

## Ruimteakoestiek

Kennisbank Bouwfysica

Dictaat ct4220 Bouwfysica II, TU-Delft Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen,  
samengesteld door prof.ir. J.J.M. Cauberg

### 1 Inleiding

Doelstelling van ruimteakoestische maatregelen is het leveren van een bijdrage aan de functionele eigenschappen van een ruimte.

Het kan hierbij onder andere handelen om:

- interne lawaaibeheersing in werkruimten;
- spraakverstaanbaarheid in collegezalen;
- akoestiek van een concertzaal.

Het centrale probleem is de beschrijving van de ruimte als zijnde een overdrachtskanaal tussen geluidbron en ontvanger. In principe is het overdrachtspad tussen bron en ontvanger een volkomen gedetermineerd systeem en zou via de golfvergelijking en de randvoorwaarden beschreven moeten kunnen worden. In de praktijk blijkt dit zeer moeilijk tot onmogelijk te zijn. Daarom worden vooral denkmodellen en globale rekenmodellen gebruikt.

Twee veel gebruikte grootheden zijn:

a. de nagalmtijd  $T$  (volgens Sabine):

$$T = \frac{V}{6A} \quad (1)$$

b. de geluidniveauverdeling in de ruimte, te berekenen middels:

$$L_{p,r} = L_p + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (2)$$

Met:

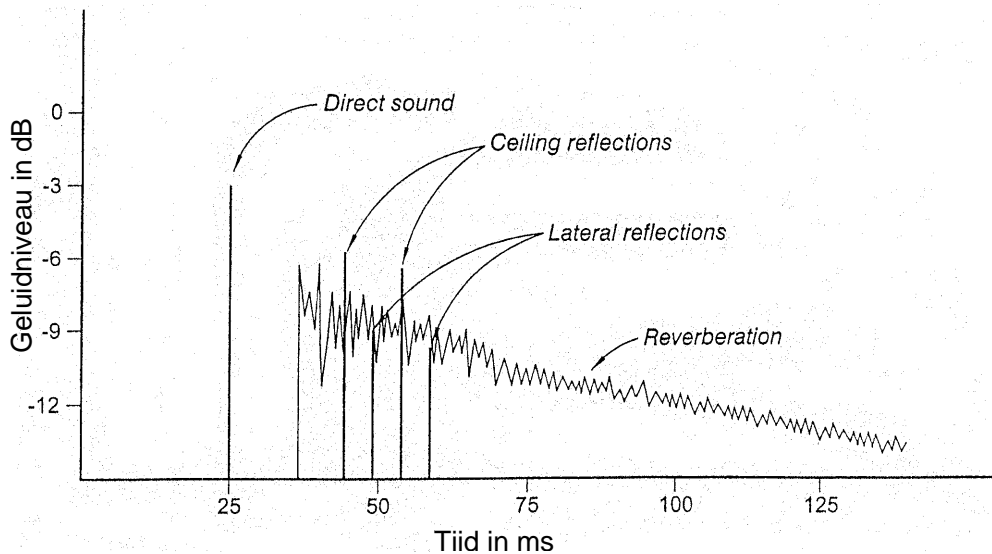
$T$	nagalmtijd in s
$V$	volume in $m^3$
$A$	geluidabsorptie in $m^2$ o.r.
$L_{p,r}$	geluiddrukniveau op afstand $r$ van de bron in dB ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ )
$L_p$	geluidvermogensniveau van een bron in dB ( $10^{-12} \text{ W}$ )
$r$	afstand tussen geluidbron en waarneempunt in m
$Q$	richtingsfactor

Beide formules zijn geldig onder strikte condities, zoals een grote, onregelmatig ruimte, het ontbreken van resonanties, min of meer egale verdeling van de aanwezige geluidabsorptie enz. Randvoorwaarden waaraan in de praktijk vaak niet of slechts beperkt wordt voldaan; (1) en (2) zijn gebaseerd op een statistische beschouwing van het fenomeen geluid in een ruimte. Naast een statistische beschrijving is voor akoestische verschijnselen vaak een geometrische en een golfbeschouwing nodig om het gedrag van het geluidveld in een ruimte te beschrijven.

## 2 Reflecties

In de werkelijkheid wijkt de geluidverdeling in een ruimte af van (2). Dit komt doordat een strikte verdeling in een direct geluidveld en een nagalm geluidveld meestal niet aanwezig is. Een belangrijk fenomeen hierbij zijn de reflecties die tegen de omwandingen van een ruimte optreden en die als zodanig herkenbaar zijn voor de ontvanger, dat wil zeggen niet opgenomen zijn in het nagalm geluidveld.

