

DE GESCHIEDENIS VAN DE ZAALAKOESTIEK

VAN SABINE VIA STRALENMODELLEN TOT MODERNE MEET- EN REKENMETHODEN

DIEMER DE VRIES

EX-TU DELFT

EERST EVEN EEN PAAR BEGRIPPEN EN BASISPRINCIPES

- In dit kader is een “zaal” elke ruimte die (deels) omsloten is door constructies – in tegenstelling tot “vrije veld”. Daarom wordt ook wel de term “ruimteakoestiek” gebruikt – misschien beter
- Om de informatie van een akoestisch signaal (spraak, muziek) goed te ‘verstaan’ is goede waarneembaarheid van het *directe* geluid vereist
→ goede *zichtlijnen* (ogen dicht bij oren – “goed zien is goed horen”)
- Voor *spraakverstaanbaarheid* is toevoeging van *vroege reflecties* (binnen ca. 50 ms -> ‘omweg’ < ca. 17 m) nuttig – verder *weinig galm* gewenst
- Voor optimale *muziekbeleving*: toevoeging van specifieke reflectiepatronen in tijd en ruimte, afhankelijk van genre en bezetting

DE OUDE ROMEINEN e.a.



Hierapolis, Turkije

- *Amfitheatres*, prima zichtlijnen, dus goede waarneembaarheid *direct geluid*
- Soms ook objecten of muren achter het podium -> *vroege reflecties*
- Goede *spraakverstaanbaarheid*
- *Geen galm*, dus in principe ongeschikt voor muziek

AMFITHEATER VAN VERONA



- Nog steeds in gebruik, met moderne technologische voorzieningen
- Vooral gebruikt voor operavoorstellingen
- Maar nog steeds geen galm 😞
- Visuele ervaring en ambiance maken er toch een 'belevenis' van...

KATHEDRALEN



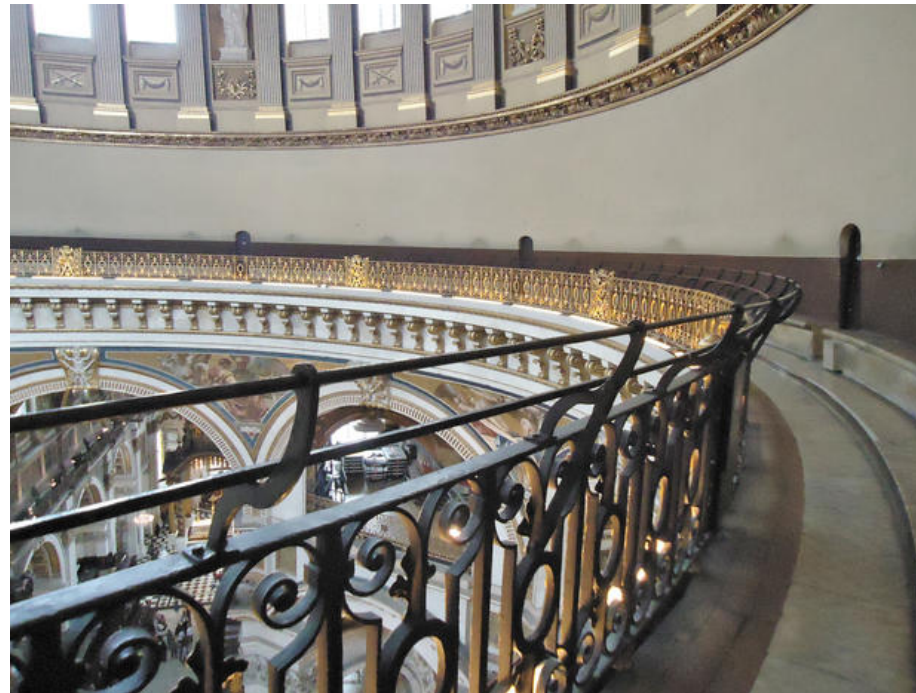
Sint Janskerk, Gouda



- Enorme volumes -> zeer lange nagalmtijden -> zeer slechte spraakverstaanbaarheid
- Enige 'hulp' van reflector boven de kansel
- Ook voor meeste muzieksoorten ongeschikt, behalve voor de ruimte geschreven orgelcomposities

