iemand tussen de 2 zalen zit dan zal hij een RT60 waarnemen volgens de figuur.

De grafiek heeft een dubbele snelheid, de invloed van B komt pas als het geluid in A tot een bepaald niveau is gezakt.

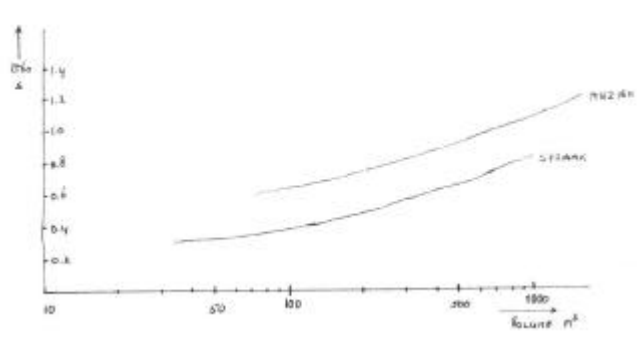


## 2.7. Is er een ideale RT60 ?

Een ideale galmtijd bestaat niet. Elke akoestische toepassing vraagt zijn eigen optimale RT60.

In onderstaande tekening is duidelijk te zien dat er een groot verschil is tussen een ideale verhouding voor spraak en voor muziek.

Zelfs voor muziek bestaan er veel afwijkingen : klassieke muziek klinkt beter in een reverberantie zaal, multitrack opnames worden het best opgenomen in een « gedempte » studio.



## 2.7. Is er een ideale RT60 ?

Men is het er wel over eens dat de RT60 voor kleine tot middelgrote zalen over alle frequenties zo constant mogelijk moet zijn.

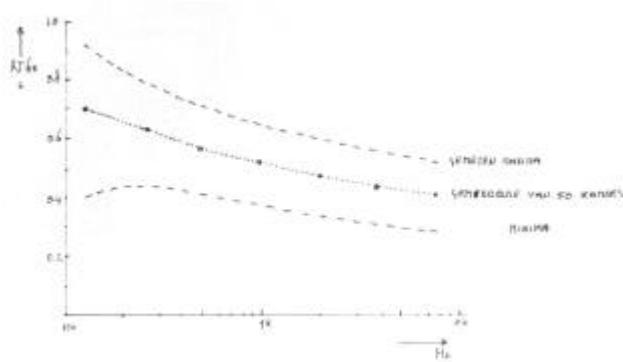
Kleine lokalen met constante RT60 zullen bij een opname voor blazers wel eerder scherp en hard klinken, terwijl ze voor snaarinstrumenten dan wel ideaal klinken.

De oplossing is dan kiezen voor een modulaire studio waarbij je de RT60 kan aanpassen ( bv Studio 6 BRT Flagey ).

## 2.7 RT60 gemiddelde van huiskamers

Wat opgenomen wordt, zal ergens anders ( bv. in de huiskamer ) gereproduceerd worden.

In 1959 werd bij de BBC onderzoek gedaan naar de karakteristieken van de gemiddelde Britse huiskamer. Deze studie werd in 1972 door Jackson & Leventhall overgedaan. Zij kwamen tot de conclusie dat er zeker geen sprake van een constante RT60 kan zijn. De grootste verschillen zijn zowat factor 3 !



## 2.8 Sabine

Sabine distilleerde uit al zijn metingen volgende formule :

$$RT60 = \frac{0,161 \times V}{S \times \bar{a}}$$

waarbij RT60 = galmtijd in s, V = volume in m<sup>3</sup>, S = totale opp. van de wanden in m<sup>2</sup> en  $\bar{a}$  = gemiddelde absorptiecoëfficiënt.

S x  $\bar{a}$  = totale absorptie-eenheden in sabine voor een bepaalde ruimte.

Elk materiaal heeft zijn eigen absorptiecoëfficiënt bij iedere frequentie.

Een  $\bar{a}$  van 0.55 bij 1kHz betekent dat 55% geabsorbeerd, en 45% weerkaatst wordt.

Neem een ruimte van L = 8m, B = 5m, H = 3m, V = 120m<sup>3</sup>, S = 158m<sup>2</sup>; de vloer is beton, de wanden en plafond in stucwerk. De onderstaande kolom geeft dan volgende resultaten :

| Materiaal    | S m <sup>2</sup> | 125 Hz   |            | 250      |            | 500      |            | 1k       |            | 2k       |            | 4k       |            |
|--------------|------------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
|              |                  | $\alpha$ | S $\alpha$ | $\alpha$ | S $\alpha$ | $\alpha$ | S $\alpha$ | $\alpha$ | S $\alpha$ | $\alpha$ | S $\alpha$ | $\alpha$ | S $\alpha$ |
| Beton        | 40               | .01      | .4         | .01      | .4         | .015     | .6         | .02      | .8         | .02      | .8         | .02      | .8         |
| Stucwerk     | 118              | .02      | 2.36       | .02      | 2.36       | .03      | 3.54       | .04      | 4.72       | .04      | 4.72       | .033     | 3.54       |
| Sabinetotaal |                  |          | 2.76       |          | 2.76       |          | 4.14       |          | 5.52       |          | 5.52       |          | 4.34       |
| RT60 s       |                  |          | 7.0        |          | 7.0        |          | 4.7        |          | 3.5        |          | 3.5        |          | 4.5        |

