



## SAMENVATTING

### Akoestische voorwaarden voor concertzalen en/of theaters

#### 1. Nagalmtijd $T$

Sabine:  $T = 1/6 V/A$

met

$V$  = volume in  $m^3$

$A = \alpha_p A_p + \sum_I \alpha_i A_i$

Waarbij

$\alpha_p$  = absorptiecoëfficiënt publiek per oppervlakte eenheid

$A_p$  = oppervlakte bezet door publiek en orkest inclusief gangpaden tot 1 m rondom bezeten oppervlak

$\alpha_i$  = absorptiecoëfficiënt van andere vlakken, zoals wanden, plafond, etc.

$A_i$  = de bijbehorende oppervlakken

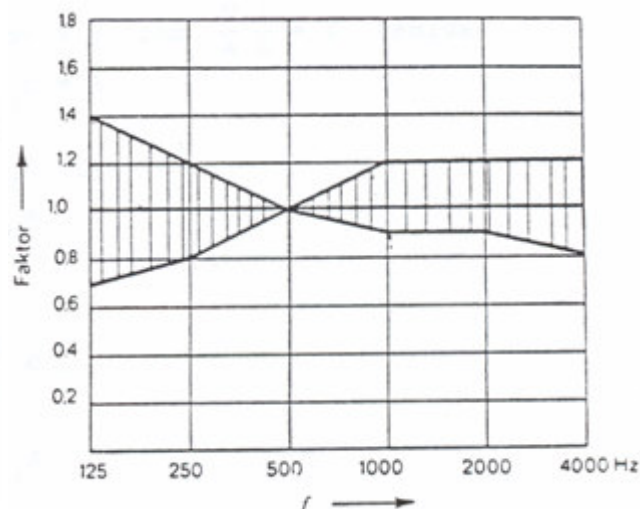
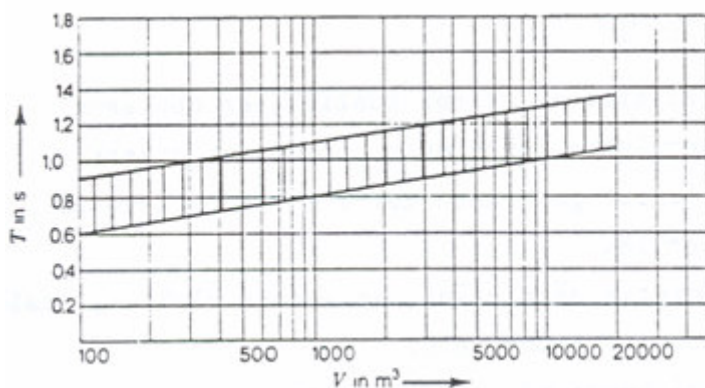
Nu  $\alpha_p A_p + \sum_I \alpha_i A_i$  schrijven als  $\alpha_{eq} A_p$ , zodat

$$\alpha_{eq} = (\alpha_p A_p) + (\sum_I \alpha_i A_i) / A_p = \alpha_p + \sum_I \alpha_i (A_i) / (A_p)$$

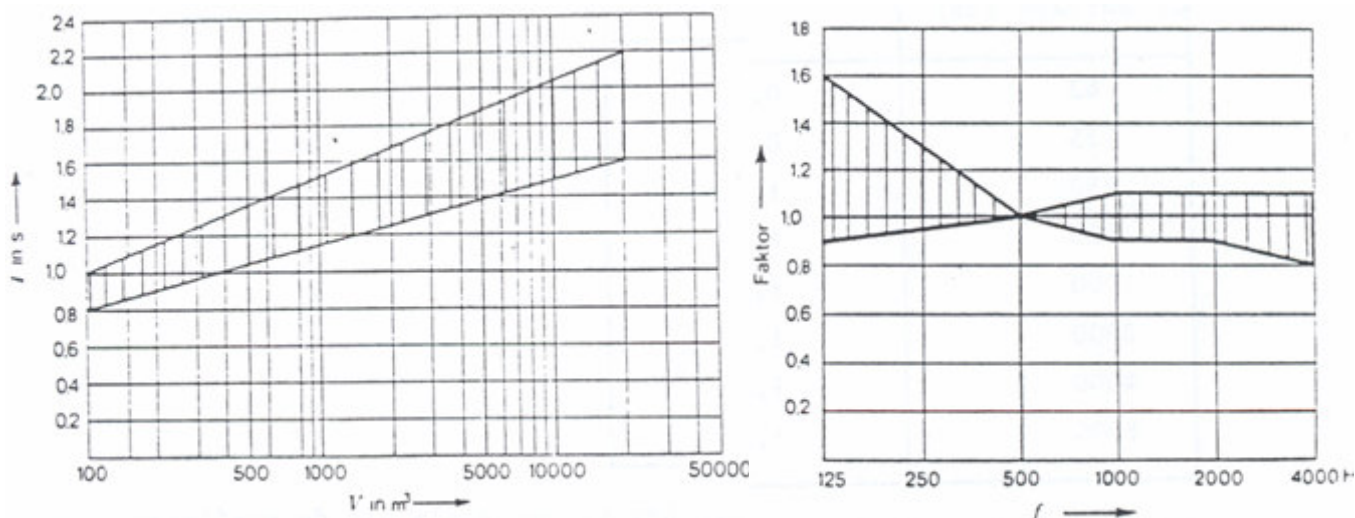
Door nu voor bestaande zalen, die akoestisch "goed" zijn, uit te rekenen welke waarde  $\alpha_{eq}$  krijgt in de verschillende frequentiebanden blijkt  $\alpha_{eq}$  om alle gevallen ongeveer dezelfde waarde te krijgen.

octaafband Hz	$\alpha_{eq}$ in %
63	0,80 ± 0,10
125	0,90 ± 0,10
250	1,00 ± 0,09
500	1,05 ± 0,06
1000	1,09 ± 0,07
2000	1,15 ± 0,07
4000	1,29 ± 0,08
8000	1,51 ± 0,16

Verder hangt de optimale nagalmtijd af van het volume zoals uit onderstaande grafieken blijkt.



Theaters



### Concertzalen

Wanneer nu een zaal ontworpen moet worden voor bijvoorbeeld 2000 bezoekers, is het bezeten oppervlak  $A_p$  bekend, stel  $1800 \text{ m}^2$  incl. podium  
 (per rijafstand publiek: min 0,9 m horizontaal, stoelbreedte 0,5 – 0,6 m  
 min 0,1 – 0,12 verticaal

Iteratief kan dan de optimale gemiddelde hoogte  $h$  worden bepaald.

$$\text{Immers: } T_{500} = 1/6 V / (\alpha_{\text{eq}} A_p) = 1/6 \{h A_p / (\alpha_{\text{eq}} A_p)\} = 1/6 h / \alpha_{\text{eq}}$$

Indien een bepaalde  $h$  wordt gekozen, volgt daaruit een te verwachten  $T_{500}$ , die in overeenstemming moet zijn met de optimale  $T_{500}$  uit de grafieken. Daarna kan bij die hoogte nagegaan worden hoe het voor de andere octaafbanden ligt. Er zal zeer waarschijnlijk in het laag additionele absorptie nodig zijn in de vorm van paneelresonatoren: zorg dat daar ruimte voor is.

Te groot volume:

- Extra volumekosten
- Extra absorptiekosten
- Later aankomende reflecties
- Te weinig direct geluid

Te klein volume:

- Te lage nagalmtijd, niets meer aan te doen

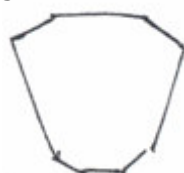
Na de uitwerking van het definitieve ontwerp kan met  $T = 1/6 V / (A + 4mV)$  aan de hand van werkelijk toegepaste materialen de werkelijk te verwachten nagalmtijd worden gerekend. Door toepassing van eventueel benodigde additionele absorptie kan deze nagalmtijd nog worden aangepast.

Neem voor  $m$ : 0,002 bij 2000 Hz  
 0,007 bij 4000 Hz  
 0,012 bij 8000 Hz

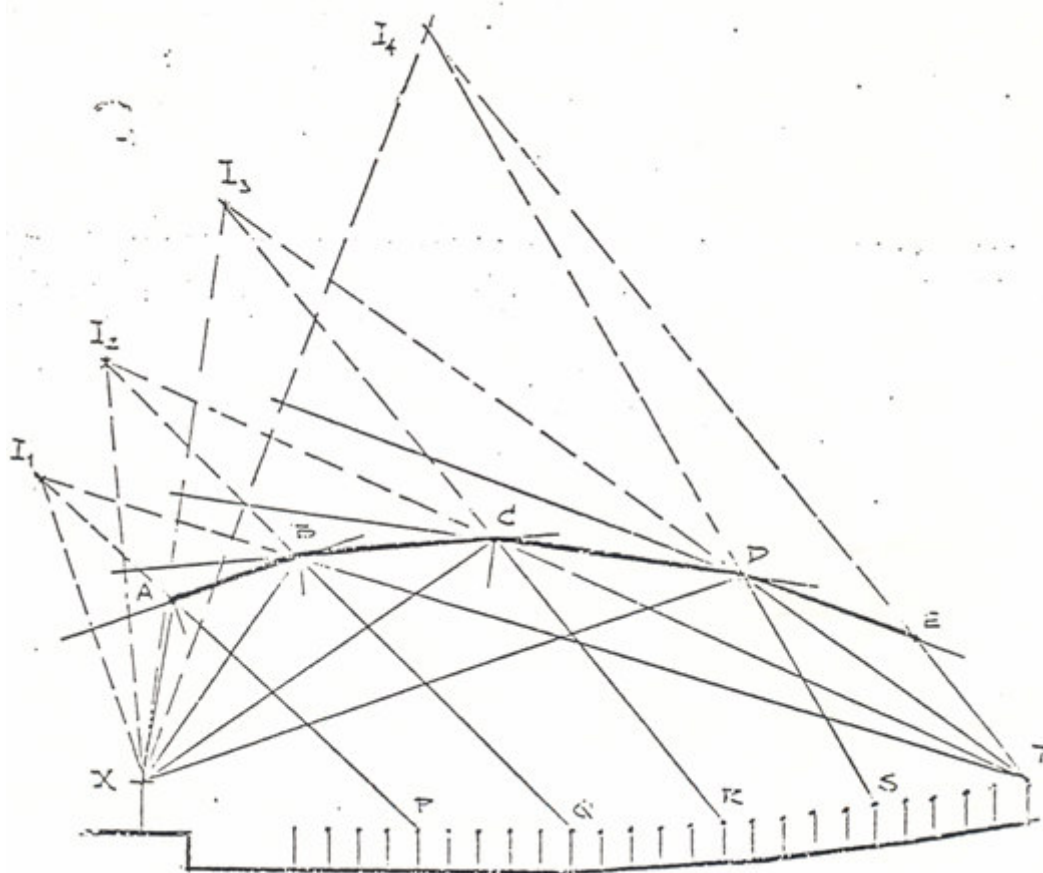
Voor absorptiecoëfficiënt: zie Tabellarium.

2. Goede zichtlijnen: verticale verspringing van minstens 0 – 12 cm tussen 2 bezoekersrijen.

3. Goede plattegrond: zie gc43 fig.42



4. Goede vorm van het plafond: zie onderstaand voorbeeld, waarop de vorm van een plafond kan worden geconstrueerd.



Ga uit van zaalvloer. Hierin geluidsbron X en enkele toeschouwers P t/m T waarvan T de achterste. Neem de plafondhoogte aan bij een punt A. Zoek plaats waar de eerste reflectie nodig is (P). Dan is XAP de geluidsweg. Het paneel staat loodrecht op de bisextrice van hoek XAP, terwijl het akoestisch spiegelbeeld  $I_1$  van bron X nu te construeren is. Zoek de laatste plaats uit waar deze reflectiestand gewenst is (bijv. T) en trek  $I_1 B T$ , waarbij B het 1<sup>e</sup> knikpunt van het plafond is. Trek nu weer QB en BX etc. etc.

5. Voldoende direct geluid.  
 Tot het directe geluid dragen ook die reflecties bij die binnen 30 ms. na het directe geluid worden ontvangen, dus reflecties met een omweg van  $0,03 * 340 \approx 10$  m.  
 In het algemeen kan worden gesteld dat er voldoende direct geluid zal zijn indien:
- Er goede zichtlijnen zijn,
  - Zwaartepunt van het publiek niet verder dan 25 m van podiumcentrum of plaats spreker is verwijderd
  - Zaalvloer enigszins hellend is, podium iets verhoogd
- NB.- liefst geen balkons of ondiepe
- max. afstand podium tot achterste stoelen: 50 m.
6. Niet te hoog achtergrondniveau.  
 Voor stoorgeluid: NR25(-20) aanhouden.
7. Voldoende diffusiteit.  
 Diffusiteit kan worden bereikt door aanbrengen geluidverstrooiende oppervlakken.  
 Grootste diffusoren met afmeting ca. 2,50 m  
 Kleinste diffusoren met afmeting ca. 0,10 m



8. Voldoende indirect geluid.
- Goede nagalmtijd (zie 1),
  - Reflecties van 30 – 70 ms dragen hiertoe bij, langer mag ook nog wel, maar in elk geval omweg < 100 ms, anders echo,
  - Geen holle oppervlakken, wel bolle oppervlakken.