WHISPERING GALLERIES

- Tot de 19^e eeuw werd alleen bewust aandacht aan ‘zaalakoestiek’ geschonken in het kader van artefacten zoals ‘whispering galleries’



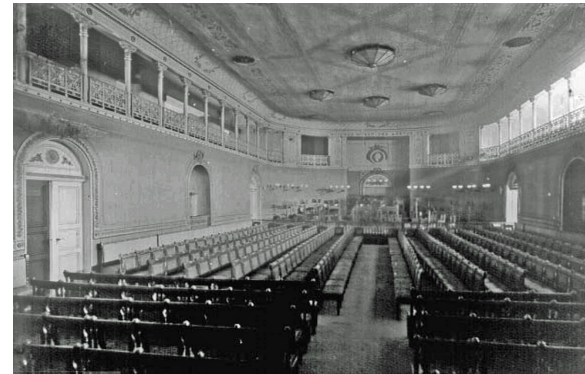
St. Paul's, Londen

SCHOENENDOZEN

- De ‘schoenendoos’ was een intuïtief concertzaalontwerp - ontstaan zonder enig akoestisch advies – dat uitstekend bleek te voldoen en dus navolging vond.



Musikvereinssaal
Wenen
Hansen, 1870



Altes Gewandhaus
Leipzig
Gropius, 1884
Verwoest in WOII



Concertgebouw
Amsterdam
Van Gendt, 1888



Symphony Hall
Boston
McKim, Mead and
White, 1900

WALLACE CLEMENT SABINE (1868-1919)



- Bij ontwerp en bouw van Boston Symphony Hall was voor het eerst een akoestisch adviseur betrokken: Wallace Clement Sabine
- Hij had als eerste onderzoek gedaan – theoretisch en door metingen - aan het verband tussen nagalmtijd T , zaalvolume V en aanwezige hoeveelheid absorptie A in een ruimte en kwam tot de onsterfelijke en simpele formule

$$T = \frac{V}{6A}$$

SABINE'S FORMULA

- Nog eens: $T = \frac{V}{6A} = \frac{V}{6S\alpha}$
- T is de nagalmtijd gebaseerd op 60 dB niveauafname (s), V is het ruimtevolumen (m³) en A de hoeveelheid absorptie uitgedrukt in equivalent oppervlak 'open raam' (m²), S het oppervlak van de ruimtebegrenzingsvlakken (m²) en α de gemiddelde absorptiecoëfficiënt van de grensvlakmaterialen
- De formule klopt niet qua dimensies: in de factor 6 zit de geluidssnelheid (m/s)
- De formule is gebaseerd op de aanname dat het geluidsveld in de ruimte *diffuus* (homogeen en isotroop) is – en dat is het niet
- De grootte A is in de praktijk niet of nauwelijks te bepalen
- Kortom: de formule heeft zeer beperkt praktisch nut!

NAGALMTIJDBEREKENING

- Decennialang was de nagalmtijd de enige serieuze zaalakoestische parameter, met als streefwaarde: 2 seconden in een bezette concertzaal
- Omdat Sabine's formule geringe praktische voorspellingswaarde heeft werd steeds gezocht naar betere alternatieven – met beperkt succes

NAGALMTIJDFORMULE VAN KOSTEN



- Cornelis Willem (Kees) Kosten (hoogleraar TU Delft 1951-1972) leidde rond 1960 – als adviseur bij de bouw van “De Doelen” in Rotterdam - uit gegevens van tientallen concertzalen beschreven in het boek “Music, acoustics and architecture” (Leo L. Beranek) een praktische variant voor volle concertzalen met *harde grensvlakken* af
- Hij ging ervan uit dat alle absorptie in een concertzaal evenredig is met het aantal aanwezigen (orkest + publiek)
- Zo kwam hij tot $T = \frac{V}{6S_s \alpha_{eq}}$, waarin S_s het ‘bezeten’ vloeroppervlak is en α_{eq} een evenredigheidsconstante (‘equivalente absorptiecoëfficiënt’) van 1,07
- Er volgt: voor een nagalmtijd van 2 seconden is een zaalvolume van ca. 10 m³ per persoon nodig

