



# BOUWFYSICA

KWARTAALBLAD VAN DE NEDERLANDS VLAAMSE BOUWFYSICA VERENIGING



## AKOESTIEK IN SPORTZALEN

▶ BRANDVEILIGHEID VAN ATRIA ▶ ENERGY EFFICIENT BUILDING IN HOT AND HUMID CLIMATES ▶ CRADLE TO CRADLE ▶ LUCHTVERVERSING IN SCHOLEN

4

2009  
JRG 20

# AKOESTIEK IN SPORTZALEN

Een te lange nagalmtijd in een sportzaal kan worden veroorzaakt door een gebrek aan absorptie of door utterecho's, die meestal ontstaan tussen de wanden als al het absorptiemateriaal op het plafond en aan de bovenzijde van de wanden is geconcentreerd. Als bij meting de geluidsterkte  $G$  en de early decay time  $EDT$  te hoog zijn, is de hoeveelheid absorptie te laag. Indien  $EDT$  en  $G_{wcl}$  in orde zijn, is de verdeling van de absorptie over de ruimte het probleem. Absorberende en/ of verstrooiende materialen in de onderste meters van de wanden bieden dan soelaas om utterecho's te bestrijden. Het is echter nog onbekend in hoeverre hoorbare utters daadwerkelijk hinderlijk zijn en bestrijding noodzakelijk is. De spreiding in  $EDT$  en  $G$  is overigens wel te groot om daaruit een alternatieve kwaliteitsmaat af te leiden.



Lau Nijis,  
TU Delft,  
Faculteit Bouwkunde,  
Sector Bouwfysica

## INLEIDING

In 2005 zijn de normen voor sportzalen aangepast [1]. Daarbij werd de maximale nagalmtijd sterker gekoppeld aan de afmetingen van de zaal, zodat de norm wat strenger is geworden voor gymzalen, maar voor middelgrote en grote zalen gelijk is gebleven of zelfs soepeler is geworden. Toch lijkt het alsof in de praktijk het percentage zalen dat de norm haalt eerder af- dan toeneemt. De problemen zijn verspreid over diverse zalen, adviseurs en aannemers, maar gedocumenteerd is er weinig. Een uitzondering hierop vormt een afstudeerverslag van Sander Uittenbosch aan Fontys Hogescholen, waarin de meetresultaten van vier zalen zijn vermeld. Slechts één zaal haalt de gestelde norm [2].

Teneinde de problematiek wat nader te illustreren, de theorie wat uit te diepen en om een paar oplossingsrichtingen te tonen, hebben Monika Rychtáriková en schrijver dezes een congresbijdrage gemaakt voor het NAG-DAGA-congres dat in maart 2009 in Rotterdam werd gehouden [3]. Een belangrijk doel van onze bijdrage was om het geluid in een sportzaal via een ray-tracing-programma en auralisatie hoorbaar te maken. Dat lukt uiteraard niet op papier en daarom zijn de geluidfragmenten tijdens het congres ten gehore gebracht. Ze zijn op een website geplaatst om ze ook na het congres nog te kunnen beluisteren [4].

De voorbeelden zijn op het congres bewust wat abstract gehouden. Figuur 1 geeft drie basisvormen die onder andere zijn behandeld. De bovenste figuur geeft de hal zoals die vaak van de tekentafel komt. De hoeveelheid absorberend materiaal lijkt voldoende maar alle absorptie is op het plafond geconcentreerd. Omdat de kopse wanden nauwelijks absorberen, reflecteert het geluid heen en weer tussen de wanden en ontstaat een (hinderlijke) flutterecho. De middelste figuur heeft absorptie op de wanden waardoor de echo's grotendeels (maar niet helemaal) zijn bestreden. In het onderste voorbeeld worden de reflecties van de wanden naar het absorberende plafond gestuurd. Bij beluistering is de flutter in het

bovenste geval luid en duidelijk te horen. In de onderste twee gevallen is de flutter vrijwel verdwenen en er moet wel heel goed worden geluisterd om het onderlinge verschil te horen. Voor de praktijk maakt het waarschijnlijk niets uit.