## 5. Zaalakoestiek

### 5.1 Inleiding

In feite dient elke ruimte die bestemd is voor de overdracht van het gesproken woord of muziek aan minimale eisen op het gebied van de akoestiek te voldoen.

Liggen deze eisen echter niet te hoog, dan wordt er vrijwel automatisch aan voldaan zonder speciale maatregelen bij ontwerp en realisatie. Woonruimten die om akoestische redenen mislukt zijn komen praktisch nooit voor. Anders is dit bij de bouw van een schouwburg, een concertzaal of een combinatie van beide.

De bouwfysische eisen in het bijzonder wegen zo zwaar, dat hiermede reeds in het eerste ontwerpstadium rekening moet worden gehouden!

Al voldoet een zaal aan vele voorwaarden, zoals een goede architectuur, een goed zicht op het podium en een behaaglijk klimaat; als de akoestiek van de zaal niet deugt kan deze worden beschouwd als een mislukking.

De akoestische kwaliteiten van een ruimte kunnen niet alleen op basis van fysische eigenschappen worden beoordeeld. Het eindoordeel is van subjectieve aard, zelfs de deskundigen zijn het lang niet altijd met elkaar eens!

Problemen in de beoordeling doen zich vooral voor bij concertzalen. Voor kleinere ruimten die uitsluitend zijn bedoeld voor overdracht van het gesproken woord ligt de zaak wat eenvoudiger. De eis is dan duidelijker te formuleren, namelijk dat het gesproken woord goed verstaanbaar moet zijn! Hiervoor zij betrekkelijk eenvoudige regels aan te geven. Verwezen moge worden naar DIN 18041 "Horsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen".

### De logatoomverstaanbaarheid

Hoewel een "echte" meting door een erkend instituut, als de zaal klaar is, kan vaststellen of inderdaad een goede verstaanbaarheid bereikt is, bestaat er toch ook een simpele testmethode die door iedereen kan worden uitgevoerd. Dit is de bepaling van de zogenaamde *logatoomverstaanbaarheid*.

Hiertoe laat men een aantal proefpersonen zo gespreid mogelijk plaats nemen in de zaal. Vanaf het podium spreekt iemand met duidelijke stem en constante luidheid een groot aantal nonsenslettergrepen uit, bijvoorbeeld kek, war, gun, dil, de zogenaamde logatomen.

De proefpersonen schrijven de lettergrepen op zoals zij die verstonden. Na afloop wordt het percentage goed verstane logatomen bepaald. Dit percentage heet de logatoomverstaanbaarheid. Indien meer dan 80% goed wordt verstaan, is de zaal uitstekend; 60-80% verstane lettergrepen kwalificeren de zaal als matig; ≤ 50% als slecht.

### Voorwaarden voor een goed zaalontwerp

Om een zaal bruikbaar te doen zijn voor goed verstaan van het gesproken woord en/of voor het genieten van muziek moet aan de volgende voorwaarden worden voldaan:

1. een bij het volume en het gebruik meest gunstige nagalmtijd;
2. een niet te hoog niveau van storend achtergrondgeluid;
3. goede zichtlijnen, hetgeen wil zeggen dat alle aanwezigen goed zicht moeten hebben op het podium;
4. een goede vorm, waardoor echo's worden vermeden en een goede geluidsverdeling ontstaat;
5. voldoende direct geluid;

6. voldoende verstrooiing van het geluid;

Hiermede wordt de basis gelegd voor een geslaagd zaalontwerp. Het voldoen aan de voorwaarden geeft echter nog geen garantie voor de subjectieve begrippen die gekoppeld zijn aan de muziekweergave, zoals:

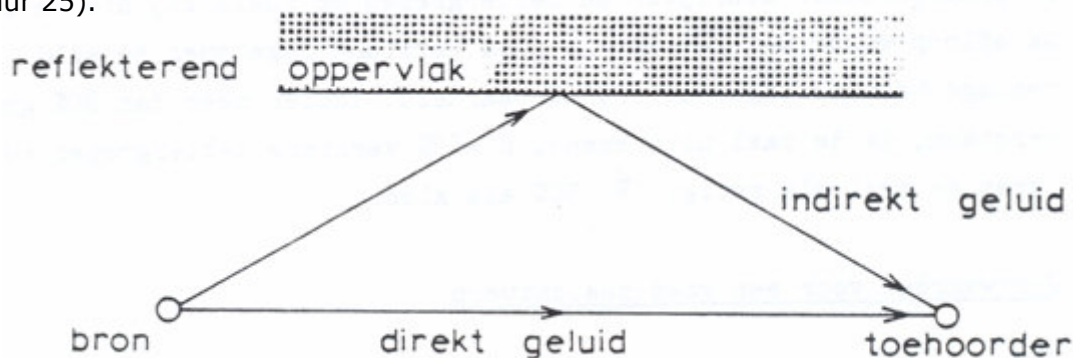
- volheid van toon;
- warmte van het geluid;
- glans van de klank;
- het al of niet droog klinken van de tonen;

Door Beranek is een aantal begrippen gedefinieerd waarmee de akoestische kwaliteiten van een ruimte min of meer fysisch omschreven kunnen worden.

## 5.2 Het directe geluid

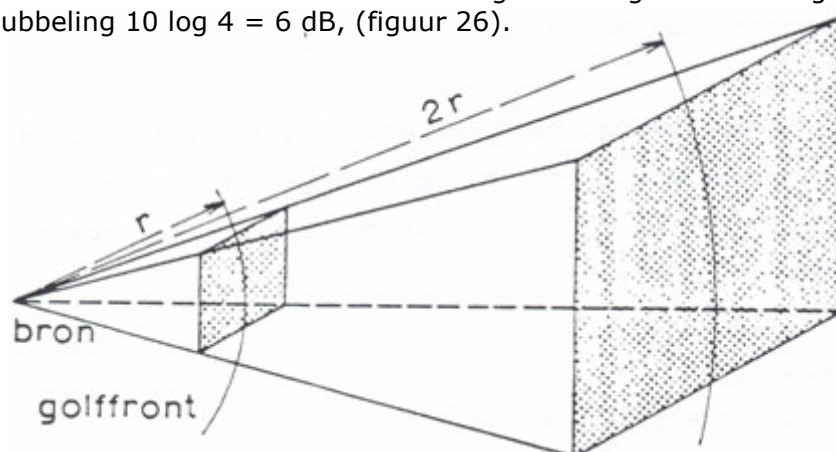
Voor een spreekzaal is het van belang dat zoveel mogelijk nuttig geluid het oor van de luisteraar treft. Het van de spreker afkomstige geluid bereikt het oor ten dele rechtstreeks (direct geluid), ten dele via reflecties van plafond en wanden (indirect geluid).

Wordt de omweg die het indirecte geluid maakt te groot, dan bereikt dit de luisteraar te laat waardoor men het gesprokene dubbel gaat horen en onduidelijkheid optreedt, (figuur 25).



*Figuur 25  
De weg van de bron naar de toehoorder*

De geluidsenergie die door een geluidsbron wordt uitgestraald beweegt zich in de vorm van golffronten via rechte lijnen van de geluidsbron af. Men noemt dit wel geluidsstralen. Voor de puntvormige geluidsbron geldt dezelfde theorie als voor de puntvormige lichtbron. Bij verdubbeling van de afstand tot de bron verdeelt de energie zich over een viermaal zo groot oppervlak; de geluidsintensiteit verhoudt zich omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. De verzwakking van het geluid bedraagt daarom bij afstandsverdubbeling  $10 \log 4 = 6 \text{ dB}$ , (figuur 26).



*Figuur 26  
Afname van de geluidsintensiteit bij verdubbeling van de afstand*

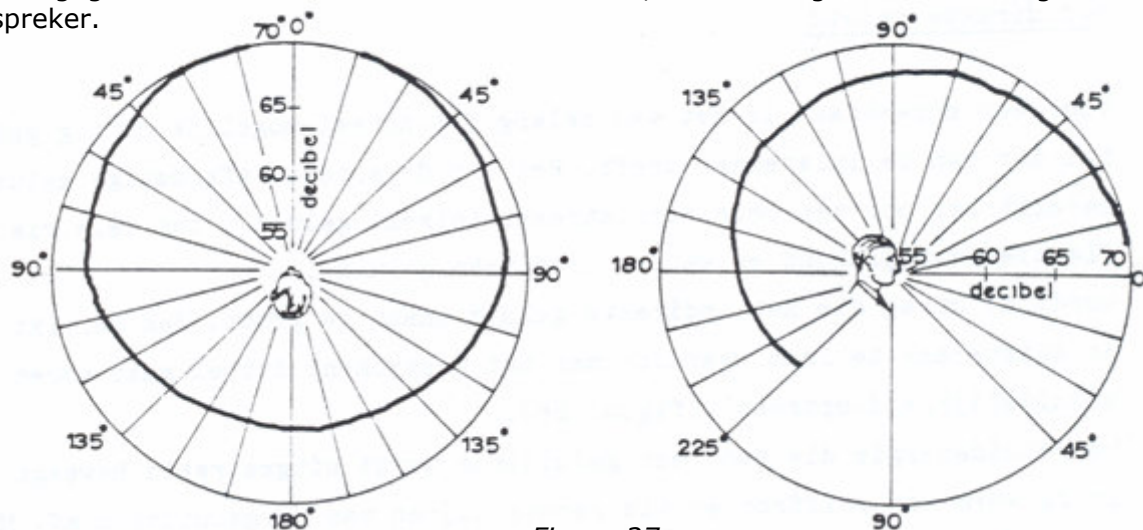
Het geluidsdrukkniveau op 1 m voor de mond van een spreker bedraagt ongeveer 70 dB. Voor andere afstanden ontstaan de volgende waarden, aannemende dat geen indirect geluid aanwezig is (tabel 9).

Tabel 9

afstand vóór de spreker (m)	geluidsdrukkniveau (dB)
1	70
2	64 <sup>-6</sup>
4	58 <sup>-6</sup>
8	52 <sup>-6</sup>
16	46 <sup>-6</sup>
32	40 <sup>-6</sup>

Naarmate men verder af is van de bron wordt de verzwakking geringer.

Een geluidsbron straalt in het algemeen niet in alle richtingen evenveel energie uit, elke geluidsbron heeft een richtkarakteristiek. In figuur 27 zijn de richtkarakteristieken weergegeven in het horizontale en verticale vlak, zoals deze gelden voor een gemiddelde spreker.



Figuur 27  
Richtkarakteristiek in het horizontale en verticale vlak

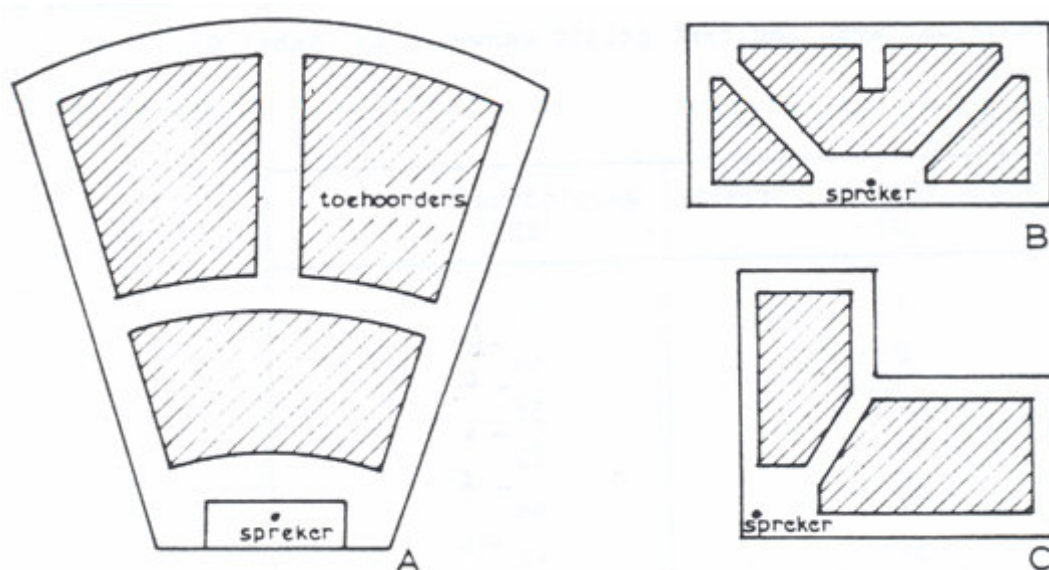
Hier wordt duidelijk gedemonstreerd dat de meeste geluidsenergie naar voren gaat. Hetzelfde geldt voor sommige muziekinstrumenten zoals de trompet en andere blaasinstrumenten.