METEN VAN NAGALMTIJDEN

Sabine's meetopstelling

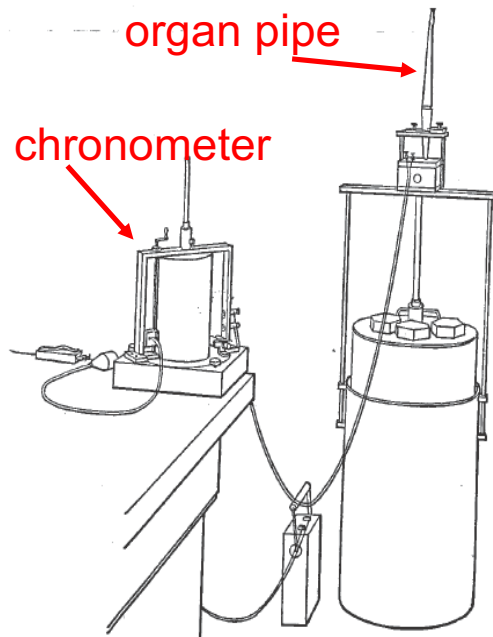


Fig. 1. Chronograph, battery, and air reservoir, the latter surmounted by the electro-pneumatic valve and organ pipe.

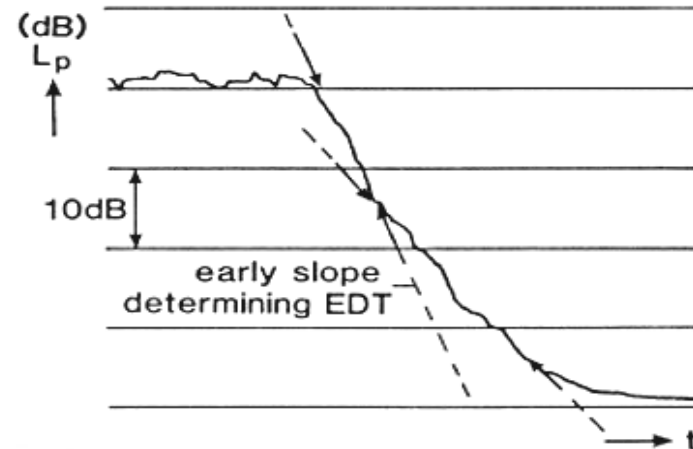
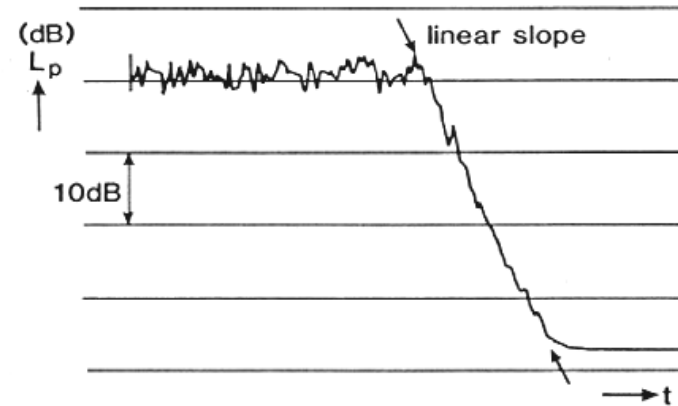
niveauschrijver tot ca. 1960



- In het *digitale tijdperk* allerlei moderne meet- en processingsystemen

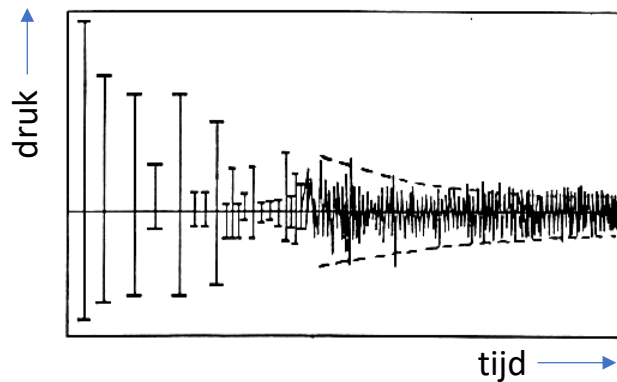
NAGALMCURVEN

- In 'diffuus' veld: rechte lijn, extrapolatie mogelijk naar 60 dB-nagalmtijd
- In 'gekoppelde ruimten': double decay, nagalmtijd niet gedefinieerd, Early Decay Time (afnametijd 10 dB) relevant