## 2.8. Sabine

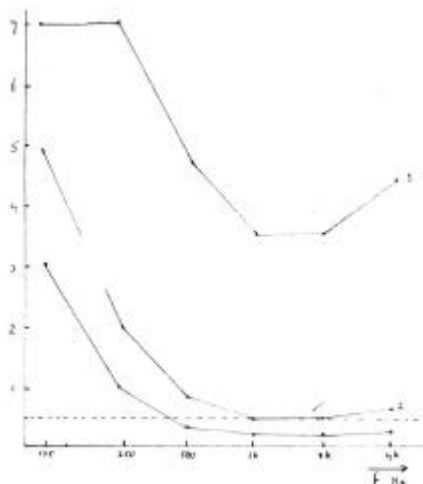
| Materiaal    | S m <sup>2</sup> | 125 Hz |      | 250 |      | 500  |      | 1k  |      | 2k  |      | 4k   |      |
|--------------|------------------|--------|------|-----|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|
|              |                  | α      | Sα   | α   | Sα   | α    | Sα   | α   | Sα   | α   | Sα   | α    | Sα   |
| Beton        | 40               | .01    | .4   | .01 | .4   | .015 | .6   | .02 | .8   | .02 | .8   | .02  | .8   |
| Stucwerk     | 118              | .02    | 2.36 | .02 | 2.36 | .03  | 3.54 | .04 | 4.72 | .04 | 4.72 | .033 | 3.54 |
| Sabinetotaal |                  |        | 2.76 |     | 2.76 |      | 4.14 |     | 5.52 |     | 5.52 |      | 4.34 |
| RT60 s       |                  |        | 7.0  |     | 7.0  |      | 4.7  |     | 3.5  |     | 3.5  |      | 4.5  |

$$RT60 (125\text{Hz}) = \frac{0,161 \times 120\text{m}^3}{2,72 S\bar{\alpha}} = 7,0\text{s}$$

Indien we in dezelfde ruimte het plafond isoleren met akoestische tegels dan krijgen we reeds heel andere waarden voor het midden en hoog gebied

| Materiaal    | S m <sup>2</sup> | 125 |      | 250 |      | 500  |       | 1k  |       | 2k  |       | 4k  |       |
|--------------|------------------|-----|------|-----|------|------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
|              |                  | α   | Sα   | α   | Sα   | α    | Sα    | α   | Sα    | α   | Sα    | α   | Sα    |
| Beton        | 40               | .01 | .4   | .01 | .4   | .015 | .6    | .02 | 0.8   | .02 | .8    | .02 | .8    |
| Stucwerk     | 78               | .02 | 1.56 | .02 | 1.56 | .03  | 2.34  | .04 | 3.12  | .04 | 3.12  | .03 | 2.34  |
| Tegels       | 40               | .05 | 2.0  | .2  | 8.0  | .56  | 22.4  | .95 | 38    | .93 | 37.2  | .74 | 29.6  |
| Sabinetotaal |                  |     | 3.96 |     | 9.96 |      | 25.34 |     | 41.92 |     | 41.12 |     | 32.74 |
| RT60 s       |                  |     | 4.9  |     | 1.9  |      | 0.8   |     | 0.5   |     | 0.5   |     | 0.6   |

## 2.8. Sabine



Wanneer we al deze waarden in kaart brengen zien wij dat de RT60 boven de 800Hz reeds dicht bij de stippellijn valt (streefwaarde). Hieruit blijkt dat deze tegels niet werken in het laaggebied, maar wel in het middengebied. Ook merkwaardig is dat het bedekken van enkel 1 vlak reeds heel wat verbetering kan geven. Indien we nu alle vlakken met dezelfde tegels zouden bedekken krijgen we waarden die we in de onderste grafiek zien.

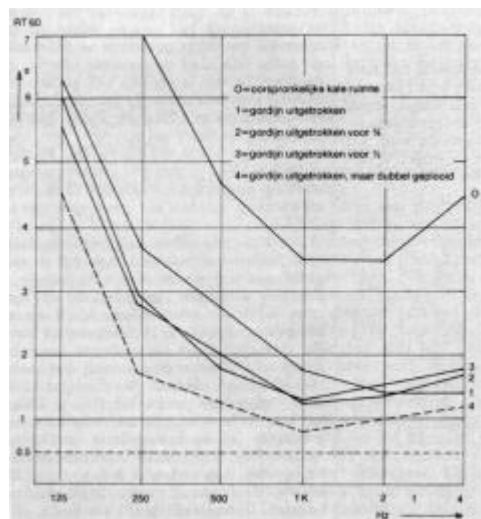
Dit is het duidelijkste bewijs dat je akoestische problemen niet zomaar kunt oplossen door alle vlakken vol akoestische panelen te gebruiken. Uiteindelijk wordt het resultaat alleen maar slechter.