De betekenis van deze reflecties voor het geluidveld bij de ontvanger kunnen inzichtelijk gemaakt worden door de pulsresponse in een ruimte te beschrijven, zie figuur 1.



figuur 1. pulsresponse van een spreekzaal

Uitgaande van een korte geluidpuls op tijdstip  $t = 0$  ontstaat op het waarneempunt een geluidniveau als functie van de tijd dat is opgebouwd uit een aantal herkenbare verschijnselen.

Allereerst zal op het tijdstip  $t = r/c$  (in het voorbeeld 25 ms) het directe geluid bij de waarnemer aankomen. Daarna arriveert als het ware het nagalmveld dat als functie van de tijd lineair afneemt. De eerste reflecties tegen het plafond en de zijwanden komen later dan het directe geluid bij de ontvanger aan, maar zijn herkenbaar omdat ze een hoger geluidniveau hebben dan het nagalmveld. De voorwaarde is dat het reflecterende vlak daadwerkelijk reflecteert, derhalve  $a \approx 0$ .

Reflecties die binnen 50 ms na het directe geluid bij de waarnemer aankomen, versterken het directe geluid en daardoor de spraakverstaanbaarheid. 50 ms tijdsverschil betekent een lengteverschil van 17 m tussen de weg die het directe geluid tussen bron en ontvanger aflegt en de weg die de reflectie aflegt.

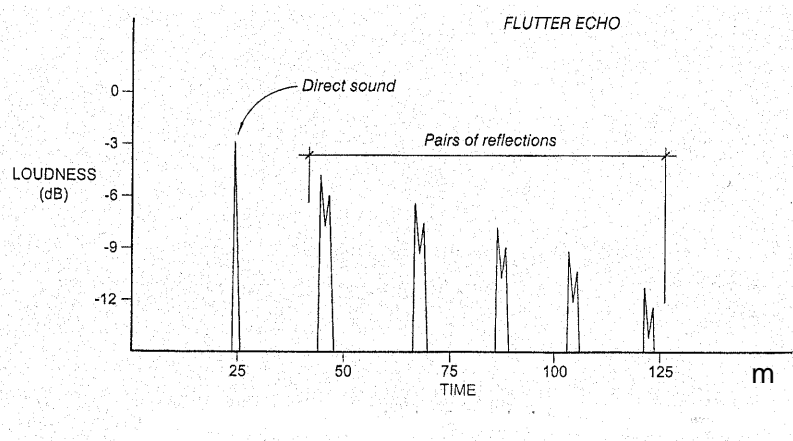
Het verloop van reflecties wordt beschreven door de geometrische akoestiek waarbij geluidgolven als geluidstralen worden opgevat. Bij het raken van een vlakke wand geldt de Wet van Lambert, die zegt dat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing. Een vlak "ziet" een geluidgolf als een straal indien de afmetingen van het vlak groter zijn dan de golflengte van het opvallende geluid. Voor de laagste frequentie  $f_1$  voor een reflector waarbij nog sprake is van een geometrische bepaalde reflectie door een vlak geldt:

$$f_l = \frac{2c}{(l \cos \vartheta)^2} \cdot \frac{l_s}{l+s} \quad (3)$$

Met:

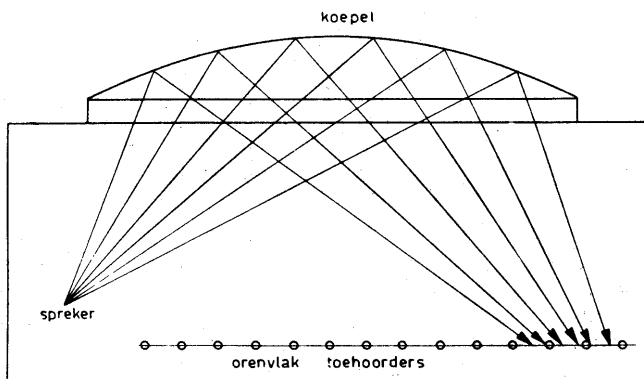
- $f_l$  laagste frequentie m.b.t. geometrische reflectie in Hz
- $c$  geluidsnelheid in m/s
- $l$  afmeting van het reflectievlak in m
- $e$  afstand tussen bron en reflectievlak in m
- $s$  afstand tussen ontvanger en reflectievlak in m
- $\vartheta$  invalshoek van het geluid op het reflectievlak in graden