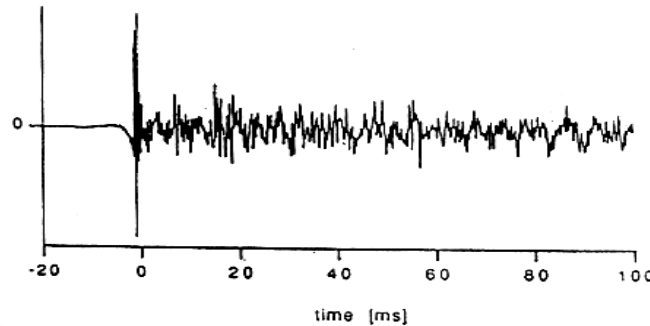


PULSRESPONSIES

- Nagalmcurven bevatten geen informatie over reflectieverdeling in de tijd.
- Daarvoor is registratie van *pulsresponsies* nodig.



theoretisch

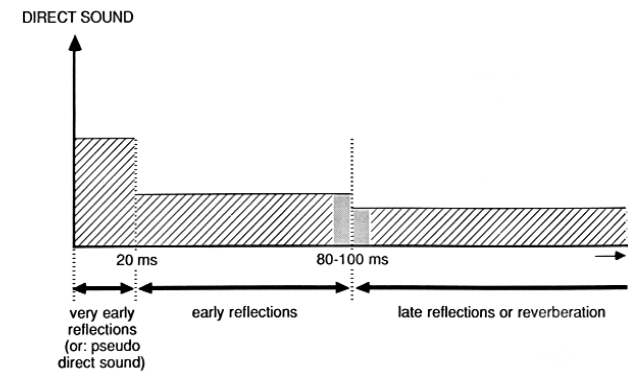


praktisch

- Kwam in zwang rond het midden van de 20^{ste} eeuw

TIJDINDELING VAN PULSRESPONSIES

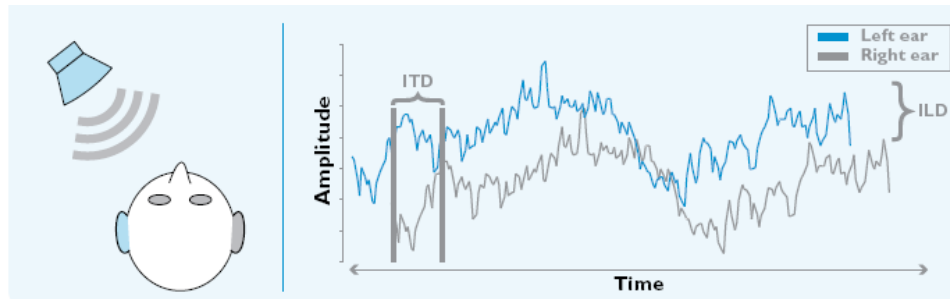
- Pulsresponsies worden vaak in verschillende 'tijdvensters' ingedeeld, waarin de energie kan worden gerelateerd aan specifieke perceptie-aspecten



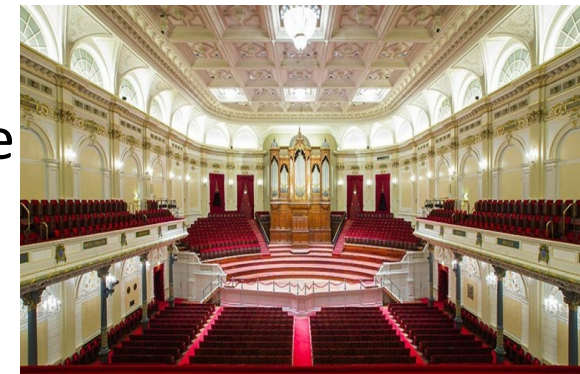
- (pseudo-)direct: spraakverstaanbaarheid, detail hoorbaarheid
- vroege reflecties: transparantie, ruimtelijkheid (mits *lateraal*), onderlinge hoorbaarheid orkestleden
- late reflecties (nagalm): warmte, helderheid, volheid van klank

LATERALE REFLECTIES

- Komen *gedecorreleerd* bij de twee oren aan, hetgeen leidt tot perceptie van ruimtelijkheid



- Veel werk op dit terrein in de jaren 1960 door Harold Marshall (1931, Auckland NZ)
- *Zijbalkons* van het Concertgebouw genereren optimale laterale reflecties qua richting en vertraging