## 2.8. Sabine - demping van gordijnen

Indien wij nu echter 1 vlak van onze lege ruimte met een gordijn (500gr / m<sup>2</sup>) aankleden krijgen we heel andere RT60 waarden. Bovendien kunnen we de oppervlakte van het gordijn aanpassen.

| Materiaal     | Sm <sup>2</sup> | 125            |                  | 250            |                  | 500            |                  | 1 k            |                  | 2 k            |                  | 4 k            |                  |
|---------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
|               |                 | $\bar{\alpha}$ | S $\bar{\alpha}$ | $\bar{\alpha}$ | S $\bar{\alpha}$ | $\bar{\alpha}$ | S $\bar{\alpha}$ | $\bar{\alpha}$ | S $\bar{\alpha}$ | $\bar{\alpha}$ | S $\bar{\alpha}$ | $\bar{\alpha}$ | S $\bar{\alpha}$ |
| Beton         | 40              | .01            | .4               | .01            | .4               | .15            | .6               | .02            | .8               | .02            | .8               | .02            | .8               |
| Stucwerk      | 94              | .02            | 1.88             | .02            | 1.88             | .03            | 2.82             | .04            | 3.76             | .04            | 3.76             | .03            | 3.1              |
| Totaal Sub    |                 |                | 2.28             |                | 2.28             |                | 3.42             |                | 3.56             |                | 3.56             |                | 3.9              |
| Gordijnen 4/4 | 24              | .03            | .72              | .12            | 2.88             | .15            | 3.6              | .27            | 6.48             | .37            | 8.88             | .42            | 10.08            |
| Totaal 1 Sa   |                 |                | 3.0              |                | 5.16             |                | 7.02             |                | 11.04            |                | 13.41            |                | 13.98            |
| RT60 1 s      |                 |                | 6.4              |                | 3.7              |                | 2.75             |                | 1.75             |                | 1.4              |                | 1.4              |
| Gordijnen 3/4 | 18              | .04            | .72              | .23            | 4.14             | .4             | 7.2              | .57            | 10.26            | .53            | 9.54             | .4             | 7.2              |
| Stucwerk      | 6               |                | .12              |                | .12              |                | .18              |                | .24              |                | .24              |                | .20              |
| Totaal 2 Sa   |                 |                | 3.12             |                | 6.54             |                | 10.8             |                | 15.06            |                | 14.34            |                | 11.3             |
| RT60 2 s      |                 |                | 6.2              |                | 2.95             |                | 1.8              |                | 1.3              |                | 1.35             |                | 1.7              |
| Gordijnen 2/4 | 12              | .07            | .84              | .37            | 4.44             | .49            | 5.88             | .81            | 9.72             | .65            | 7.8              | .54            | 6.48             |
| Stucwerk      | 12              |                | .24              |                | .24              |                | .36              |                | .48              |                | .48              |                | .4               |
| Totaal 3 Sa   |                 |                | 3.36             |                | 6.96             |                | 9.66             |                | 14.76            |                | 12.84            |                | 10.78            |
| RT60 3 s      |                 |                | 5.75             |                | 2.8              |                | 2.0              |                | 1.3              |                | 1.5              |                | 1.8              |
| RT60 kaal s   |                 |                | 7.0              |                | 7.0              |                | 4.7              |                | 3.5              |                | 3.5              |                | 4.5              |

## 2.8. Sabine - demping van gordijnen



We kunnen hetzelfde gordijn ook dubbel hangen, dan krijgen we onderstaande waarden (stippelijijn 4). Maar ook de afstand van gordijn tot muur is belangrijk voor de totale akoestiek. Damping heeft het meeste effect bij 1/4 golflengte van de muur. Nemen we bv. 7,5 cm van de muur dan krijgen we  $344/4 \times 0,075 = 1146\text{kHz}$ .

|           |      |       |       |      |       |      |
|-----------|------|-------|-------|------|-------|------|
| Totaal Sa | 3.96 | 11.16 | 15.18 | 24.0 | 20.16 |      |
| RT60 s    | 4.9  | 1.7   | 1.3   | 0.8  | 0.95  | 1.15 |

## 2.8 Sabine - demping van gordijnen

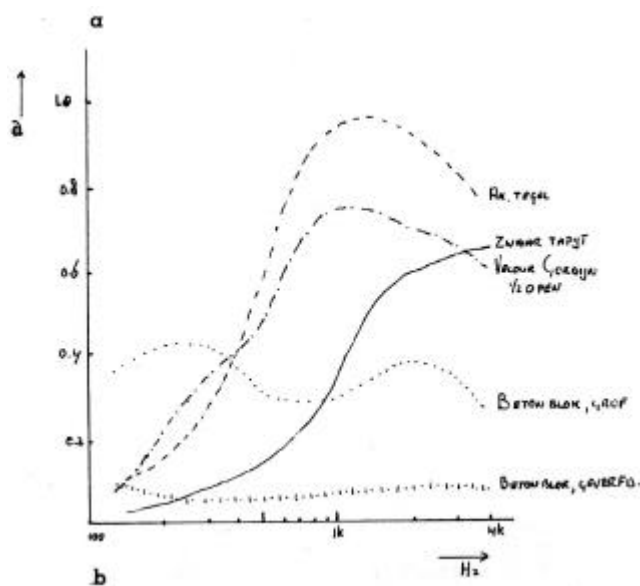
Een nog handiger methode is 2 rails met gordijnen achter elkaar te voorzien. Wanneer deze beiden dichtgetrokken zijn en de voorste hangt ongeveer 20 cm vóór de muur, dan werken ze als absorberend vlak voor frequenties vanaf 100Hz.