Reflecties die later dan 100 ms aankomen bij de ontvanger (en boven het nagalmgeluidniveau uitkomen), zijn storend en reduceren de spraakverstaanbaarheid. Men spreekt dan over echo's en flutterecho's (zie figuur 2).



figuur 2. pulsresponsie bij een flutterecho

Indien een reflecterend oppervlak niet vlak is, maar concaaf (hol) dan wordt het gereflecteerde geluid geconcentreerd. Een sprekend voorbeeld hiervan is een koepel in het dak van een gebouw (zie figuur 3).



figuur 3. geluidconcentratie bij een koepel

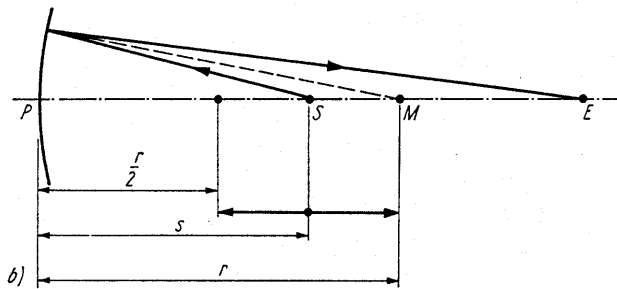
Uitgaande van een cirkelvormig reflecterend vlak (of gedeelte ervan) geldt:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{e} = \frac{2}{r} \quad (4)$$

Met:

- r de straal van het reflecterende concave vlak in m
- s afstand tussen geluidbron en het holle vlak in m  
(verbindingslijn naar het toppunt van het concave vlak/deelvlak)
- e afstand van concentratiepunt tot het holle vlak in m  
(verbindingslijn naar het toppunt van het concave vlak/deelvlak)

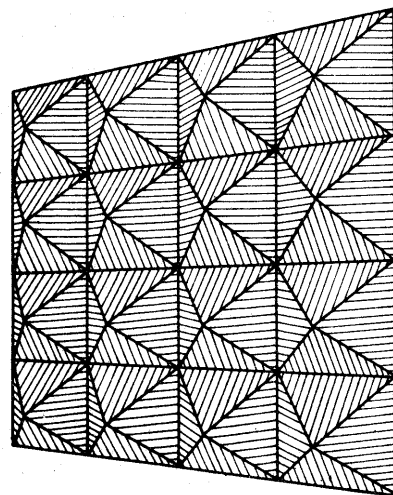
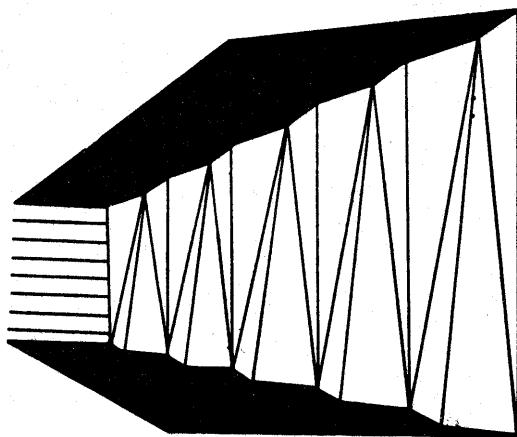
Belangrijk is behalve het middelpunt, gelegen op de afstand  $r$  van het reflecterend vlak, de aanwezigheid van een brandpunt op een afstand  $r/2$  (zie figuur 4).

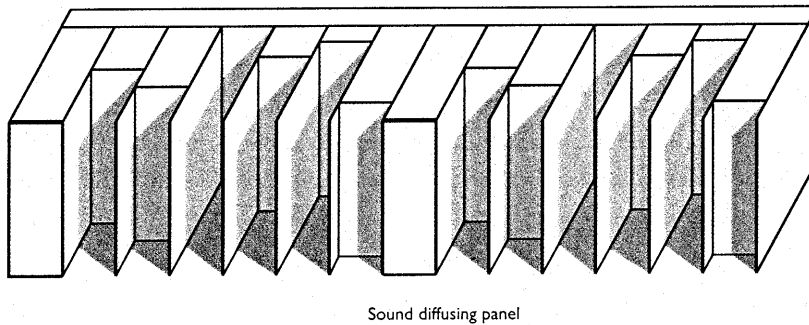


figuur 4. concentrerende werking van concave spiegel

Er is sprake van een concentrerende werking van het concave vlak indien de bron zich op een afstand  $s > r$  van het vlak bevindt. Er ontstaat een concentratie van het geluid conform (4) waarbij voor  $e$  geldt:  $\frac{1}{2}r < e < r_0$ . Bron en concentratiepunt kunnen ook met elkaar verwisseld worden. Er treedt een divergentie van het geluid op indien de bron dichtbij het gekromde, reflecterende vlak ligt, namelijk voor  $s < \frac{1}{2}r$ .