De richtkarakteristiek toont aan welke opstelling de toehoorder dient in te nemen ten opzichte van de geluidsbron. Een tapsvormige zaalplattegrond groepeerd de toehoorders aan de kant van de spreker waar deze de meeste geluidsenergie afgeeft, (figuur 28A). De plattegronden volgens figuur 28B en 28C zijn vanzelfsprekend veel minder aan te bevelen. Deze vormen komt men tegen in de kerkbouw.

In werkelijkheid plant de geluidsenergie zich niet altijd rechtlijnig voort. Wordt de straalsgewijze uitbreiding van het geluid onderbroken door een obstakel, bijvoorbeeld een kolom, dan hangt het van de afmetingen van dit obstakel af of het geluid wordt gereflecteerd of er omheen buigt.

Is het voorwerp groot in vergelijking met de golflengte van het betreffende geluid, dan wordt het geluid gereflecteerd. Is de kleinste afmeting van het voorwerp klein in vergelijking met de golflengte, dan buigen de geluidsgolven er omheen, (figuur 29).

In een muziekzaal is sprake van een breed frequentiegebied liggend tussen 100 Hz. en 10.000 Hz. Dit komt overeen met golflengten tussen 3,4 m en 0,034 m; variërend van enkele meters tot enkele centimeters.



Figuur 28

A. Goede plattegrond voor een spreekzaal  
 B en C. Minder goede plattegronden voor een spreekzaal

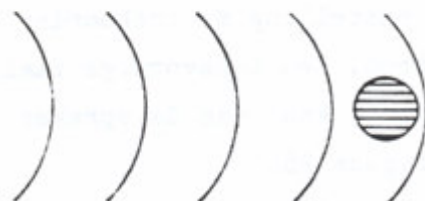
Men zal in het vrije veld (geen reflecties aan wanden) achter een obstakel met een dikte van bijvoorbeeld 0,50 m weinig hoge tonen horen. Voor hoge tonen is men dan aangewezen op de gereflecteerde geluidsgolven uit de naaste omgeving, die in een zaal wel, maar in het vrije veld niet aanwezig zijn.

Dit verschijnsel is te vergelijken met het volgende voorbeeld.

Men steekt in water met kleine golfjes een dikke stok. De golfjes zullen door de stok worden gereflecteerd, terwijl achter de stok een golfschaduw ontstaat. Bij grote golven zal men aan het golfpatroon nauwelijks verandering constateren indien een dunne stok in het water wordt gestoken, de golven buigen er ongehinderd omheen.



$\lambda$  geluid  $\ll$   $\phi$  kolom:  
 er ontstaat reflectie.



$\lambda$  geluid  $\gg$   $\phi$  kolom:  
 de geluidsgolven buigen  
 om het obstakel heen.

Figuur 29

Invloed van een kolom op de geluidsgolven

Op plaatsen in een geluidsschaduw zal aan de klankkleur iets gaan mankeren door het tekort aan hoge tonen. De verstaanbaarheid van het gesproken woord zal daardoor ongunstig worden beïnvloed.

Er doet zich in zalen nog een ander buigingsverschijnsel van de geluidsgolven voor. Dit verschijnsel hangt samen met de geluidsabsorptie door het publiek. Strijkt het geluid van een spreker dicht over het publiek, dan hebben de lage en middelhoge tonen door de

vermelde oorzaak de neiging, in het publiek te buigen. De toehoorders fungeren in feite als obstakels, (figuur 30).



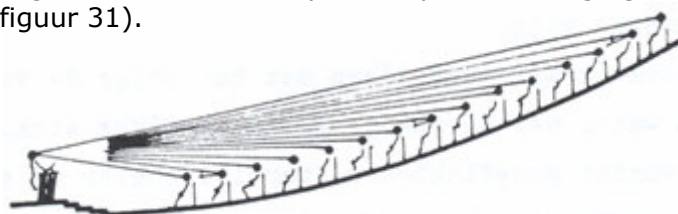
*Figuur 30*

*Hoge tonen gaan over de toehoorders heen.*

Voor de middelhoge tonen, die dus in het publiek buigen, worden door dit publiek sterk geabsorbeerd. Naarmate men zich verder achterin de zaal bevindt zal de sterkte van het geluid met middelhoge frequentie sneller afnemen dan normaal, er treedt verschuiving van de klankkleur op.

Voor een vlakke zaal kan deze extra verzwakking wel oplopen tot  $0,5 \text{ dB/m}^1$ . Voor een publiek met een diepte van 20 m, gerekend van voorste tot achterste rij, zou dit een extra verlies kunnen geven van 10 dB.

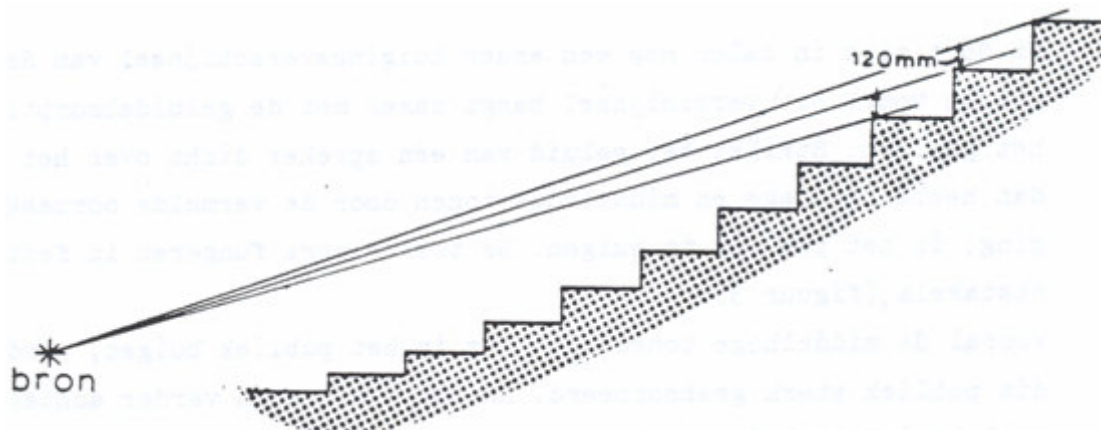
Aan deze moeilijkheid kan men ontkomen door het publiek onder een helling op te stellen: "goed zien is goed horen", of als spreker op een verhoging te gaan staan (speakerscorner), (figuur 31).



*Figuur 31*

*Een oplopende zaal geeft verbetering van de verstaanbaarheid.*

Ter oriëntatie kan worden aangenomen dat de helling zodanig wordt gekozen, dat de ooghoogte van elke volgende rij tenminste 0,12 m hoger is ten opzichte van de voorgelegen rij. Dit komt ongeveer overeen met de afstand oog-kruin, (figuur 32).



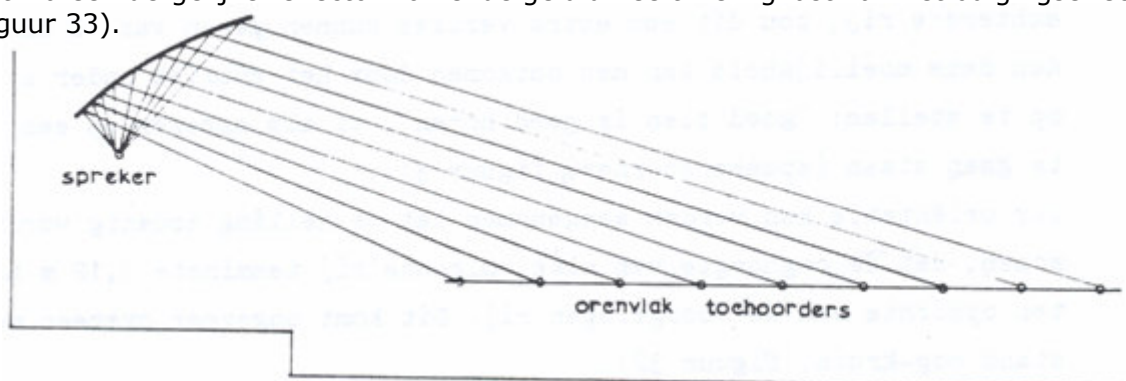
*Figuur 32*

*Het bepalen van de helling in een zaal.*

### **Conclusies over het directe geluid:**

1. Plaats de toehoorders zo dicht mogelijk bij de bron en wel aan die zijde van de geluidsbron waar deze de meeste geluidsenergie afgeeft.
2. Plaats de toehoorders niet in een geluidsschaduw, dus niet achter kolommen maar evenmin achter elkaar. In verband met dit laatste plaatse men deze op een helling of op voldoende hoogte boven het orenvlak.

Tenslotte kan worden vermeld dat in een vlakke zaal verbetering optreedt door het aanbrengen van een goed gevormde klankkaatsers boven de spreker. Het via een dergelijke reflector komende geluid heeft weinig last van het buigingseffect, (figuur 33).

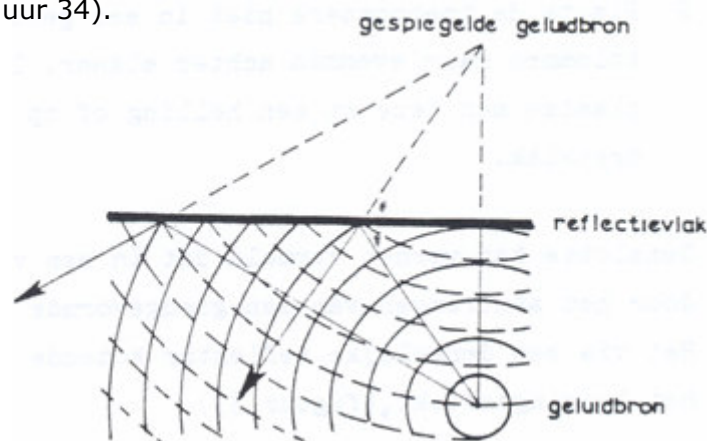


Figuur 33  
Het toepassen van een klankkaatsers boven de spreker

### 5.3 Het indirecte Geluid

Indien van een bron uitgaande geluidsgolven een begrenzingvlak van de ruimte treffen zullen zij daar worden gereflecteerd. Een hoge mate van geluidsabsorptie doet de reflectie gepaard gaan met veel energieverlies; de gereflecteerde geluidsgolf zal aanzienlijk verzwakt zijn. Een sterk reflecterend oppervlak daarentegen weerkaatsst de geluidsgolf bijna onverzwakt.

De reflectie kan op verschillende manieren plaatsvinden, afhankelijk van grootte en oppervlaktestructuur van het vlak in relatie tot de golflengte van het betreffende geluid. Tegen een vlakke wand reflecteert geluid als licht in een spiegel, dus volgens de kaatsingswet, (figuur 34).



Figuur 34  
Weerkaatsing van het geluid tegen een vlakke wand

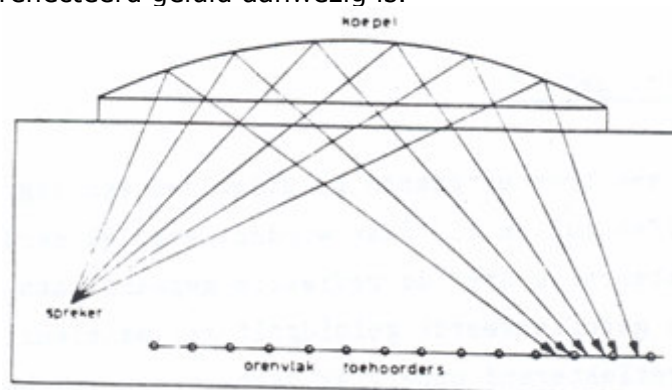
Aangegeven wordt hoe men de weerkaatsing kan tekenen door gebruik te maken van de geluidsstralen. Tevens zijn enige golffronten getekend. Maakt men de oppervlakte steeds kleiner dan zullen op een gegeven moment de lage tonen niet meer op deze wijze worden gereflecteerd. Tenslotte worden ook de hoge tonen op een andere manier teruggekaatsst.

Dit gebeurt wanneer de golflengte van het betreffende geluid groot wordt in verhouding tot de afmetingen van het oppervlak. De geluidsgolven buigen om het vlak heen; het geluid wordt minder gericht doch meer verstrooid (gediffuseerd) teruggekaatsst.

Dit verschijnsel treedt ook op als men een groot oppervlak verdeelt in een aantal kleinere, verschillend gerichte vlakken. Is de golflengte groot in verhouding tot de afmetingen van de vlakjes, dan wordt het geluid gereflecteerd als bij één groot

oppervlak. Geluiden met kleine golflengten worden door de verschillend gerichte vlakjes verstrooid, daar elk vlakje een opvallende geluidsgolf normaal reflecteert. Er ontstaan kleine bundels geluid die in verschillende richtingen worden teruggekaatst, er is sprake van een diffuserend oppervlak. Geluidsdiffusie treedt pas op bij oneffenheden van tenminste 30 mm en dan nog slechts voor de hoogst hoorbare frequenties. De fijne oppervlaktestructuur die gericht licht volledig verstrooit heeft dus geen enkele invloed op het opvallende geluid. Dit komt door het grote verschil in grootte-orde tussen geluids- en lichtgolven.