In dit artikel willen we ons minder abstract opstellen en ons wat meer richten op de ontwerppraktijk. Daarbij komt vooral de onderste strook van de wanden (van bijvoorbeeld 3 meter hoog) aan de orde. Die is om sporttechnische redenen ("balvastheid") vaak met niet-absorberende materialen uitgevoerd, maar zo'n ontwerp vraagt om moeilijkheden.

## THEORIE IN DE ONTWERPFASE

### Nagalmtijd ( $RT$ ) en geluidsterkte ( $G$ )

De theorie wordt slechts summier behandeld. Diegenen die er dieper in willen duiken worden verwezen naar voornoemde website [5]. In een eerder artikel dat over sportzalen is geschreven, staat een voorbeeld wat nader uitgewerkt [6].

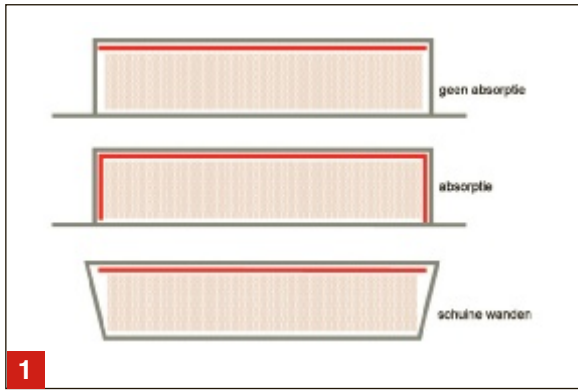
Voor de nagalmtijd  $RT$  (in s) wordt vrijwel altijd gewerkt met Sabine's formule (zie ook [7] voor de redenen):

$$RT = \frac{55,3 V}{c \alpha S} = \frac{0,161 V}{\alpha S} \quad (1)$$

De berekening vindt plaats op het moment dat de sporthal zich nog in de ontwerpfase bevindt. De gemiddelde absorptiecoëfficiënt wordt dan berekend via bijvoorbeeld een Excelbestand waarin absorptiecoëfficiënten en geometrisch oppervlakken worden vermenigvuldigd en gesommeerd. Daaruit rolt een waarde voor  $\alpha$  gelijk aan:

$$\alpha = \frac{\sum_N \alpha_i S_i}{\sum_N S_i} \quad (2)$$

Na voltooiing van de zaal vereist de norm een meting van de nagalmtijd. Echter, het geluidniveau in een sportzaal is in de praktijk minstens zo belangrijk; het geeft het lawaai



dagelijkse praktijk. Daarom werken we liever met de correctie van Barron, geschreven als [9]:

$$G = 31 + 10 \log \left( \frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4(1 - \alpha)^{v/mfp}}{\alpha S} \right) \quad (5)$$

Hierin is  $mfp$  (in m) de gemiddelde vrije weglengte, berekend als:

$$mfp = \frac{4 V}{S} \quad (6)$$

Figuur 2 geeft het geluidniveau als functie van de afstand. De curve volgens formule (5) geeft een hogere waarde dan formule (3) indien  $r < mfp$ . Daarboven is formule (5) lager.

In het rapport van Sander Uittenbosch [2] wordt de suggestie gedaan om te onderzoeken of de afname van het geluidniveau een parameter zou kunnen zijn voor de kwaliteit van een sportzaal. Uit figuur 2 kunnen we afleiden dat de afname inderdaad iets zegt over de hoeveelheid absorptie. De rode curves zijn boven circa 20 m namelijk rechte lijnen. In theorie kan uit de helling dus de waarde van de absorptiecoëfficiënt worden afgeleid. Echter, bij metingen in een echte zaal zal zich op 50 m een achterwand bevinden die het geluidniveau ter plekke ophoogt. Het zal daardoor in de praktijk zeer lastig zijn om een recht stuk in de curve te vinden waaruit een hellingshoek kan worden afgeleid.