Uiteindelijk is het aanbrengen van gordijnen bepalend voor de akoestiek :

- hoeveelheid stof / strekkende meter
- de afstand tot de muur
- de soort stof
- de hoeveelheid m<sup>2</sup> het gordijn zal bedekken
- hoeveel lagen er achter elkaar hangen

Let wel : dit voorbeeld is een simulatie! Breng nooit absorberend materiaal aan op 1 vlak van de ruimte.

## 2.8 Sabine - demping



In deze tabel zien we een aantal waarden van diverse materialen

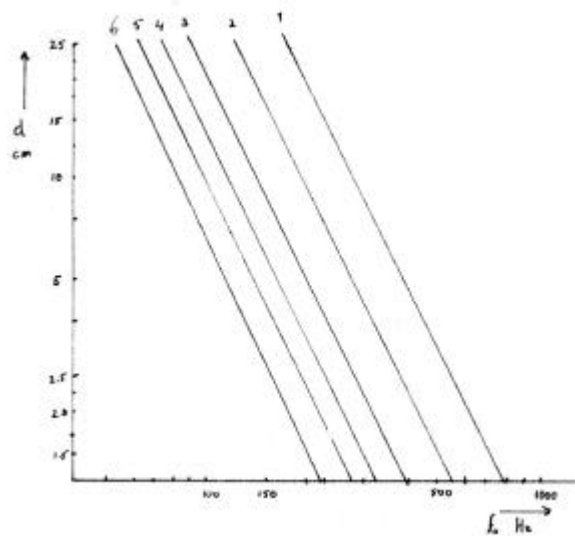
## 2.9. Sabine - demping lage tonen

De frequentie van een veer wordt bepaald door massa en stijfheid. Hoe zwaarder de veer, of hoe soepeler de veer des te langzamer wordt de veer. Dus om lage frequenties te krijgen hebben we massa nodig. Monteren we een dun paneel vóór een muur met een aangepaste luchtruimte tussen muur en paneel, dan krijgen we hetzelfde principe : de veerkracht van de afgesloten ruimte en de massa van het paneel.

De gebruikte formule :  $f_0 = \frac{599}{\sqrt{m \cdot d}}$

$f_0$  is de resonantiefrequentie,  $m$  de massa van het paneel,  $d$  is diepte van de luchtruimte

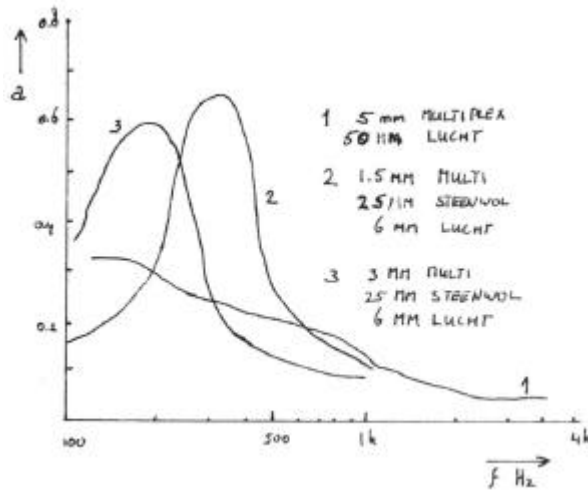
## 2.9. Sabine - demping lage tonen



We zien hiernaast een verband tussen massa en frequentie :

- 1 massa = 10,5kg/m<sup>2</sup>
- 2 massa = 21,8kg/m<sup>2</sup>
- 3 massa = 31,8kg/m<sup>2</sup>
- 4 massa = 42,7kg/m<sup>2</sup>
- 5 massa = 53,5kg/m<sup>2</sup>
- 6 massa = 65kg/m<sup>2</sup>

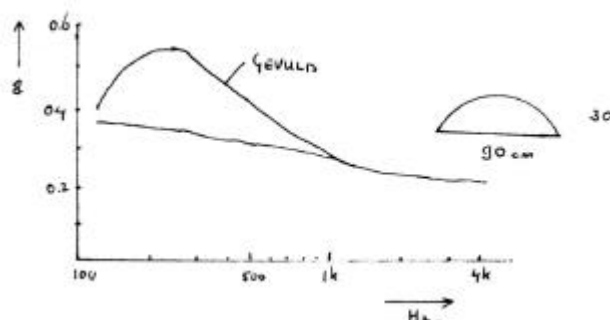
## 2.9. Sabine - demping lage tonen



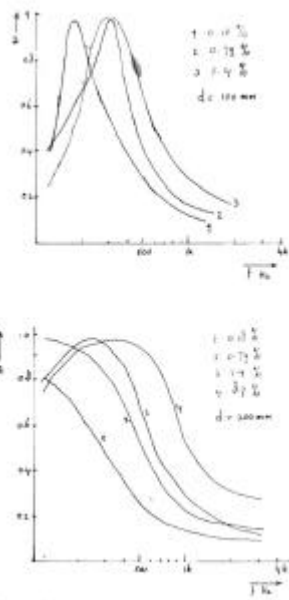
Deze grafiek geeft de absorptiecoëfficiënt weer voor drie verschillende paneeldiktes. Veel studio's worden met hardhouten wanden bezet. Indien dit hout in diffuse oppervlak aangebracht wordt krijgen we een betere spreiding in het hoog, wat het geluid ook diffuser maakt (beter)

## 2.9. Sabine - demping lage tonen - poly

Een veel terugkerend ontwerp in studio's is de Poly. In onderstaande tekening zien we de specifieke eigenschappen van een 30 bij 90cm poly. In het laag zien we een zeer groot verschil tussen een lege of volle poly. De ronde vorm accentueert het diffuse karakter van de ruimte.