Met behulp van de uit de optiek bekende reflectiewetten kan de loop van de geluidsenergie door de ruimte worden gevolgd. Hiermede kan worden gezocht naar een juiste vormgeving van de ruimte en kunnen de richting van wand- en plafondvlakken zodanig worden vastgesteld dat op gebieden met te weinig direct geluid een aanvulling met doelmatig gereflecteerd geluid aanwezig is.

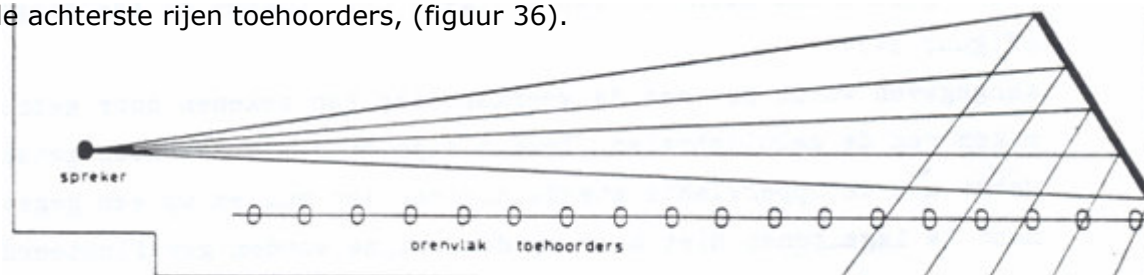


*Figuur 35*

*Holle oppervlakken kunnen geluidsconcentraties veroorzaken*

Echo's zullen meestal pas hinderlijk zijn als meerdere vlakken samenwerken tot de vorming hiervan, of als er een holle oppervlakte aanwezig is die op een bepaalde plaats geluidsconcentraties geeft die te laat aankomen, (figuur 35). Algemeen kan worden gesteld dat het verschil in weglengte tussen direct geluid en indirect geluid niet groter moet zijn dan 17m; dit betekent een vertraging van 50 milliseconden. Dit maximale verschil in weglengte kan worden aangehouden indien direct geluid en indirect geluid uit dezelfde richting komen. Komt het indirecte geluid uit de tegengestelde richting dan dient het wegverschil nog kleiner te zijn.

Een voorbeeld hiervan is het toepassen van een schuine achterwand die het geluid dat anders door de achtermuur zou worden teruggekaatst in de gehele zaal nu reflecteert op de achterste rijen toehoorders, (figuur 36).

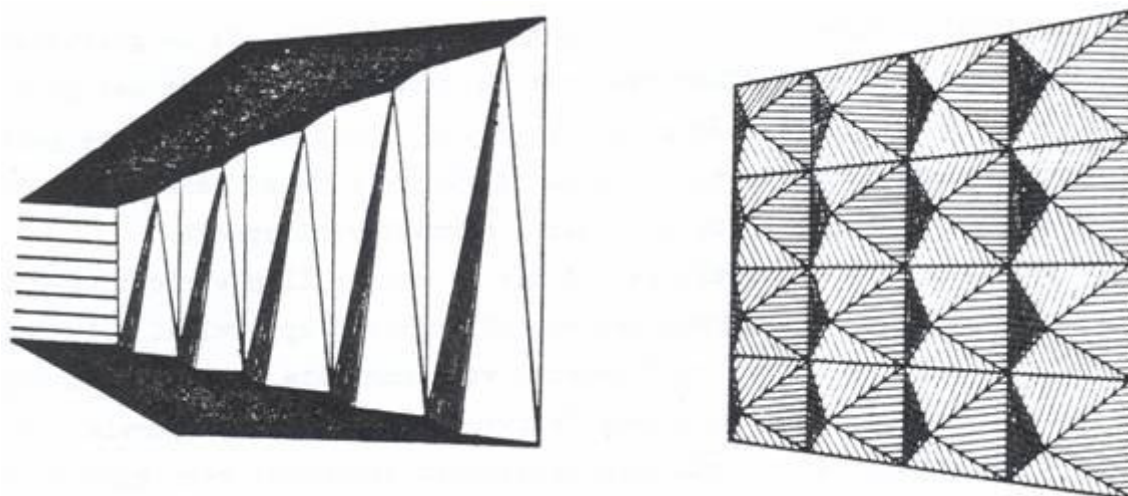


*Figuur 36*

*Reflectie via een schuine achterwand*

Reeds is erop gewezen dat holle oppervlakken aanleiding geven tot hinderlijke echo's die een zaal onbruikbaar kunnen maken. Bolle oppervlakken daarentegen verspreiden juist het geluid, dit geeft een verstrooiend of diffuserend effect. Hiervan wordt in de akoestiek veelvuldig gebruik gemaakt. De verschillende methoden om wanden diffuus te maken worden toegepast om een wandoppervlak dat anders een ongewenste echo zou veroorzaken onschadelijk te maken.

De laatste tijd benut men de diffuse oppervlakken ook om het geluidsveld in de ruimte een grotere homogeniteit te geven. Hiermede wordt bereikt dat de geluidsenergie zich beter verdeelt over de toehoorders, vooral van belang in concertzalen. Figuur 37 geeft enkele voorbeelden van diffuserende oppervlakken.



Figuur 37  
Enkele voorbeelden van diffuserende oppervlakken

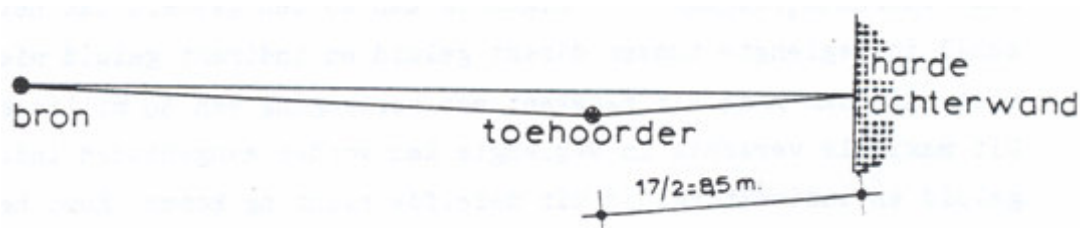
Bevat een zaal twee evenwijdige harde wandvlakken, dan kan tussen deze wanden een *flutter- of ratelecho* ontstaan.

Door een van de wanden een kleine hoek te verdraaien worden flutter-echo's vermeden. Andere manieren ter voorkoming van dit effect:

- het aanbrengen van absorberend materiaal tegen een van de wanden,
- het diffuserend maken van een van de wanden.

#### Conclusies over het indirecte geluid:

1. Het indirecte geluid, ontstaan door gerichte reflectie via wand en plafondoppervlakken kan ruwweg worden gecontroleerd met behulp van de normale reflectiewetten.
2. Wil het indirecte geluid nuttig zijn dan dient het zonder grote omwegen en vanuit de goede richting bij de toehoorders te komen. Het dient de toehoorders te bereiken binnen 50 ms; als  $c = 340$  m/s dan komt dit overeen met maximaal 17 m, (figuur 38).



Figuur 38  
Het maximaal toelaatbare wegverschil tussen direct geluid en indirect geluid

3. Echo's worden voorkomen door een juiste vormgeving van de ruimte, door het toepassen van absorberend materiaal, door het geluid te spreiden met behulp van diffuserende oppervlakken.
4. Veel diffusie verbetert de homogeniteit van het geluidsveld en veroorzaakt daarmee een betere verdeling van de beschikbare geluidsenergie over de toehoorders:
  - diffusiteit is uiterst belangrijk,
  - diffusiteit is moeilijk berekenbaar (modelonderzoek).
5. Holle oppervlakken geven geluidsconcentraties. Soms kan men dit verschijnsel benutten doch meestal dienen holle oppervlakken te worden voorkomen.



## 5.4 De nagalmtijd

Na het plotseling zwijgen van de geluidsbron in een zaal kan men het geluid nog enige tijd horen naklinken. Men spreekt dan van galm.

Deze galm ontstaat doordat het geproduceerde geluid enige tijd rondgaat door de ruimte, energie verliezend bij elke reflectie, maar ook onderweg in de lucht totdat alle energie is opgebruikt.

Alleen in zeer grote ruimten, waar de af te leggen weg tussen de opeenvolgende reflecties lang is, worden de energieverliezen ten gevolge van de voortplanting door de lucht zo groot dat ze gaan meetellen in vergelijking tot de verliezen ten gevolge van de reflectie. Deze laatste vorm van energieverlies is een gevolg van kaatsing tegen geluidsabsorberende oppervlakken.

De nagalmtijd is evenredig met het volume van de ruimte. Hoe groter de afmetingen van de ruimte zijn, des te langer is de af te leggen weg tussen twee opeenvolgende reflecties. Dit betekent dat het meer tijd vergt eer bij een volgende reflectie veer een gedeelte van de energie wordt vernietigd.

De nagalmtijd is omgekeerd evenredig met de hoeveelheid absorptie in de ruimte, Hoe groter de gemiddelde absorptie van de reflectievlakken hoe groter de energieverliezen bij elke reflectie.

Deze kenmerken van de nagalmtijd komen tot uiting in de formule:

$$T = 1/6 * V/A \quad (\text{wet van Sabine})$$

Waarin: T = de nagalmtijd in s

A = de absorptie in m<sup>2</sup> open raam

V = het volume in m<sup>3</sup>

Hierin is de nagalmtijd gedefinieerd als de tijd waarin de gemiddelde geluidsenergiedichtheid in de ruimte, na het uitschakelen van de geluidsbron, afneemt tot een miljoenste deel van de aanvangswaarde; dat wil zeggen de tijd die nodig is voor een daling van het geluidsdrukkniveau met 60 dB. De praktische betekenis van de nagalmtijd is dat deze ongeveer overeenkomt met de tijd waarin een handklap onhoorbaar wordt.

De absorptiecoëfficiënten van materialen en voorwerpen zijn afhankelijk van de frequentie van het opvallende geluid. Dit houdt in dat de verschillende frequenties verschillende nagalmtijden veroorzaken, Men bepaalt daarom in verschillende frequentiebanden, meestal ter breedte van één octaaf, de totale A (m<sup>2</sup>) en daarmee de nagalmtijd voor dat frequentiegebied, Het ideaal dat bij een zaal de (gewenste) nagalmtijd dezelfde waarde zou hebben voor elke octaafband binnen het hoorbare gebied is praktisch moeilijk te realiseren.

De ongewenste afwijkingen zijn binnen bepaalde perken echter wel toelaatbaar. Voldoet de frequentie rond 500 Hz aan de verlangde nagalmtijd, dan zijn voor de andere in aanmerking komende frequentiegebieden de volgende afwijkingen geoorloofd, (tabel 9),

Tabel 9

	frequentiegebied (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
afwijking t.o.v. 500 Hz	1,4	1,15	1,0	0,9	0,9	0,9

Paneelvormige constructies zoals houten vloeren, lambriseringen en plafonds van stuc op steengas absorberen betrekkelijk goed lage tonen.

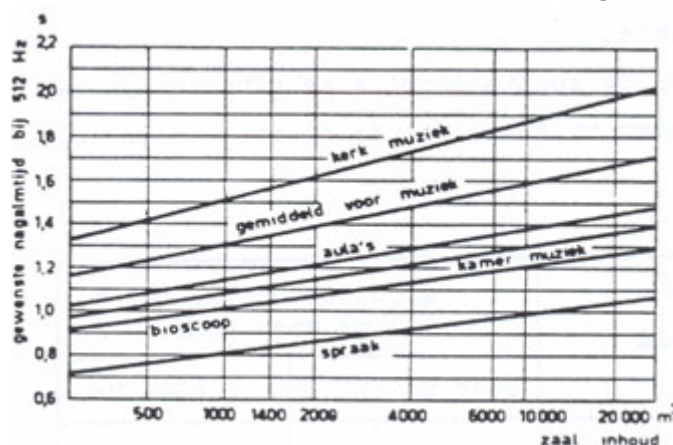
Poreuze materialen zoals baksteen, pleisterwerk, gordijnen en dergelijke zijn in hoofdzaak werkzaam in het gebied van de hoge frequenties. Sommige poreuze materialen kunnen, aangebracht op een houten raamwerk, ook goed absorberen in het gebied van de lage - en middelhoge tonen.

In dat geval zijn deze elementen tevens werkzaam als paneel. Het energieverlies ten gevolge van de voortplanting van het geluid door de lucht (de luchtabsorptie), wordt pas van belang bij de zeer hoge frequenties. Voor concertzalen mag deze invloed bij de berekening stellig niet worden vergeten, de hoge tonen zijn belangrijk voor de klankkleur (brilliantie) van de ruimte. De mate van de luchtabsorptie is afhankelijk van het volume en de relatieve luchtvochtigheid van de ruimte, (tabel 10).

Tabel 10

relatieve vochtigheid ( $\gamma$ )	geluidsabsorptie per m <sup>3</sup> (in m <sup>2</sup> open raam) bij:	
	2048 Hz	4096 Hz
20%	0,008	0,04
40%	0,0006	0,03
60%	0,005	0,02

Vroeger was de nagalmtijd het enige exacte criterium. Men deed toen ook uitgebreide onderzoeken naar de eisen die hieraan waren te stellen, hetgeen tot uiting komt in figuur 39.