**Correcties voor niet-kubische ruimten**

De Sabine-Franklin-Jaeger-theorie bevat een paar noodzakelijke vereenvoudigingen. Voor een ruimte die lijkt op een kubus levert dit goede resultaten op, maar in de meeste ruimten in de praktijk is zowel de nagalmtijd als het geluidniveau hoger dan in een kubusvormige ruimte. In de loop der jaren zijn velerlei correcties ontwikkeld voor de nagalmtijd in niet-kubische ruimten, waarvan de theorie van Nilsson het zelfs heeft geschopt tot officiële norm [10]. Deze norm is overigens tamelijk ingewikkeld. Merkwaardigerwijs is er in de literatuur nauwelijks

Drie voorbeelden van sportzalen zoals ten gehore gebracht in [4]. De bovenste zaal heeft alle absorptie tegen het plafond. Om resterende utterecho's te bestrijden, zijn de onderste twee oplossingen vrijwel equivalent

in de zaal plus het ruisniveau dat van groot belang is voor de spraakverstaanbaarheid. De spraakverstaanbaarheid blijft hier verder onbesproken, zie daartoe nogmaals [6].

Het geluidniveau zal hier worden gerepresenteerd via de "geluidsterkte"  $G$  (in dB). Dat is een zaaleigenschap (ongeacht de sterkte van de bron), die is gedefinieerd als [8]:

$$G = 31 + 10 \log \left( \frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4(1 - \alpha)}{\alpha S} \right) \quad (3)$$

Achterin een zaal is de afstand zo groot dat de eerste term te verwaarlozen is. Dan vinden we dus de waarde van  $G$  voor het "diffuse veld":

$$G = 31 + 10 \log \left( \frac{4(1 - \alpha)}{\alpha S} \right) \quad (4)$$

Deze grootte is dus onafhankelijk van de afstand tot de bron, waardoor een continu geluidniveau ontstaat.

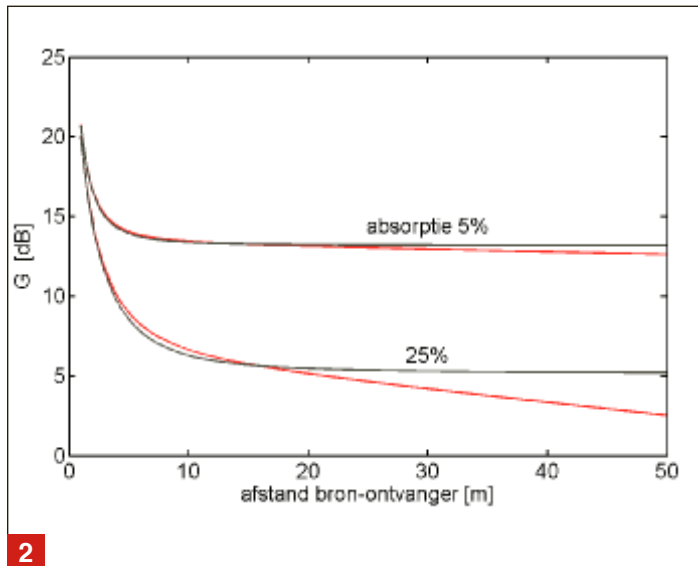
Formules (1) tot en met (4) zijn het resultaat van de Sabine-Franklin-Jaeger-theorie. Echter, het voorspelde continue niveau achter in een zaal komt niet overeen met de

**VERANTWOORDING**

Een artikel in Bouwfysica bombardeert de schrijver kennelijk tot deskundige. In 2004 hebben Aart Schuur en ik een artikel gewijd aan de akoestiek van sportzalen en daarna zijn we meermalen over het onderwerp benaderd, zowel via de min of meer officiële kanalen als in de wandelgangen en aan de borreltafel. Daarbij leerden wij minstens zoveel van het onderwerp als onze gesprekspartners van ons. In dit verband wil ik graag de namen noemen van Ber Mooren en Chris Scheen (van het gelijknamige architectenbureau), John Bouwman, Jitse Fijlman en Gerard Dethmers (van Buro Neman), Marc Noordmeester en Evert de Ruiter (van Peutz bv), Peter van der Velde (van Teensma) en Boudewijn van Ginsven (van Ecophon).