## 2.9. Sabine - geperforeerde platen

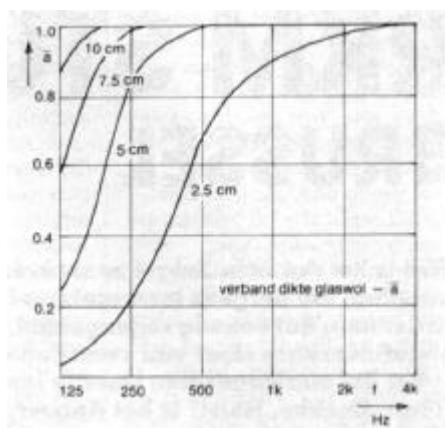


Ook geperforeerde platen kunnen als “laag-absorbeers”. De werking steunt op het principe van de *Helmholtz*-resonator. De gebruikte formule is de volgende :

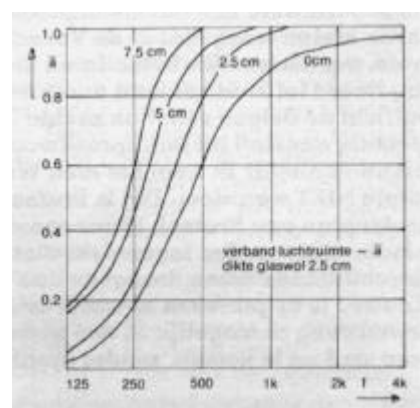
$$f_0 = 80 \sqrt{\rho/dt}$$

waarbij  $p$  = opp van alle openingen / totale opp x 100,  $d$  diepte van de luchtruimte in cm,  $t$  dikte paneel + ( 0,8 x openingdiameter ). Deze formule geldt alleen voor ronde gaten! In de grafiek 1 is het effect getekend van een paneel van 4mm dikte, de luchtdikte 100mm. Grafiek 2 is voor dezelfde plaat met een luchtdikte van 200mm.

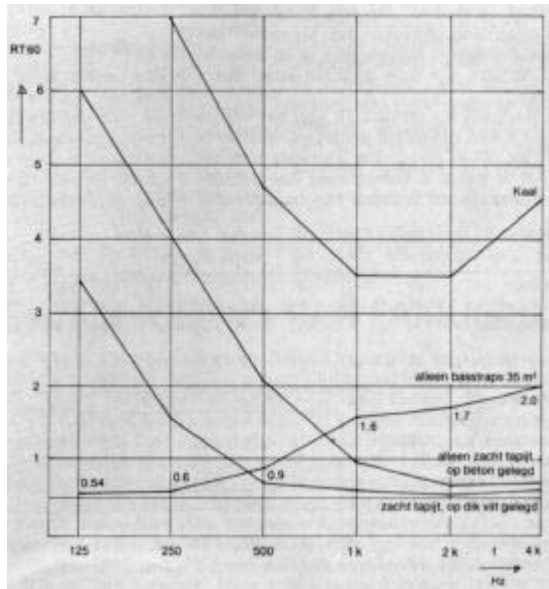
## 2.9. Sabine - rotswol diktes



In deze 2 grafieken zien we de invloed van de dikte ( figuur 1 ) en de afstand tussen de rotswol en de muur ( figuur 2 )

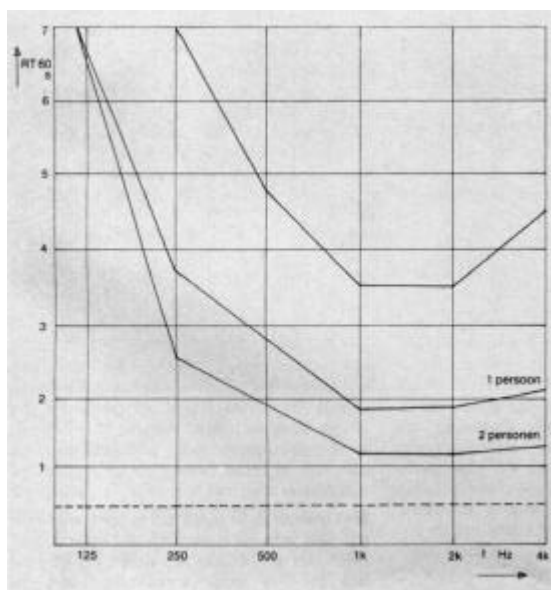


## 2.9 Sabine - tapijten



Bekleden we onze eerste ruimte met tapijt, dan krijgen we plots een veel betere RT60 in het laagmidden ( zie grafiek ). Ook de ondergrond van het tapijt speelt hierbij een grote rol. Let er wel voor op om niet alleen de vloer met dit tapijt aan te kleden, dit is het slechtste wat je kan doen. Om dit fenomeen te onderdrukken wordt soms een *anti-tapijt* gemaakt. Dit is een module die aan het plafond bevestigd wordt en zodanig berekend is om de werking van het tapijt te neutraliseren

## 2.9 Sabine - personen

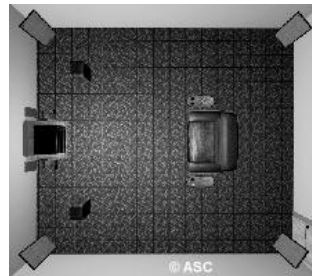
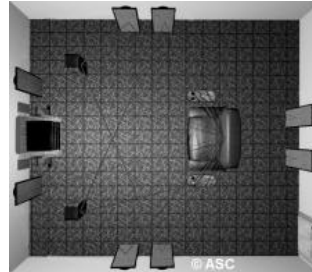


Ook de aanwezigheid van personen zal de RT60 van je ruimte ernstig beïnvloeden! Zie figuur . Maar ook al de rest van tafels, stoelen, kasten, zetels e.d. zullen de galmtijd aanpassen.