PARAMETERS UIT PULSRESPONSIES

- Er zijn veel parameters gedefinieerd, gebaseerd op energieverhoudingen in de verschillende tijdvensters

$$par = \frac{\int_{T_1} p^2(t) dt}{\int_{T_2} p^2(t) dt}$$

- Voorbeelden:

Definition, maat voor spraakverstaanbaarheid

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Clarity index, maat voor transparantie van muziek

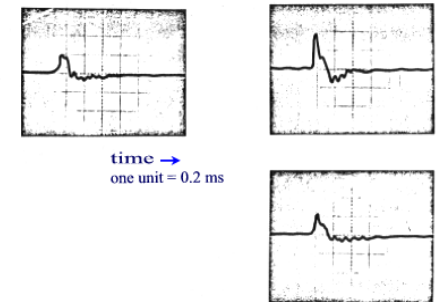
$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} [dB]$$

Lateral Energy Fraction, maat voor ruimtelijkheid

$$LEF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{fig8}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$$

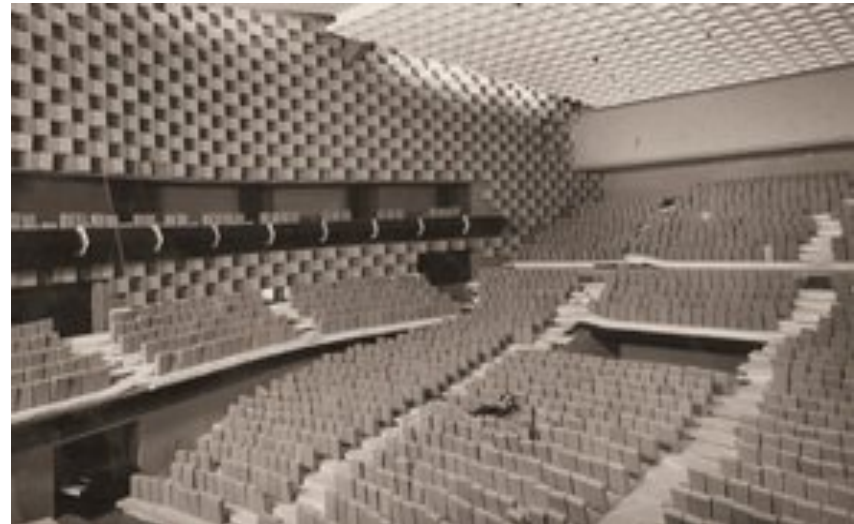
METEN VAN PULSRESPONSIES

- Aanvankelijk met alarmpistolen, doorgeprikte ballonnen e.d., die een kortstondig signaal afgeven
- Voorbeeld: registratie van alarmpistoolschoten in dode kamer TU Delft (Diemer de Vries, 1970)
- Nadelen:
 - geen puls, maar oscillatie
 - slechte herhaalbaarheid, ook qua afstralrichting
- Later: computergestuurde signalen ('sweeps' e.d.) die via *deconvolutie* tot pulsen werden teruggerekend



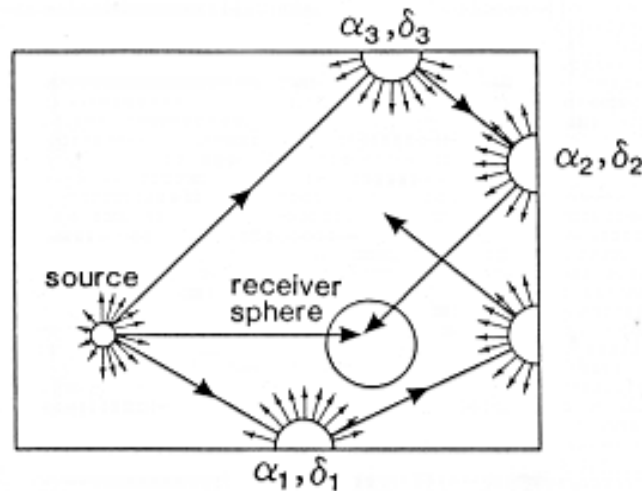
VOORSPELLEN VAN PULSRESPONSIES

- In het analoge tijdperk was berekenen van ‘de akoestiek’ (zeg: pulsresponsies) nog niet mogelijk.
- Men bouwde *schaalmodellen* (vaak schaal 1:10) van de ontworpen zaal. Zo ook bij de bouw van “De Doelen” in Rotterdam (jaren 1960)
- Ook *golflengten* van testgeluid 1:10, dus *frequenties x 10* → vonkbrug als bron en mini-microfoons als ontvangers
- Ook absorptie moest meegeschaald → lucht in model werd *gedroogd*
- In het digitale tijdperk werd het mogelijk om pulsresponsies te *berekenen*, met software gebaseerd op fysische (meest ‘geometrische’) modellen