Figuur 39  
Relatie zaalinhoud en gewenste nagalmtijd

Het is opmerkelijk dat de nagalmtijd voor muziek veel langer behoort te zijn dan die voor het gesproken woord. Dit is het gevolg van het feit dat de intervallen tussen de opeenvolgende klanken bij spraak in het algemeen korter zijn dan bij muziek. Het valt in de figuur ook op, dat de nagalmtijden worden gegeven in afhankelijkheid van de volumina van de ruimten. Gebleken is dat de nagalmtijd minder kritisch wordt naarmate zorg wordt gedragen voor een betere voorziening met direct geluid bij het gesproken woord en een sterkere mate van diffusie bij muziek.

## 5.5 Modelonderzoek

Uit het voorgaande blijkt dat men met behulp van tekeningen en gegevens reeds veel kan leren over de te verwachten akoestische kwaliteiten van een te bouwen zaal. Men kan vrij redelijk de nagalmtijd voorspellen en de niet te gecompliceerde omwegen van het indirecte geluid nagaan. Dit laatste is tijdrovend en men loopt de kans een deel van het indirecte geluid te vergeten. Daarom begon men reeds decennia geleden met schaalmodellen. Oorspronkelijk met bakken water waarvan de wateroppervlakte op schaal een doorsnede over de ruimte vormde. Op de plaats van de geluidsbron werden golfjes in het water geproduceerd, aan de hand daarvan was men in staat de loop van de golffronten na te gaan. Er kon echter slechts tweedimensionaal worden gewerkt aan een driedimensionaal probleem. Later ontstond verbetering door het werken met lichtmodellen waarbij men een driedimensionaal spiegelmodel maakte. Absorptie werd nagebootst door de spiegels minder reflecterend te maken, maar men mist bij zulke lichtmetingen de op schaal met het geluid overeenkomende golflengten. Een bezwaar is ook de veel grotere voortplantingssnelheid van het licht.



Tegenwoordig is het mogelijk met geluid proeven te doen in schaalmodellen. Dit is te danken aan de enorme vlucht die de elektronica nam en aan de vooruitgang in de geluidsopname en -weergave apparatuur.

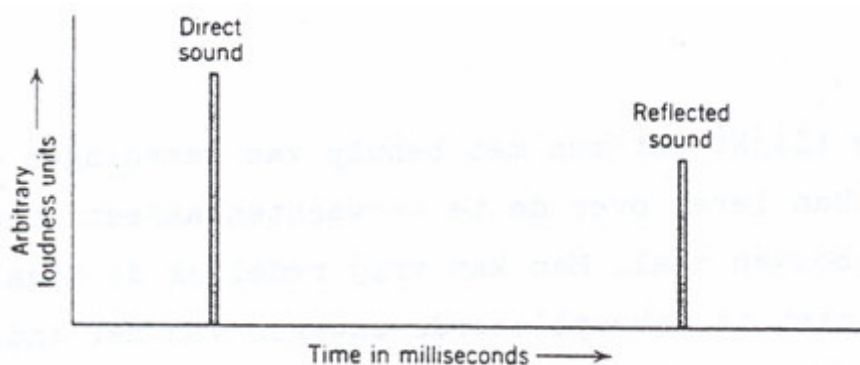


Figure 2.11.A A time graph showing, reading from left to right, that the reflected sound arrives at a listener's ears a fraction of a second after the direct sound.

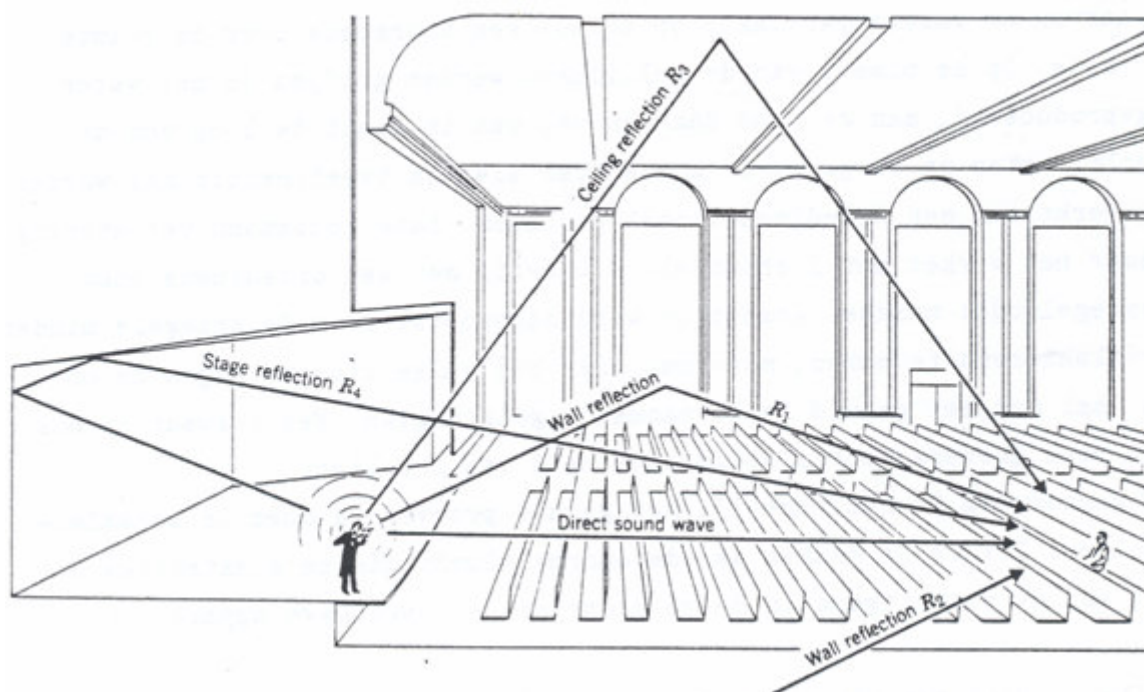


Figure 2.12. Showing the paths of direct sound and several reflected sound waves in a concert hall. Reflections also occur from balcony faces, rear wall, niches, and any other reflecting surfaces.

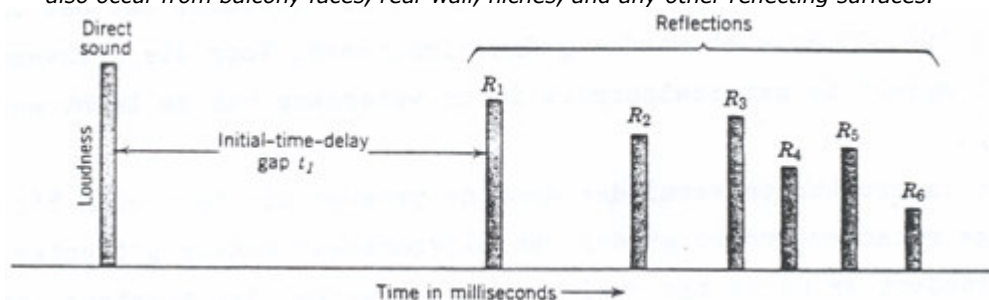


Figure 2.13. Time diagram showing that a listener's ears, the sound that travels directly from the performer arrives first, and after a gap, reflections from the walls, ceiling, stage enclosure, and other reflecting surfaces arrive in rapid succession. "The height of a bar suggests the loudness of the sound. This kind of diagram is called a reflection pattern, and the initial-time-delay gap can be measured from it.

Figuur 40. Ontleend aan: Beranek: Music, acoustics and architecture



Hierbij gaat men uit van modellen op schaal 1 : 10. Het houdt in dat gebruik moet worden gemaakt van geluid met een 10x zo kleine golflengte als in werkelijkheid is te verwachten. Dit betekent dat met frequenties tot 100.000 Hz moet worden geëxperimenteerd. Voor die frequenties evenwel speelt de geluidsabsorptie in de waterdamp van de lucht een grote rol.

Dit is slechts te vermijden door de proeven uit te voeren bij extreem lage relatieve vochtigheden van bijvoorbeeld enkele procenten. Overigens verandert er niets ten opzichte van de werkelijke toestand. Het is echter vrijwel onmogelijk de verschillende in werkelijkheid voorkomende bouwmaterialen zodanig te imiteren dat deze eenzelfde absorptie karakteristiek in het model hebben.

Als gevolg daarvan is het dus (nog) niet mogelijk in het model nagalmtijden te meten. Wel kan worden nagegaan hoe de geluidsgolven zich bewegen door de ruimte. Dit gaat als volgt in zijn werk. Men produceert in de ruimte op de plaats van de geluidsbron een zeer korte hoogfrequente geluidstik, een knal door middel van een overspringende vonk en registreert op een oscillograaf via een microfoon het op de plaats van de luisteraar aankomende geluid.

Het op het scherm verschijnende beeld wordt gefotografeerd. Men ziet op dit beeld iedere bij de luisteraar binnenkomende geluidsstoot ten gevolge van die ene knal, dus eerst het directe geluid en daarna een serie steeds zwakker wordende van één of meer reflecties afkomstige geluidsstoten, (figuur 40).

Dergelijke diagrammen kunnen een uitstekende indicatie geven voor het optreden van eventuele echo's enz. die dan als een aparte lijn, ver buiten de andere lijnen uitstekend, zichtbaar zijn.

## 5.6 Voorbeeld van een concertzaal

Als representatieve zaal is gekozen de grote zaal van de Stadsdoelen in Rotterdam, (literatuur 4).

Enkele gegevens over de zaal:

Volume  $V = 27070 \text{ m}^3$

Aantal stoelen = 2230 (exclusief orkeststoelen)

"Bezeten oppervlak" =  $1867 \text{ m}^2$

Onder "bezeten oppervlak" wordt verstaan het oppervlak van publiek, koor en orkest met inbegrip van 3 m breed rond het publiek.

De nagalmtijden in de verschillende frequenties hebben de volgende waarden, (tabel 11).

Tabel 11

frequenties	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
vol	2,31	2,25	2,15	2,08	2,15	2,16	1,86	1,23
leeg	2,82	2,67	2,76	2,71	2,57	2,53	1,88	-

$$T = 1/6 * V/\alpha*S$$

Waarin

$$\alpha = 1,07$$

S = bezeten oppervlak

Voor de grote zaal geldt:

$$T = 1/6 * 27070 / (1,07 * 1867) = 2,26 \text{ s}$$

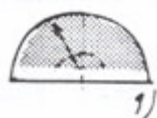
De constante  $\alpha$  is een experimenteel bel=paalde grootheid, die voor erkend goede concertzalen praktisch altijd de waarde 1,07 heeft.

## 5.7 De vormgeving van de zaal

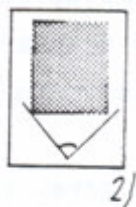
### Plattegronden

Bij het ontwerpen van de hoofdvorm van een zaal dient men zich een aantal basisgegevens te realiseren, (figuur 41).

Figuur 41



1) Een zo klein mogelijke afstand tussen geluidsbron en luisteraars.



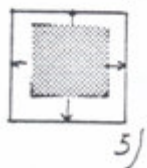
2) Een niet te grote hoek vanuit de spreker in verband met de richtingskarakteristiek van de menselijke stem.



3) Wandvlakken nabij de bron zijn gunstig georiënteerd met betrekking tot de gewenste reflecties.

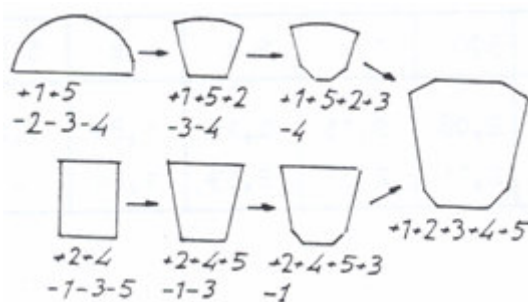


4) Bij het toepassen van concave oppervlakken in de nabijheid van het publiek kunnen hinderlijke geluidsconcentraties optreden.



5) Flutter-echo's tussen evenwijdige akoestisch harde oppervlakken dienen te worden vermeden.

Basisvormen van gehoorzalen met hun kenmerken



Figuur 42

Ontwikkelingsreeksen in zaalvormen, die leiden tot het zo gunstig mogelijk type.