2.9. Sabine enkele voorbeelden van absorbers



ASC Planartrap



2.9. Sabine enkele voorbeelden van absorbers



ASC wallpanel



ASC tubetrap

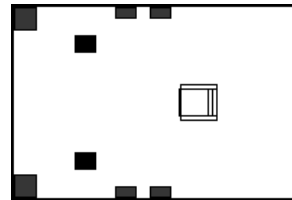


ASC monitortrap

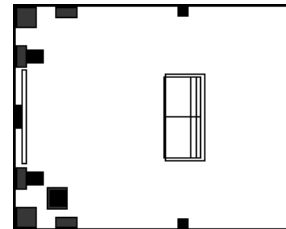
## 2.9. Sabine enkele voorbeelden van absorbers



ASC cornerstone



Hifi opstelling



Surround opstelling

## 3.0. Reflecties

Na het dempen moeten we rekening gaan houden met het reflecteren. Reflecteren hebben we nodig omdat we moeten zorgen voor een goede spreiding ( ook wel diffusie genoemd ) van het geluid. Er wordt gesteld dat indien je een goed geluid binnen een ruimte wil hebben, je binnen de RT60 minstens 100 reflecties van het oorspronkelijk geluid moet hebben.

Nemen we terug onze ruimte dan krijgen wij volgende Gemiddelde Vrije Weglengte :

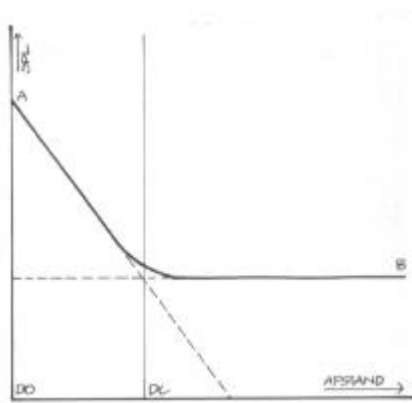
$$GVW : \frac{4V}{S} = \frac{4 \times 120m^3}{158m^2} = 3,04m$$

Onze ruimte had na de demping en het anti-tapijt een RT60 van 0,5s, dit geeft als gemiddeld aantal reflecties volgende formule :

$$NR : \frac{344 \times RT60}{GVW} = \frac{344 \times 0,5}{3,04} = 56,6$$

### 3.1. Reflecties - Kritische Afstand

We zien onmiddellijk dat we niet aan de gewenste 100 reflecties komen. Enerzijds zouden wij de GVW kunnen aanpassen, maar dan komen we aan een ruimte die 2 x de grootte van de eerste zou hebben. Om een andere manier van ruimtebeheersing te voorzien zullen we eerst moeten zoeken naar de Kritische Afstand.



Op de schets zien we het verband tussen de waargenomen geluidsdruk en de afstand tot de geluidsbron. A is geluidsdruk, B de galm voor een bepaalde ruimte. De plaats waar A in B overgaat is de Kritische Afstand uitgedrukt in  $D_c$ .

### 3.1. Reflecties - Kritische Afstand

De formule ziet er als volgt uit : 
$$D_c = 0,141 \sqrt{\frac{Q \bar{S}_a M}{N}}$$

Q staat voor de bundelinggraad van de geluidsbron,  $\bar{S}_a$  de totale absorptie in de ruimte, M de correctiefactor voor onregelmatige plaatsing van dempingmateriaal en N is het aantal extra geluidsbronnen.

Nemen we terug onze ruimte en zetten we een spreker met Q factor = 5 en M en N = 1, dan komen we uit op een  $D_c = 1,94m$ . Dit wil zeggen dat als je op 1,94m van de spreker staat, je het directe geluid en de galm even hard hoort. De signaal / stoorverhouding = 0dB.

Indien we de totale  $\bar{S}_a$  vergroten, zal ook de RT60 aangetast worden.

Als we bedenken dat de Q factor eigen is aan elke geluidsbron blijft enkel onze factor over om aan te passen.