Voor een auditorium met een reflecterende concave achterwand betekent dit vaak dat ongewenste concentratie van het geluid alleen vermeden kan worden, indien de achterwand geluidabsorberend of verstrooiend (diffuserend) is uitgevoerd (zie figuur 5).





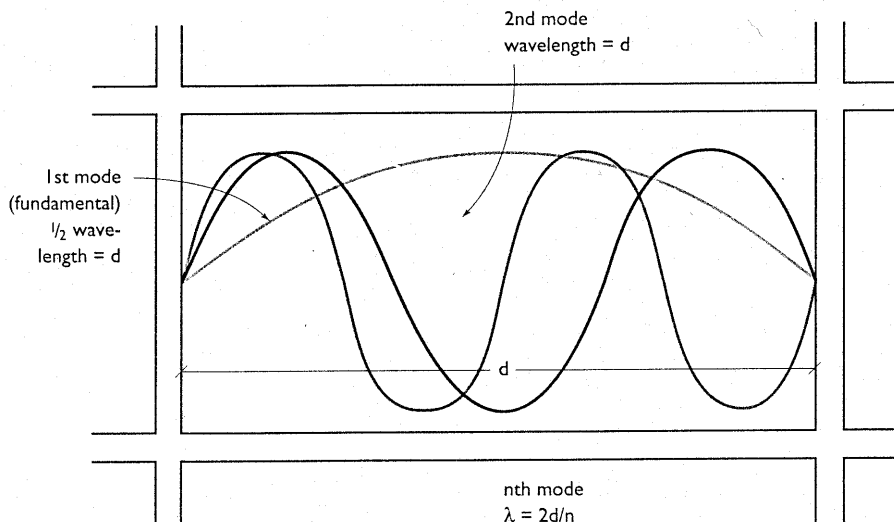
figuur 5. voorbeelden van diffuserende, verstrooiende vlakken

Een bijzondere vorm is een volledige cirkelvormige plattegrond die - als de spreker vlakbij de wand staat - als een fluistergalerij werkt; het geluid dat "scherend" op de wand invalt, wordt via diverse reflecties langs de wand geleid waardoor ook de geluidenergie daar geconcentreerd wordt. Overall langs de wand is de spreker goed te horen.

Bolle (convexe) vlakken zorgen voor een verstrooiing van het geluid en voorkomen zodoende echo's.

### 3 Staande golven

Tussen evenwijdige wanden van een ruimte kunnen zich staande golven ontwikkelen. Kenmerk van staande golven is dat het geluidniveau - in tegenstelling tot een statistisch geluidveld - van plaats tot plaats sinusvormig varieert. Dat wil zeggen dat het geluidniveau geen relatie heeft met de afstand tot de geluidbron, maar wel met de afstand tot de reflecterende wanden (zie figuur 6).

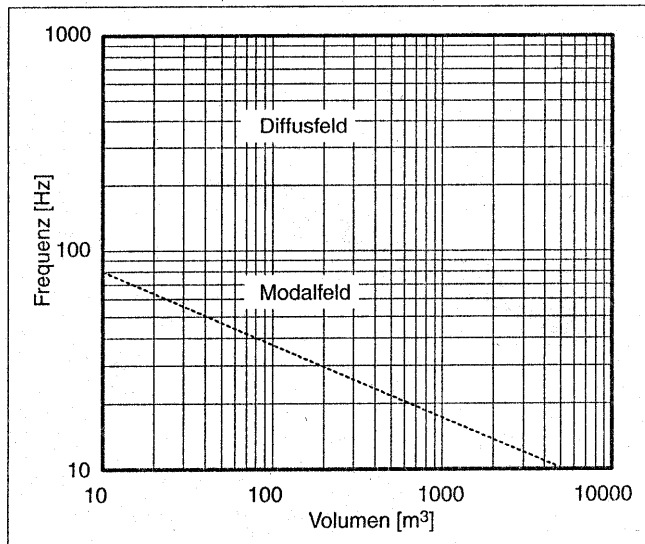


figuur 6. staande golven in een ruimte

Staande golven komen vooral bij de lagere frequenties hoorbaar voor. Het resultaat is, dat vlakbij de reflecterende wand het geluidniveau het hoogst is en dat zich dit voor ieder  $\frac{1}{2}$  golflengte afstand tot het reflecterend vlak herhaalt. Het minimum niveau herhaalt zich ook op ieder  $\frac{1}{2}$  golflengte van elkaar maar begint op  $\frac{1}{4}$  golflengte van het reflecterende vlak. Het verschil tussen het maximum en minimum geluidniveau kan 20 dB bedragen en is dan ook