FYSISCH REKENMODELLEN (1)

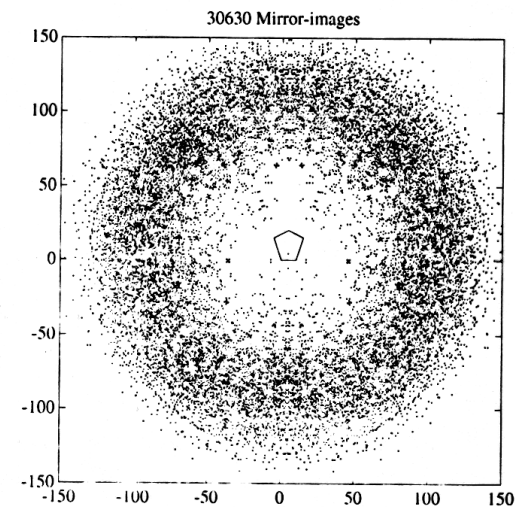
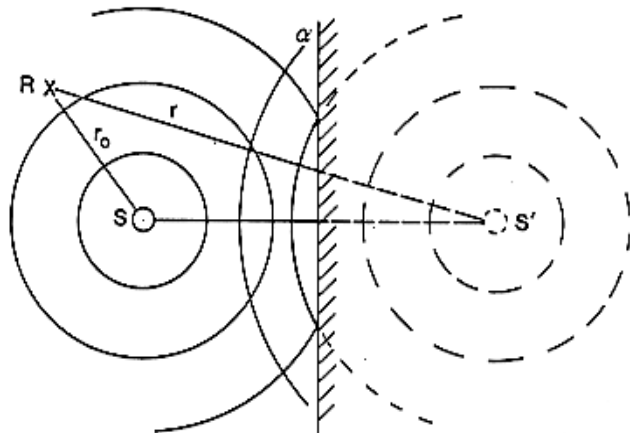
- Ray tracing (*stralenmodel*) – fysisch *incorrect*: geluid plant zich voort als interfererende *golven*, niet als stralen



- Daarom resultaten *onnauwkeurig*, zeker bij lage(re) frequenties
- Nuttig voor *globale* orientatie

FYSISCHE REKENMODELLEN (2)

- *Spiegelbronnenmodel* – is al beter: interferentie kan in principe worden meegenomen