De problemen met sportzalen zijn voor een deel veroorzaakt doordat de akoestische kennis nog onvoldoende is; anderzijds is de wel aanwezige kennis niet goed gedocumenteerd. Van grote waarde voor de verspreiding van de kennis was een congresmiddag op 15 december 2008 die was georganiseerd door Guus Klamerek en Mariëtte Klijn (van Ecophon). Sprekers waren onder andere Jeroen Neggers (van Isa), Theo Apeldoorn (van Acour) en Len van Flin (van de KMLQ), die met name de praktijkproblemen en -oplossingen voor het voetlicht wisten te brengen. Fouten, vergissingen en regelrechte blunders in dit artikel blijven uiteraard mijn verantwoording.

Lau Nijts



2

Uitwerking van de formules 3 (in zwart) en 5 (in rood) voor een ruimte van  $50 \times 30 \times 10 \text{ m}^3$ . De waarde van  $mfp$  is in dit voorbeeld gelijk aan  $13,0 \text{ m}$

gepubliceerd over correcties van de geluidsterkte. Om die reden hebben we hier eerder een congrespaper aan gewijd [11]. Het blijkt dat voor zowel de nagalmtijd als de geluidsterkte een eerste benadering kan worden bereikt als de niet-kubische ruimte wordt vertaald tot een “equivalente kubus” door voor het oppervlak te schrijven:

$$S_{corr} = 6 \times V^{2/3} \quad (7)$$

Voor een kubusvormige ruimte resulteert deze formule in de werkelijke oppervlakte. In ons voorbeeld van  $50 \times 30 \times 10 \text{ m}^3$  is het “gewone” oppervlak gelijk aan  $4600 \text{ m}^2$ , terwijl het gecorrigeerde oppervlak uitkomt op  $3649 \text{ m}^2$ .

De formules kunnen volgens twee methoden worden aangepast om deze benadering in te voeren. In beide gevallen blijft formule (2) ongewijzigd en de toepassing van deze berekening blijft de eerste stap in het proces.

In de eerste methode wordt daarna de effectiviteit van de absorptie gereduceerd met het quotiënt van gecorrigeerd en geometrisch oppervlak, hetgeen in het voorbeeld  $3649/4600 = 0,79$  oplevert. Als dus volgens formule (2) een absorptiecoëfficiënt van 30% wordt berekend, is de effectieve absorptiecoëfficiënt gelijk aan 23,7%. Daarna worden de formules (1) en (5) in hun gegeven vorm gebruikt, waardoor de nagalmtijd en de geluidsterkte stijgen.

In de tweede methode blijft de absorptiecoëfficiënt volgens formule (2) gehandhaafd en worden juist de formules (1) en (5) herschreven als:

$$RT = \frac{0,161 V}{\alpha \times 6 V^{2/3}} = \frac{0,027 \times V^{1/3}}{\alpha} \quad (8)$$

$$G = 31 + 10 \log \left( \frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4(1 - \alpha)^{1/mfp}}{\alpha \times 6 V^{2/3}} \right) \quad (9)$$

In de eerste methode (die wij licht prefereren) wordt als het ware een veiligheidsmarge ingebouwd. De ISA-norm voor sportzalen [1] gaat uit van een absorptiecoëfficiënt van circa 25%. De herberekening laat zien dat in het geval van ons voorbeeld maar beter van 32% kan worden uitgegaan bij de keuze van de materialen voor de sportzaal. Dat is overigens nog geen garantie dat de zaal ook de norm haalt.