### 3.1. Reflecties - M factor

Stellen we onze geluidsbron naast een raam dan zullen we een heel ander geluid krijgen dan wanneer deze naast dempingmateriaal staat. Deze typische invloed noemen we M. De formule ziet er als volgt uit :

$$M = \frac{1 - \bar{a}}{1 - \bar{a}_c}$$

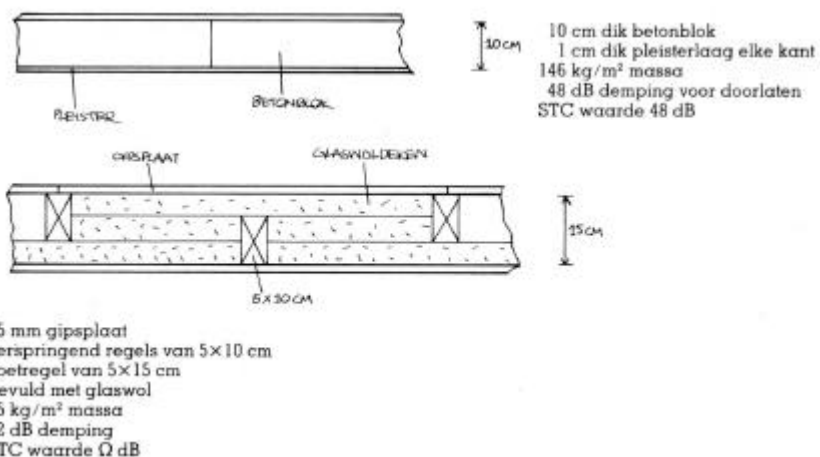
$\bar{a}$  is de gemiddelde absorptiecoëfficiënt,  $\bar{a}_c$  de absorptiecoëfficiënt binnen de uitstraling van de geluidsbron.

In ons voorbeeld laten we onze spreker tegen een plaat glaswol praten met  $a_c = 0,8$ , dan krijgen we volgende waarden :  $a = 38 / 158 = 0,24$   
Dus  $M = 0,76 / 0,2 = 3,8$ . Daaruit volgt dat  $D_c = 1,94 \sqrt{3,08} = 3,8m$  en dat is é maal zo groot. Dat wil zeggen dat de signaal / stoorverhouding sterk zal verbeteren.

Het reflecteren is bovendien zeer sterk afhankelijk van de frequentie. Hoe lager f, hoe makkelijker ze door de muur gaat en minder reflecteert. We wisten reeds dat we massa en stijfheid nodig hebben om de doorlaat-f te verlagen.

### 3.2. Diffusie

Een 3de factor is het meerlagen bouwen : een goede meerlagen constructie van verschillende materialen bij gelijke doorlaat-f heeft een veel kleinere massa. Dat zien we in de onderstaande figuur.



### 3.2 Diffusie - absorptie

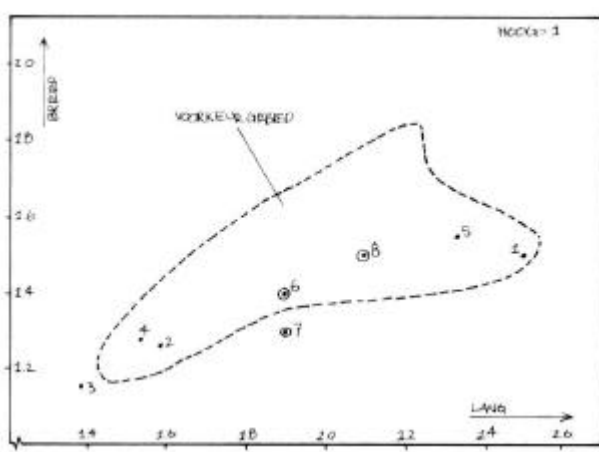
Beton met een massa van  $146\text{kg/m}^2$  heeft een STC waarde van 48dB, een stijve/lichte constructie heeft een massa van  $35\text{kg/m}^2$  en een STC waarde van 52dB. Bovendien zal de absorptie van de lage tonen bij de betonnen wand veel lager liggen dan bij de gipsplaat/glasvezel combinatie.

Stel nu dat je materiaal gebruikt met  $a = 0,5$  krijgen we 50% absorptie en... 50% reflectie. In dB's omgerekend krijgen we volgende waarden :  $0,5 = 3$  dB demping;  $0,8 = 7$  dB demping; veronderstel een waarde van 0,99 dan krijgen we een maximum demping van 20 dB.

In ons voorbeeld ging het ons juist om de reflectie. Deze reflectie zal verbeterd worden wanneer we onze ruimte meer diffuus maken. Bij berekeningen met verschillende vormen van diffusers is gebleken dat de rechthoek vorm de beste is, bovendien blijkt dat 4 diffusers van  $0,25\text{m}^2$  beter werken dan 1 diffuser van  $1\text{m}^2$ . Dit komt door het verschil in omtrek waaruit blijkt dat hoe meer weerkaatsing, hoe beter het geluid zal worden. In de handel bestaan speciale akoestische platen in piramide, of afgeknotte piramide, of de specifieke Illsonic vorm.

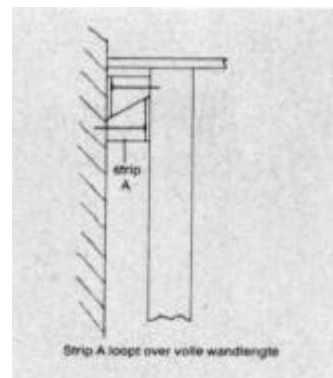
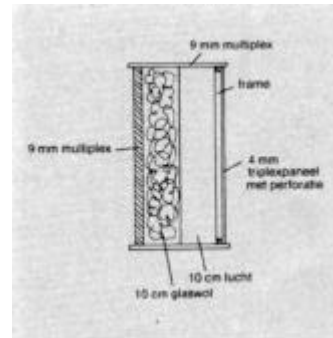
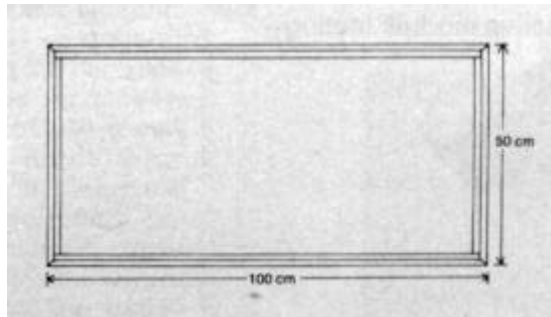
### 3.3 Samenvattend

Allerbelangrijkste factor in het maken van een ruimte is de verhouding van de wanden. In bijstaande figuur zien we een doorsnede van optimale gebieden.