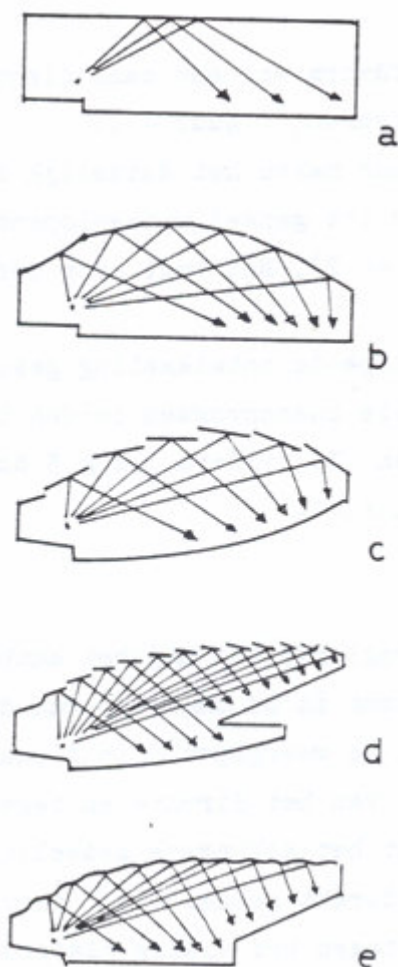
De plattegronden op deze figuur maken het duidelijk dat de verschillende voorwaarden leiden tot geheel uiteenlopende vormen. Dit blijkt vooral uit variant 1) en 2). Het komt erop neer een doelmatig compromis te vinden.

In figuur 42 is de parallel lopende ontwikkeling geschetst vanuit twee basistypen, die via enkele tussenvormen leiden tot één resultaat met zoveel mogelijk pluspunten. De cijfers 1 t/m 5 duiden op de karakteristieke kenmerken uit figuur 41.

### Het plafond van de zaal

Hierbij gelden dezelfde overwegingen als bij het aanbrengen van reflectoren en het bepalen van de vorm in de omgeving van de geluidsbron.

De systematische ontwikkeling is weergegeven in figuur 43.



Figuur 43

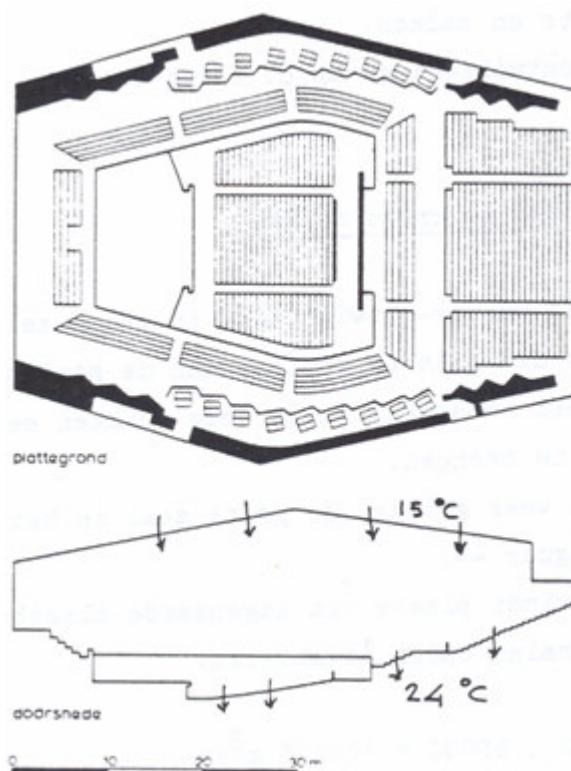
*Ontwikkelingsstadia in een goede akoestische vormgeving van plafonds in gehoorzalen.*

- Slechts een klein gedeelte van het directe en tegen het plafond gereflecteerde geluid bereikt het achterste gedeelte van de zaal. Voorin, waar reeds zoveel direct geluid wordt ontvangen, komt het grootste gedeelte van het tegen het vlakke plafond gereflecteerde geluid terecht. Dit is overbodig en kan bij hoge zalen zelfs leiden tot hinderlijke echo-effecten.
- Het plafond is zodanig gevormd, dat reflecties met een hoek van totaal ca. 90° in het achterste gedeelte van de zaal worden geworpen. De afzonderlijke vlakken hebben hellingen die veroorzaken dat de reflecties naar achter toenemen, met de bedoeling dat de ontvangen geluidssterkte op alle plaatsen ongeveer even groot is. Dit is minder het gevolg van de totale plafondvorm, als van de hellingen van de afzonderlijke vlakken.
- Hier zijn de vlakken aangebracht onder dezelfde hellingen als in voorbeeld b. Een totaal nieuwe vorm is ontstaan door de hellende vloer, "goed zien is goed horen".
- Hier is het plafond in nog kleinere vlakken opgesplitst, waardoor men grotere vrijheid verkrijgt bij het bepalen van de zaalvorm;
- Een verdere ontwikkeling van c. leidt tot deze golvende plafondconstructie.

## 5.8 Warmteontwikkeling in grote zalen

In verband met de warmteontwikkeling in grote zalen met veel mensen en de hoge eisen die zijn te stellen aan de handhaving van voldoende verse lucht is het noodzakelijk in deze ruimten een luchtbehandelings-installatie aan te brengen.

Als voorbeeld is weer gekozen de grote zaal in het Doelencomplex te Rotterdam, (figuur 44).



*Figuur 44  
Grote zaal Doelencomplex Rotterdam.*

De luchttoevoer vindt plaats via zogenaamde blaasbollen, de lucht wordt afgezogen via kanalen onder de stoelen.

Luchttoevoer  $2 * 50.000 = 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$   
 Luchtafvoer  $2 * 40.000 = 80.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Warmteontwikkeling:  
 Personen (2300) 270.000 watt  
 Verlichting 50.000 watt  
 Totaal 320.000 watt

$$t_{\text{onder}} = t_{\text{boven}} + W / (n * V * \rho * c) \quad nV = 100.000/3600 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\rho c = 1300 \text{ (S.I.)}$$

$$t_{\text{onder}} = t_{\text{boven}} + 320.000 / \{(100.000/3.600) * 1300\} = 8,9^\circ\text{C}$$

$$\text{ventilatievoud } \eta = 100.000/27.000 = 3,70 \text{ (x per uur)}$$

$$\text{dat is } 100.000/2300 = 44 \text{ m}^3/\text{pp h}$$

De temperatuur van de lucht ter plaatse van de afzuigkanalen mag niet hoog zijn ten opzichte van de gemiddelde temperatuur in de zaal, de inblaaslucht mag niet te koud zijn.

In ons voorbeeld bedraagt de inblaastemperatuur  $15^\circ\text{C}$ , de afgezogen lucht bereikt dan  $15 + 9 = 24^\circ\text{C}$ , dit zijn acceptabele waarden.

Hoewel voor zalen dikwijls het systeem van gedeeltelijke recirculatie van de verbruikte lucht wordt toegepast, is hier gekozen voor een installatie waarbij uitsluitend met verse buitenlucht wordt gewerkt (vanuit de noord-wand).

De warmteontwikkeling van de verlichting is bijna voldoende om de transmissie te dekken, de temperatuur van de inblaaslucht behoeft nauwelijks boven de  $20^\circ\text{C}$  uit te komen. Het voordeel van brandstofbesparing door recirculatie komt hiermede te vervallen.

Voor het achtergrondgeluid is een strenge norm gehanteerd: de grenswaarde NR 15, omdat de lege zaal ook als opnamestudio dienst moet doen.

## 5.9 Brandveiligheid van schouwburgen

De veiligheid van het publiek bij brand is vooral afhankelijk van voldoende totale breedte van de nooddeuren. Om hiervoor een maat te vinden is de term EUB ingevoerd.

EUB = eenheid van uitgangsbreedte = 0,55 m.

Dagopeningen van deuren zijn hierop te baseren: 0,55 m; 1,10 m; 1,65 m en 2,20 m.

Voor kleine zalen met weinig personen wordt meestal een EUB = 0,60 m aangehouden.

In Nederland geldt de eis:

- EUB per 50 personen,
- 1 uitgang per 200 personen.

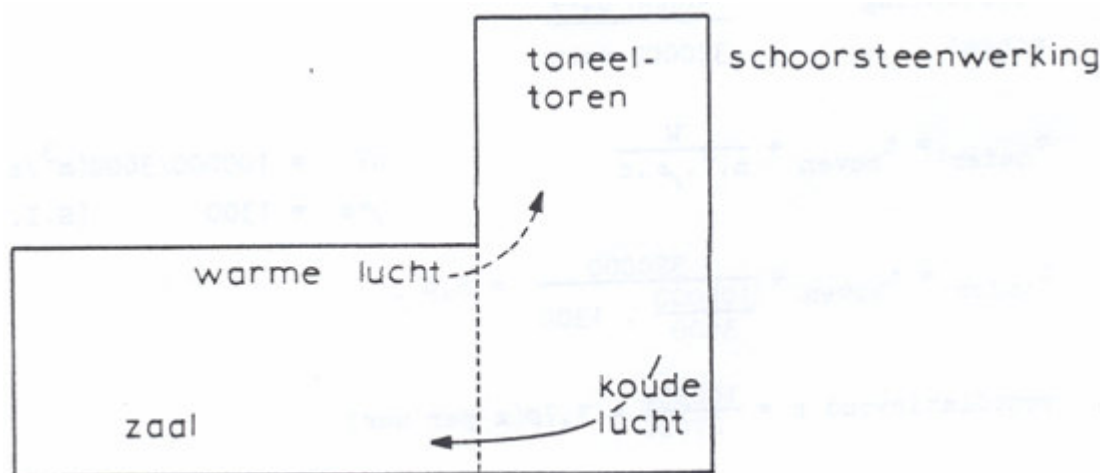
### Voorbeeld

Een zaal voor 1000 personen:  $1000/200 = 5$  uitgangen en  $1000/50 = 20$  EUB deuren

Per uitgang dus: 4 EUB = 2,20 m breedte aanhouden.

De volgende eis is, dat zich in elke zaal tenminste twee deuren moeten bevinden die zover mogelijk uit elkaar liggen.

In zalen met toneelaccomodatie is een brandscherm noodzakelijk, (figuur 45).



Figuur 45

Schoorsteenwerking ten gevolge van de hoge toneeltoren.

De toneeltoren werkt bij optrekken van het scherm als schoorsteen, hetgeen tot gevolg heeft dat de warme zaallucht in de toren verdwijnt en koude lucht vanuit de toneelruimte de zaal binnenkomt. Het verdient de voorkeur in de toren radiatoren aan te brengen.

Het brandscherm is voor de veiligheid beslist noodzakelijk, want:

- op het toneel bevindt zich zeer brandbaar materiaal,
- decors en gordijnen vormen grote oppervlakken,
- het is er heel droog,
- de lucht kan van alle kanten toetreden.

Brandonderzoekingen in een proef theater in Wenen gaven de volgende resultaten, (literatuur 7):

- Luchtafvoerkleppen in de toeschouwersruimte open, luchtafvoerkleppen boven het toneel gesloten, de linnen gordijnen in brand gestoken;  
*resultaat:* een steekvlam in de zaal met een temperatuur van meer dan 400°C.
- Na het ontstaan van bovenvermelde brand is het brandscherm neergelaten;  
*resultaat:* er ontstond een grote steekvlam + een hoog CO-gehalte van 8%.



- c. Direct na de brand, of iets later:  
luchtafvoerkleppen toeschouwersruimte gesloten,  
luchtafvoerkleppen toneel geopend;  
*resultaat*: zeer gunstig.

*Conclusie*:

- zorg voor overdruk in de toeschouwersruimte,
- maak rijkelijk grote rookluiken boven de toneelhemel (1/10 x vloeroppervlakte),
- het brandscherm binnen 7 seconden neerlaten;  
dit scherm moet weerstand kunnen bieden aan een éézijdige overdruk van 45 kg/m (450 N/m<sup>2</sup>).

## 5.10 Zalen met variabele akoestiek

### Inleiding

Steeds meer wordt in de snel groeiende woongemeenschappen, zowel van grotere steden als van de zogenaamde ontwikkelingskernen de behoefte gevoeld aan een gemeenschapsruimte als centrum voor culturele- en ontspanningsactiviteiten. De vormen waarin men zich zo'n centrum denkt kunnen nogal uiteenlopen.

Altijd zal echter de wens uitgaan naar een zaal met vele gebruiksmogelijkheden waarin men zich voorstelt alle activiteiten op te vangen. De zaal moet dan geschikt zijn voor toneelvoorstellingen, muziekkuitvoeringen en vele andere dingen zoals lezingen, tentoonstellingen en dansfeesten.

Als voorbeeld dient de aula van het Christelijk Lyceum te Harderwijk "Nassau Veluwe".

Nagalmtijd: eis voor goede toneelzaal 0,8 s (500 Hz)  
                  eis voor muziekzaal 1,25 s (500 Hz)

Welke eisen zijn te stellen aan de verschillende gebruiksmogelijkheden van de zaal?

#### a. Toneelzaal

Goede verstaanbaarheid: de toehoorders waar dan ook gezeten moeten het op het podium gesprokene, woord voor woord zonder moeite kunnen verstaan.

Dit eist:

- een goede geluidsspreiding over de toehoorders,
- dus een doelmatige vormgeving van plafond en wanden,
- een hellende vloer (goed zien is goed horen),
- een nagalmtijd van ca. 0,8 s in de middenfrequenties.

Is hieraan voldaan dan is de zaal geschikt voor spraak, toneel, lezingen en declaratie.