De norm NEN-EN 12354-6 [10] werd eerder (te) ingewikkeld genoemd. Het kan nog ingewikkelder met behulp van een ray-tracing programma. Maar dat is dan ook wel gelijk veelzijdig en vlakken kunnen eventueel scheef worden gezet om verstrooiing te simuleren. Er is één aspect waar ray-tracing programma's niet zo goed in zijn: frequentieafhankelijke reflecties. We zullen nog een voorbeeld tegenkomen waarin een schaalmodel dat veel beter doet. Maar verder hebben wij ray-tracing programma's nog nooit op duidelijke fouten kunnen betrappen. Als het ontwerp echt nauwkeurig dient te worden doorgeerekend, is er naar onze mening geen beter alternatief.

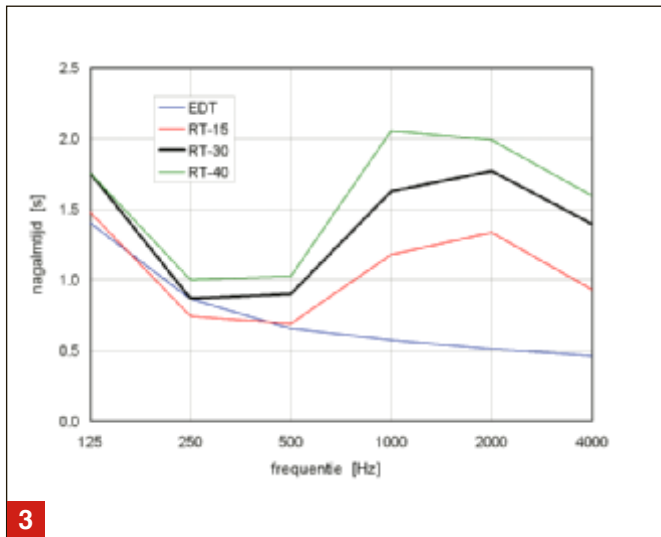
## ECHOS IN EEN BESTAANDE RUIMTE, EEN VOORBEELD

### De nagalmtijd (RT)

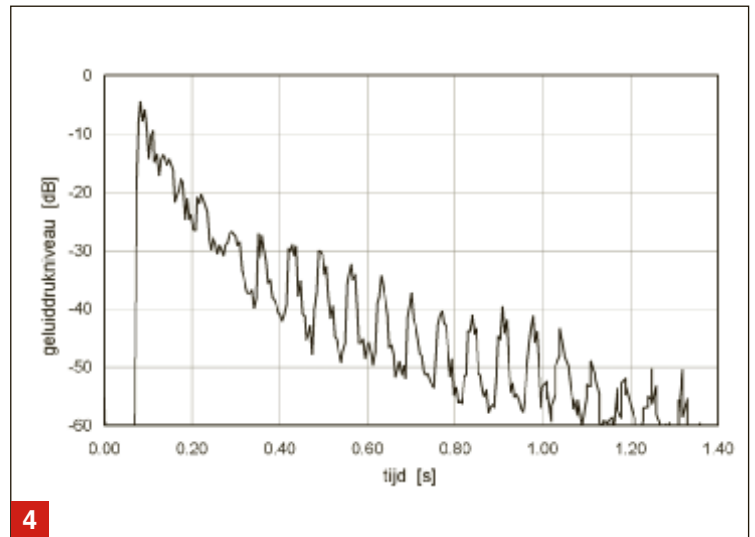
Als de zaal is opgeleverd, is het de beurt aan de meetploeg die de opdracht heeft om de nagalmtijd te meten en te toetsen aan de gestelde norm. Helaas treden daarbij nogal eens teleurstellingen op, ook als de ontwerper zorgvuldig aan het project heeft gewerkt. Aan de hand van een voorbeeld zullen we trachten uit te leggen wat er mis kan gaan. Dat voorbeeld is overigens niet gevonden in een sportzaal maar in een lesruimte van het nieuwe Bouwkundegebouw van de TU Delft. De afmetingen van de ruimte bedragen  $11,9 \times 7,5 \times 5,9 \text{ m}^3$  en de gemiddelde vrije weglengte bedraagt  $5,2 \text{ m}$ . Omdat de ruimte zo hoog is, kan ze model staan voor sportzalen. De ruimte heeft absorptie aan het plafond; van de vier wanden zijn er drie hard uitgevoerd (gladde stuc) en één van de lange zijden is voorzien van gordijnen die zijn uitgezocht op hun geluidabsorberende eigenschappen.