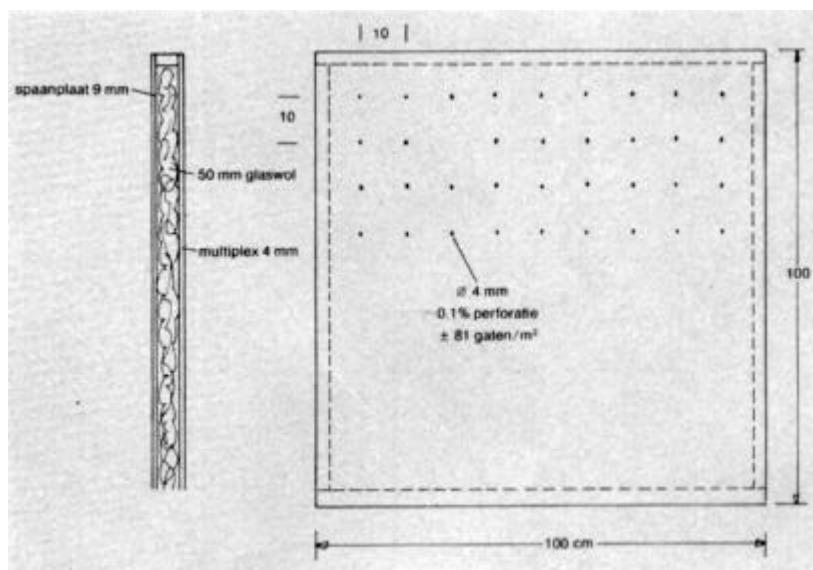
De hoogte heeft factor 1  
Verhoudingen 6 en 8  
zouden uitstekende  
waarden zijn. Let wel  
deze waarden zijn ook  
deels modegebonden.  
Je moet zelf eens zien  
waar onze  
voorbeeldruimte  
gesitueerd is

### 3.4. Absorber

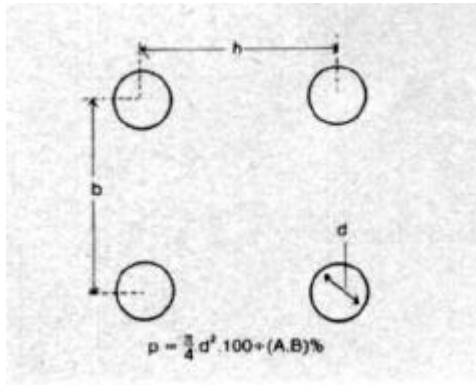


Enkele tekeningen van absorbers.

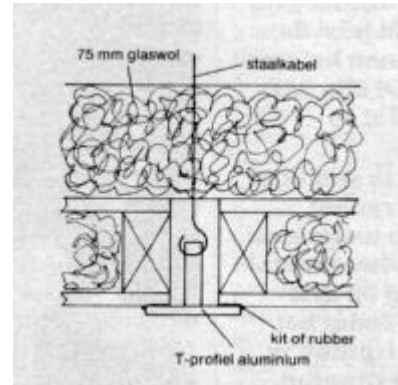
### 3.4. Absorber



### 3.4. Absorber

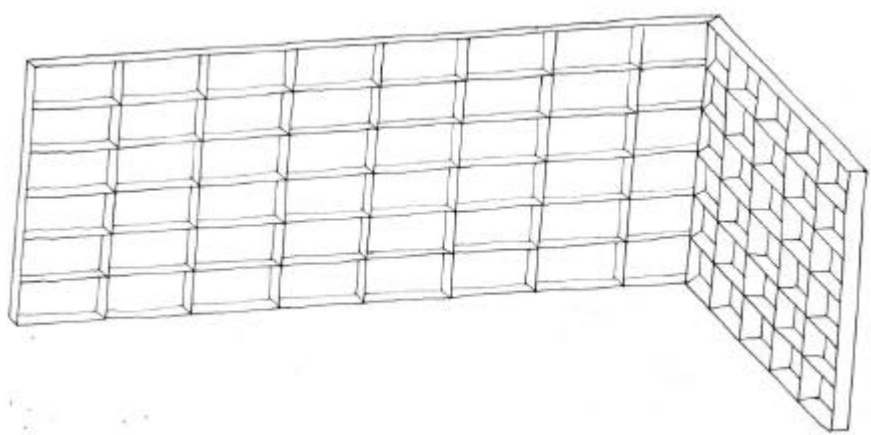


De formule om de perforatiegraad te berekenen



Het anti-tapijt

### 3.4. Diffuser



In de tekening zie je een voorbeeld van een zelf te maken diffuser.