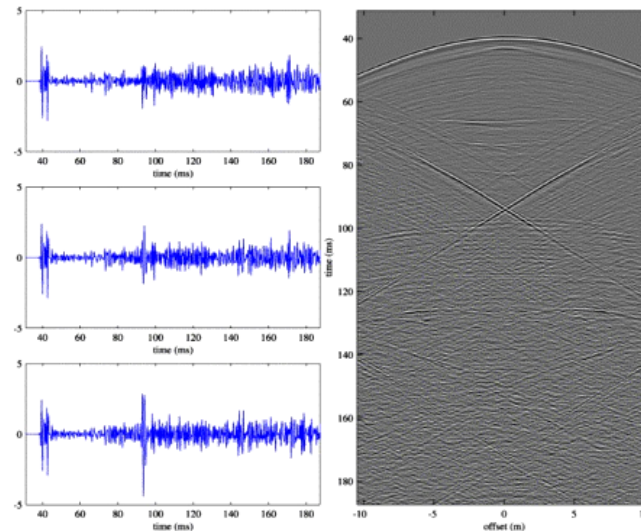


- In de 21^{ste} eeuw: op golftheorie gebaseerde modellen in ontwikkeling

ARRAYMETINGEN VAN PULSRESPONSIES



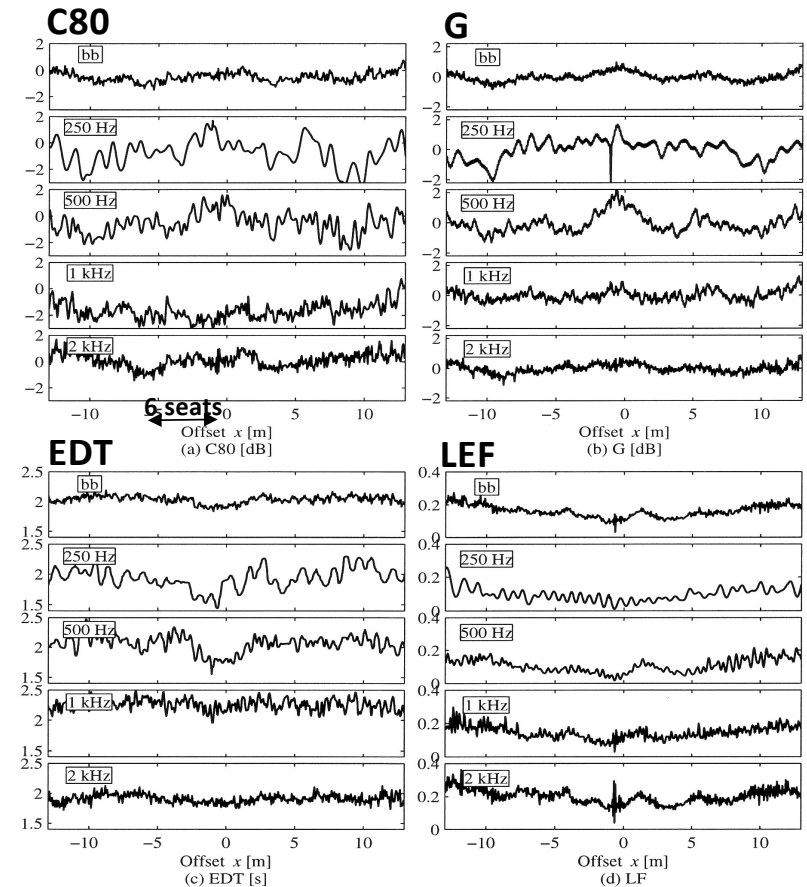
- Guus Berkhout (hoogleraar Akoestiek TU Delft 1976-1998) introduceerde *arraytechnologie* in de zaalakoestiek ter verkrijging van *ruimtelijke* informatie en inzicht



- *Golfkarakter* van geluid wordt zichtbaar!

SPATIELE FLUCTUATIE VAN PARAMETERS

- Als uit iedere pulsresponsie van een arraymeting *akoestische parameters* worden berekend kan het *ruimtelijke* gedrag ervan worden bestudeerd
- *Metingen* in “De Doelen” laten significante *fluctuaties* over kleine afstanden zien
- Verklaring: *interferenties!*
- *Simulaties* tonen vergelijkbare effecten
- Individuele *lokale* metingen/berekeningen hebben dus *weinig voorspellende waarde* voor andere (ook naburige) plaatsen
- Stof tot nadenken!



VARIABELE AKOESTIEK

- *Multi-functionele* ruimten vragen om *variabele* akoestiek
- Gebaseerd op het Sabine-concept is al heel lang aan de vraag tegemoet gekomen door flexibiliteit in *zaalvolume* (beweegbare plafonds e.d.) en *absorptiehoeveelheid* (draaibare panelen met reflecterende/absorberende/verstrooiende oppervlaktestructuren)
- Al sinds het midden van de vorige eeuw (Royal Festival Hall Londen, 'Assisted Resonance') worden *elektro-akoestische* systemen toegepast om de gewenste variatie te bereiken, met tegenwoordig in toenemende mate gewaardeerd resultaat – maar gemeengoed is het nog niet...

STATUS QUO EN TOEKOMSTVISIE

- Inzicht, kennis en technologie zijn de laatste eeuw enorm toegenomen en veel problemen zijn opgelost – daarom worden in binnen- en buitenland ook zoveel (zaal-)akoestische onderzoeksgroepen opgeheven ☹️
- ‘Zwakke plekken’:
 - het correct modelleren van geluidvelden in zalen
 - de parameters die de relatie tussen fysica en perceptie beschrijven
- Door beperking van de opleidingen dreigt begrip van de *fysische* basis van de akoestiek te verdwijnen...
- *Laten we optimistisch blijven!* 😊

DANK VOOR UW AANDACHT!