voor een luisteraar goed hoorbaar. Vaak zijn staande golven merkbaar als “gedreun”. Staande golven zijn alleen hinderlijk als ze boven het statistisch geluidveld uitkomen en in het van belang zijnde hoorbaar frequentiegebied liggen.

De laagste eigen frequentie die ontstaat, is een functie van het volume van de ruimte (zie figuur 7).



figuur 7. frequentiegebied met voornamelijk een modaal geluidveld respectievelijk een diffuus geluidveld als functie van het volume

Voor hogere frequenties ontstaan als functie van de afmetingen diverse staande golven. Zoals reeds gezegd, zijn staande golven niet meer relevant indien ze niet afzonderlijk waargenomen kunnen worden en daardoor als het ware deel uitmaken van het statistisch geluidveld. Dit is het geval boven de frequentie  $t_s$ :

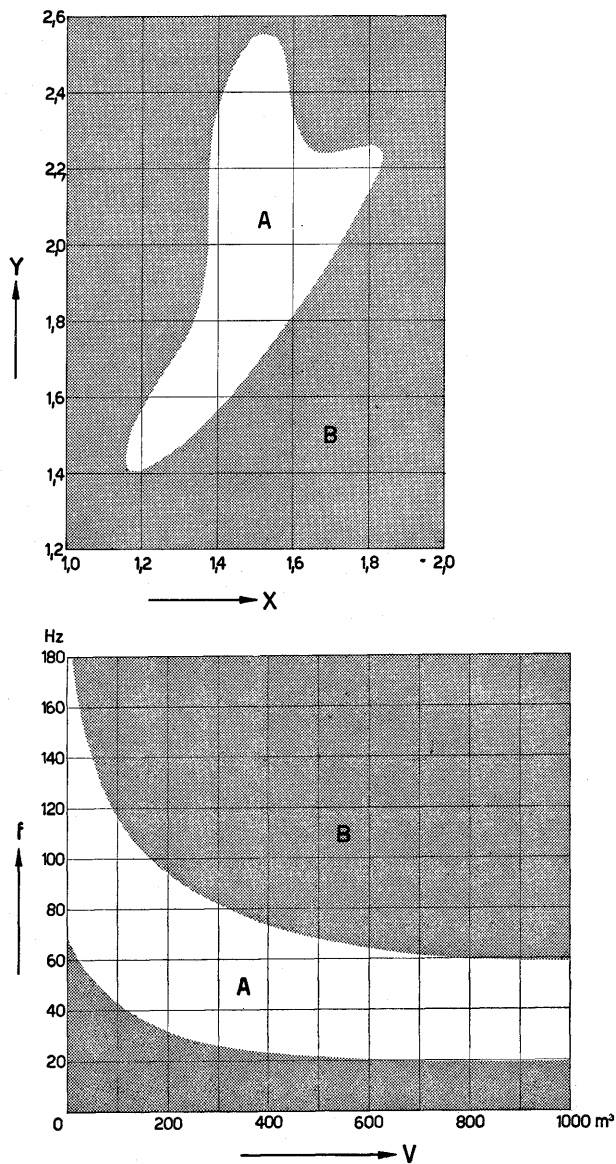
$$t_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (5)$$

Met:

$t_s$	grensfrequentie voor het modale geluidveld in Hz
$T$	nagalmtijd in s
$V$	volume in $m^3$

Hinderlijke staande golven kunnen vermeden worden door:

- voldoende laag frequent geluidabsorberend vermogen te realiseren;
- een ruimtevorm te kiezen die een zo groot mogelijke dichtheid van zoveel mogelijk eigen frequenties oplevert. Aan [1] is figuur 8 ontleend die een aanbeveling doet voor de verhouding van ruimte-afmetingen als functie van het volume.



a. verdeling van eigen frequenties  
A = gunstig B = ongunstig

b. geldigheidsgebied figuur a  
A = geldig B = ongeldig

figuur 8. gewenste ruimteverhouding ter voorkoming van resonantie-effecten

## LITERATUUR

1. W. Furrer, "Raum- und Bauakustik", Lärmabwehr