#### b. Kamermuziek

De bovenvermelde nagalmtijd is voor kamermuziek gunstig. Wel moeten extra eisen worden gesteld aan de geluidsvermenging. Dit wordt bereikt door:

- ervoor te zorgen dat het publiek na het direct invallende geluid vanaf de bron (de muziekinstrumenten), ook nog vele uit verschillende richtingen komende reflecties van wanden en plafond kan ontvangen;
- de wanden dus een geluidsverstrooiende functie te laten vervullen;
- op de wanden daarom oneffenheden aan te brengen van redelijke afmetingen (ca. 0,30 m of meer uit het vlak), of het laten verspringen van kaatsende vlakken van wanden en plafond en het afwisselen van de kaatsers door geluidsabsorberende vlakken en/of vlakken met een andere helling.

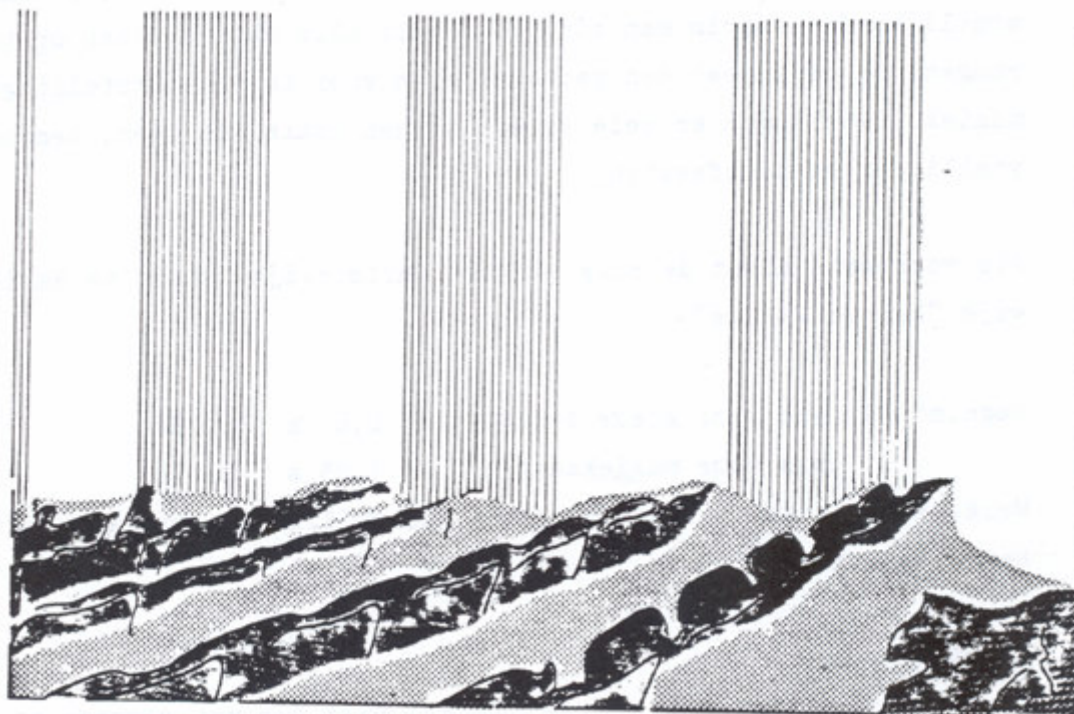
#### c. Concertzaal

Hiervoor gelden dezelfde eisen als voor kamermuziek, echter met een veel langere nagalmtijd van 1,5 à 2,5 s.



Als materiaal voor de wanden is hout gekozen. De wand is afwisselend uitgevoerd in gesloten panelen en latten met spleten, afhankelijk van de behoefte om in alle frequentiegebieden tot een goede nagalmtijd te komen.

De architect is erin geslaagd een wand te ontwerpen die in hoge mate geluidsverstrooiend is en die toch in een strakke lijn en daarom voor het oog rustgevend is uitgevoerd, (figuur 46).



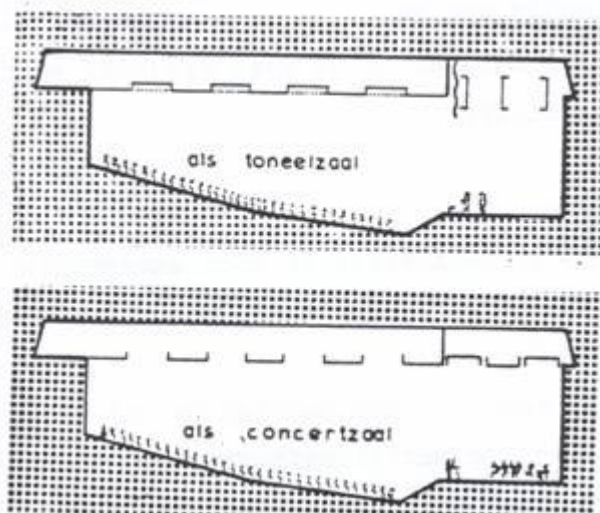
*Figuur 46  
De uitvoering van de zijwanden.*

Men heeft getracht aan de meervoudige eis ten aanzien van het gebruik te voldoen, door zowel het zaalvolume als het akoestisch oppervlak variabel te maken. Immers door het volume te vergroten en/of het akoestisch oppervlak te reduceren wordt de nagalmtijd verlengd. Enkele getallen die betrekking hebben op beide gebruikstoestanden: de zaal als toneel- respectievelijk als muziekruimte.

toneel (dicht plafond)	muziek (open plafond)
$V = 2950 \text{ m}^3$	$V = 4350 \text{ m}^3$
$T = 0,8 \text{ s (500 Hz)}$	$T = 1,25 \text{ s (500 Hz)}$
$A = V/6T = 2950/6 \cdot 0,8 = 615 \text{ (m}^2 \text{ o.r.)}$	$A = 4350/6 \cdot 1,25 = 580 \text{ (m}^2 \text{ o.r.)}$
A (eis) = 615 (m <sup>2</sup> o.r.)	A (eis) = 580 (m <sup>2</sup> o.r.)
600 pers. = <u>250 (m<sup>2</sup> o.r.)</u>	600 pers. = <u>250 (m<sup>2</sup> o.r.)</u>
nog nodig 365 (m <sup>2</sup> o.r.)	nog nodig 330 (m <sup>2</sup> o.r.)

### **Uitvoering.**

Het grote verschil, zowel in volume als in absorberend oppervlak is als volgt gerealiseerd. Het plafond boven de zaal bestaat uit een vast gedeelte gevormd uit in de breedte van de zaal doorlopende profielen met driehoekige dwarsdoorsnede, opgebouwd uit latten met spleten waarachter bij ca. 50% van het oppervlak asbestboard is aangebracht, (figuur 47).

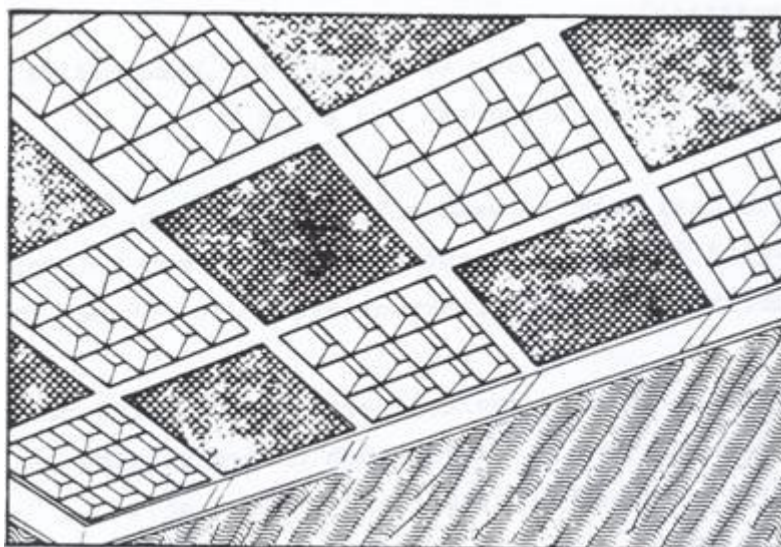


*Figuur 47*

*Het principe van het systeem ter variatie van het beschikbare zaalvolume.*

Deze zorgen voor nuttige geluidsreflecties en maken het plafond ook diffuus. Het wegneembare gedeelte wordt gevormd door schotten, aan de bovenzijde geluideflecterend en aan de onderzijde geluidsabsorberend. Deze zijn op open roosters gelegd. De schotten zijn gemakkelijk hanteerbaar en worden bij een concertuitvoering afgenomen en met de absorberende vlakken tegen elkaar geplaatst.

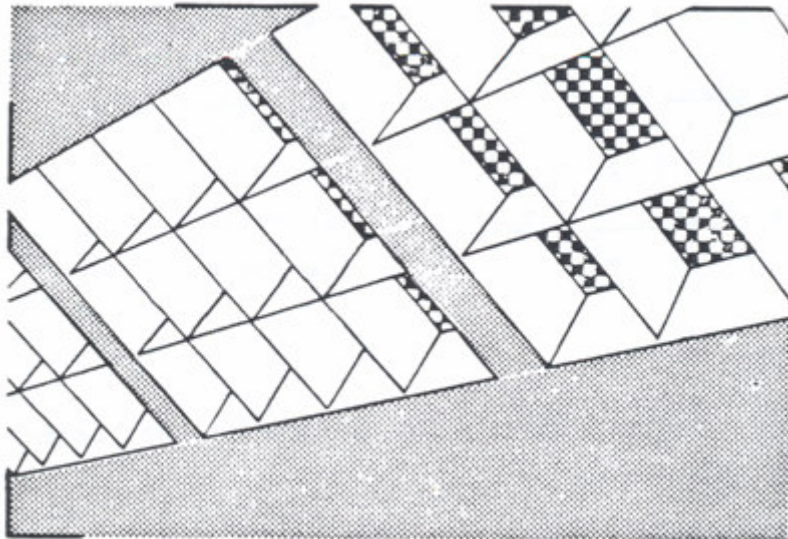
Zo wordt het zaalvolume vergroot en neemt de totale geluidsabsorptie af. De hoogte van de roosters voorkomt doorkijk naar de kapruimte. De roosters hebben zowel in gesloten als in open toestand een functie als geluidsverstrooiende elementen, (figuur 48).



*Figuur 48*

*Boven het podium bestaat het plafond uit draaibare elementen, welke om en om met en zonder rooster zijn uitgevoerd. Hier geen geluidsabsorberend materiaal.*

Het plafond boven het podium bestaat uit grote, kantelbare cassetten die om en om als vlakke kaatser en als gesloten rooster zijn uitgevoerd. Alle houten schotten functioneren als klankkaatsers, (figuur 49).



*Figuur 49*

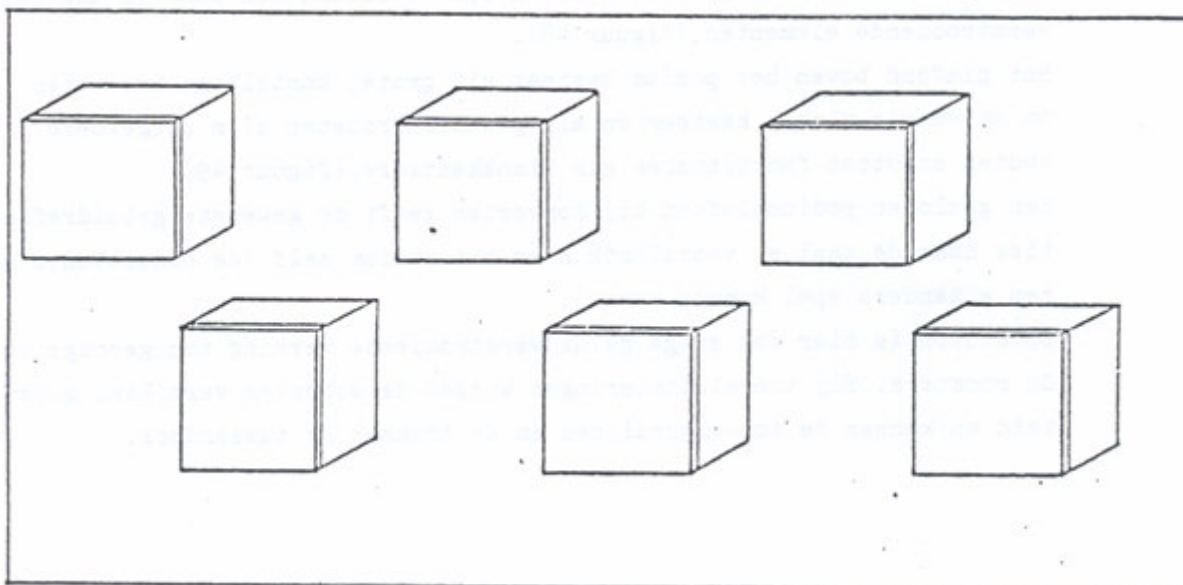
*De roosters in het plafond van de zaal zijn bij toneeluitvoering afgedicht met aan de onderzijde geluidsabsorberende schotten.*

Een gesloten podiumplafond bij concerten geeft de gewenste geluidsreflecties naar de zaal en vooral ook naar het podium zelf (de orkestleden moeten elkanders spel kunnen horen).

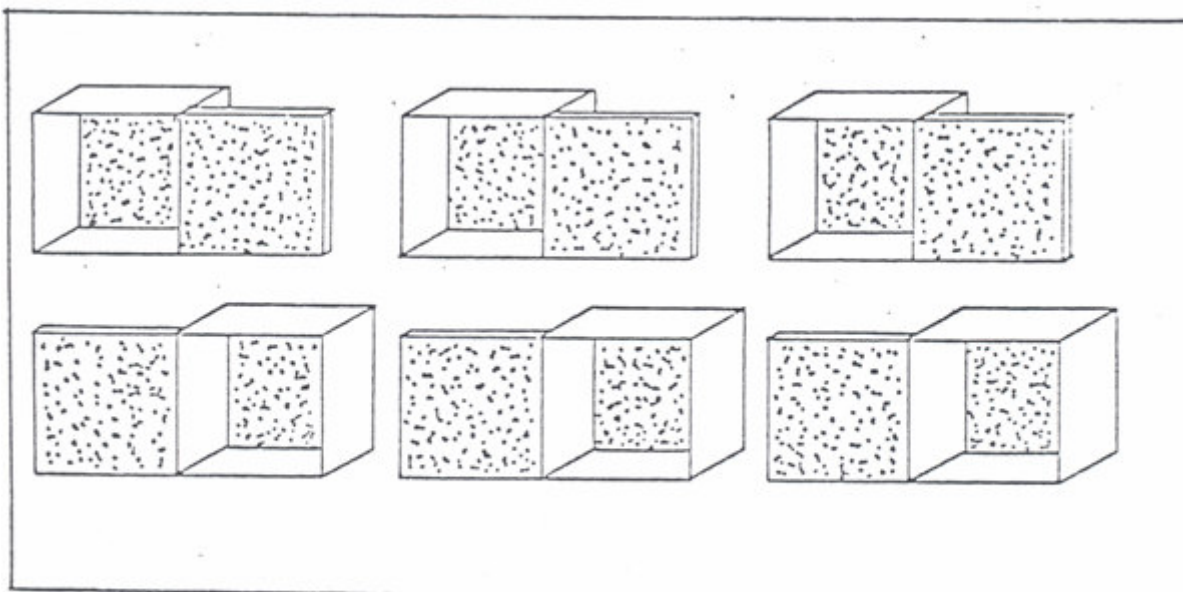
Bovendien is hier ook enige geluidsverstrooiende werking ten gevolge van de roosters. Bij toneeluitvoeringen worden de schotten verticaal gekanteld en kunnen de toneelgordijnen en de trekken er tussendoor.



## Variabele absorptie



a

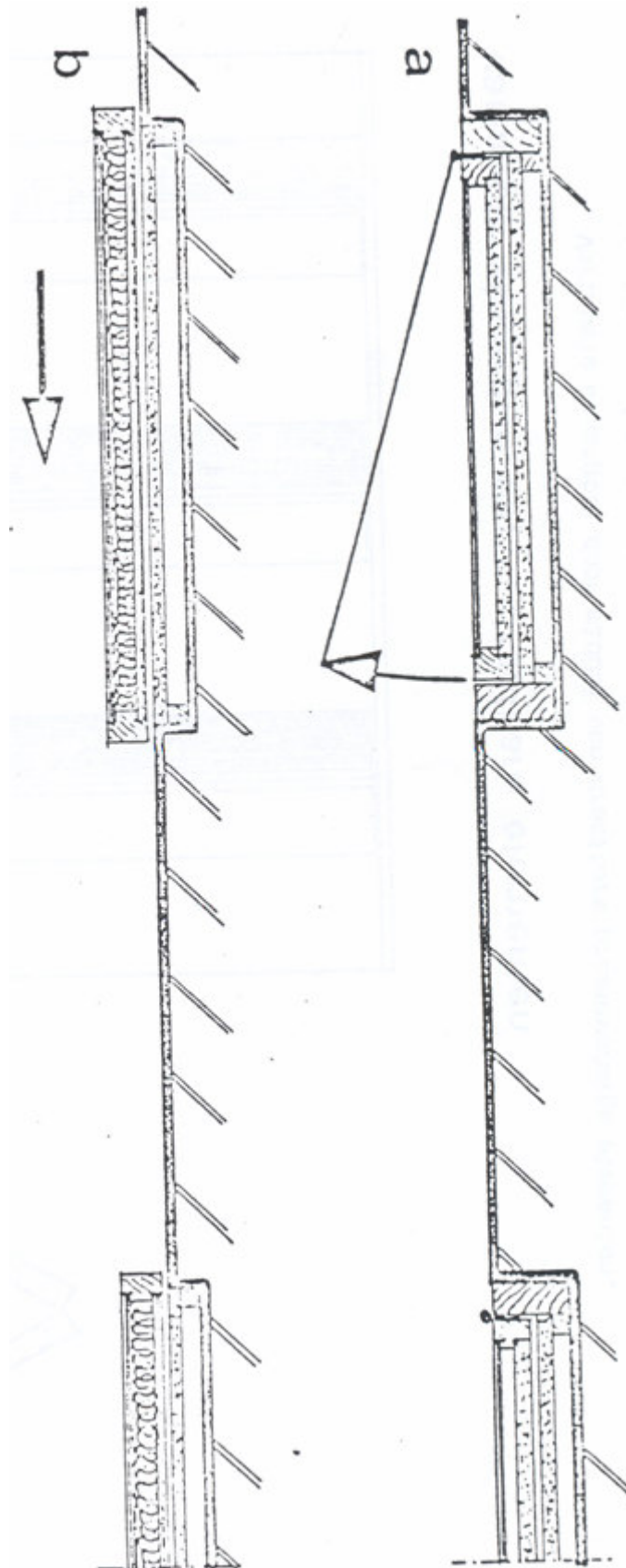


b

*Variabele absorptie door middel van te openen of te sluiten "dozen"*



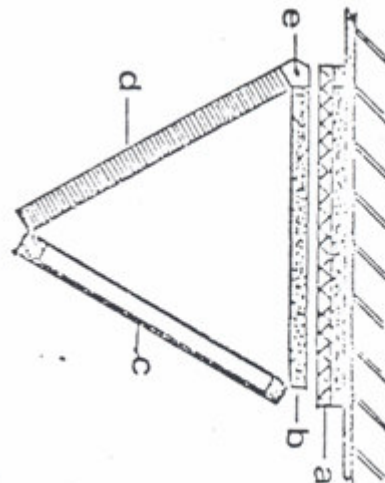
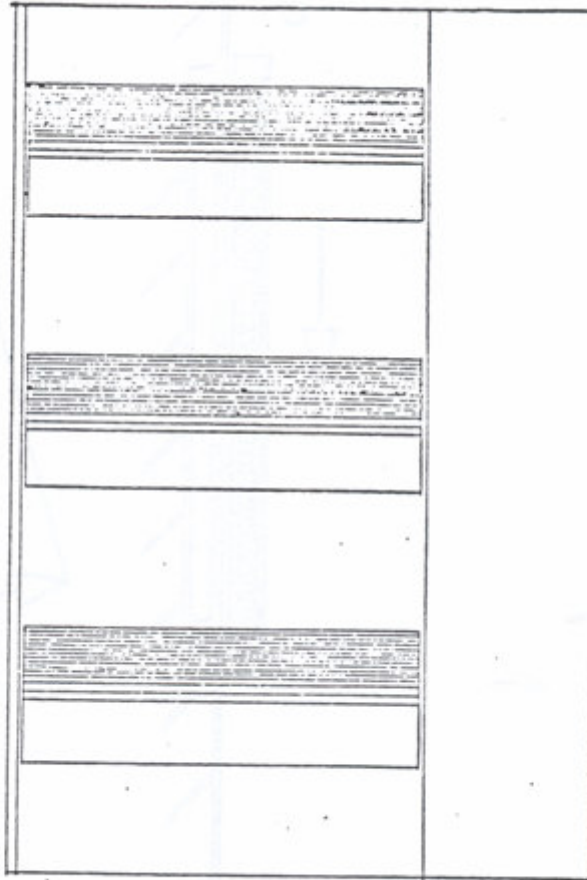
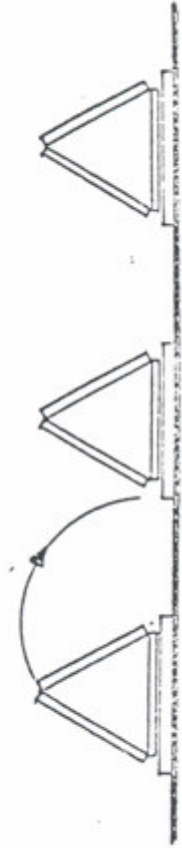
## Variabele absorptie



*Variabele absorptie door verschuifbare en verdraaibare panelen.*



## Variabele absorptie



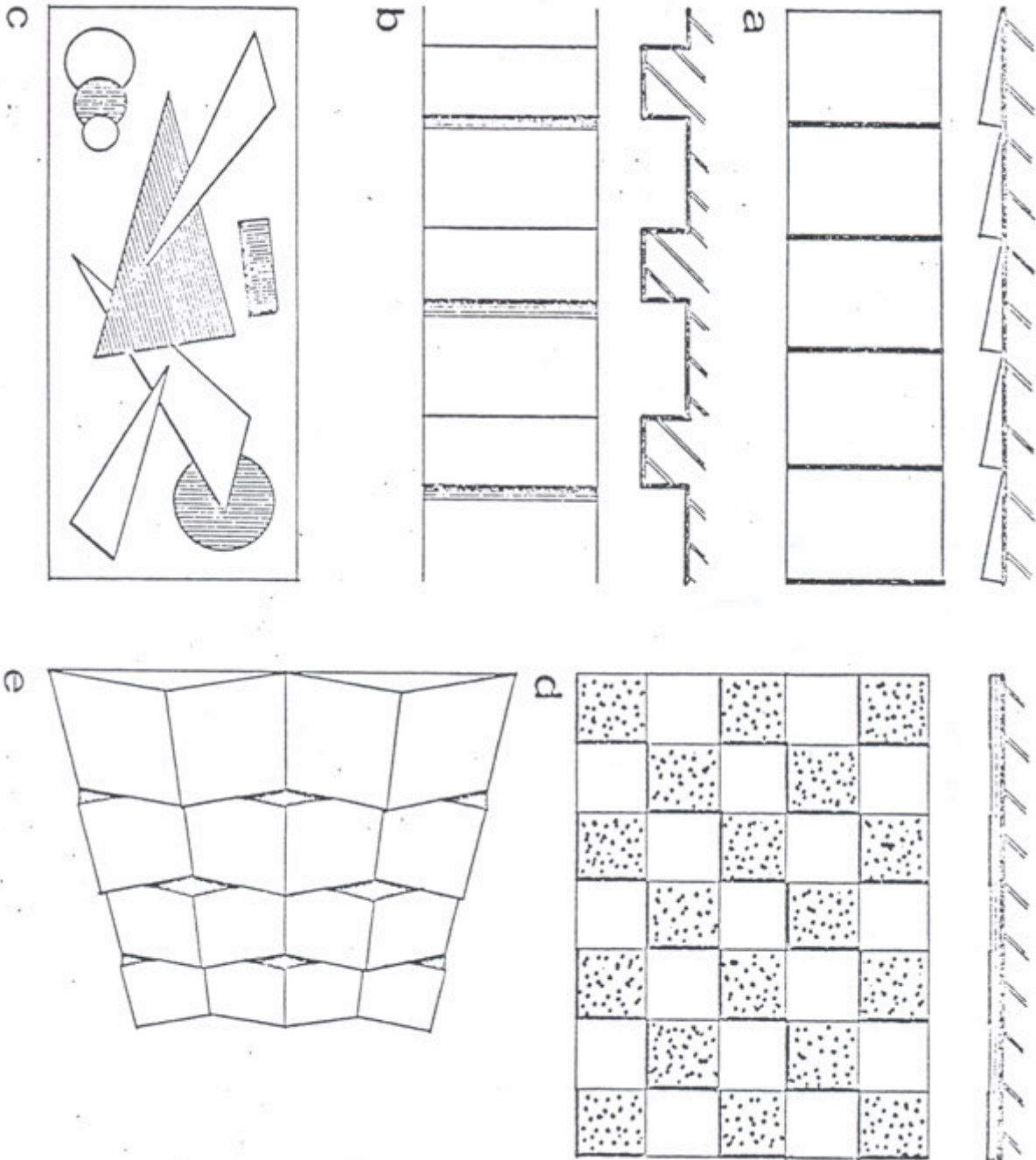
### variabele absorptie d.m.v. draaibare elementen

Variabele absorptie door middel van draaibare prismavormige elementen.

- a laag- en/of middenfrequent geluidabsorberend materiaal
- b midden- en hoogfrequent geluidabsorberend materiaal
- c laagfrequent geluidabsorberend materiaal (paneel)
- d niet absorberend
- e draaipunt



## Geluidsverstrooiende wanden



*Voorbeelden van geluidsverstrooiende wanden*