Er zijn metingen verricht in twee ronden. De eerste maal werd alleen de nagalmtijd gemeten met een geavanceerd meetinstrument en een doorgeprikte ballon als geluidbron. De curve van de nagalmtijden als functie van de frequentie vertoonde nogal merkwaardige uitkomsten en om die reden werd in de tweede ronde (een paar weken later) gemeten met een sweeppsignaal uit een luidspreker. Dat signaal werd verwerkt (met zelfgebouwde software) tot een pulsresponsie van de ruimte.

In de tweede ronde zijn meerdere nagalmtijden bepaald. Deze zijn afgeleid uit de uitklinkcurve (de “schroedercurve” [12] die we in figuur 5 nader leren kennen), waarbij het maximale niveau aan het begin op 0 dB wordt gelegd. In figuur 3 zijn vier typen nagalmtijden volgens deze methode weergegeven. De early decay time EDT wordt gefit in het deel van de uitklinkcurve tussen 0 en -10 dB; de nagalmtijden  $RT_{15}$ ,  $RT_{30}$  en  $RT_{40}$  worden gefit tussen respectievelijk -5 en -20 dB, tussen -5 en -35 dB en tussen -5 en -45 dB.



3 De nagalmtijd als functie van de frequentie zoals gemeten in een ruimte van  $11,9 \times 7,5 \times 5,9 \text{ m}^3$ . Het plafond is voorzien van absorberend materiaal, de ramen in de lange zijde zijn voorzien van zware gordijnen; de overige drie wanden zijn hard (stuc)



4 Het histogram van de octaafband van 2000 Hz

Van de ruimte kan een schatting van de nagalmtijd worden gemaakt met formules (1) en (2). Die schatting lijkt heel aardig op de EDT-waarden uit de grafiek, dus inclusief een continu dalend verloop met de frequentie. Maar als we uitgaan van de zwarte lijn voor  $RT_{30}$  (en dat moet van de norm) lijkt het alsof een absorberend materiaal is gebruikt dat in de 1000 en 2000 Hz octaafbanden niet zo goed presteert<sup>1</sup>. Het vreemde gedrag kan echter worden verklaard indien de responsie op een energiepuls nader wordt beschouwd die ook door het meetsysteem wordt geleverd. We zullen dat het “histogram” noemen (zie nogmaals [12]). Figuur 4 geeft een voorbeeld voor de octaafband van 2000 Hz.

In de figuur zien we een zeer prominente flutter. De onderlinge afstand van de reflecties in de tijd is ongeveer 0,07 s, hetgeen weer overeen komt met 23,8 m en dat is dus precies een heen-en-weer lopende reflectie langs de lengteas van 11,9 m. Reflecties in verticale en in dwarsrichting zijn alleen in het begin te zien, maar sterven snel uit door de plafondabsorptie en de gordijnen. De helling is in het begin ook veel steiler dan voor de tijden boven 0,3 s.

De Schroedercurve staat in figuur 5. Volgens Sabine’s theorie zou dat een rechte lijn moeten zijn, maar de flutter veroorzaakt een sterk “doorgezakte” curve. De figuur toont ook twee regressielijnen; de blauwe geldt tussen 0 en -10 dB; de rode tussen -5 en -35 dB. De blauwe lijn is veel steiler dan de rode en daaruit ontstaan dus de verschillen in de nagalmtijd die ons in figuur 3 al in verwarring brachten.

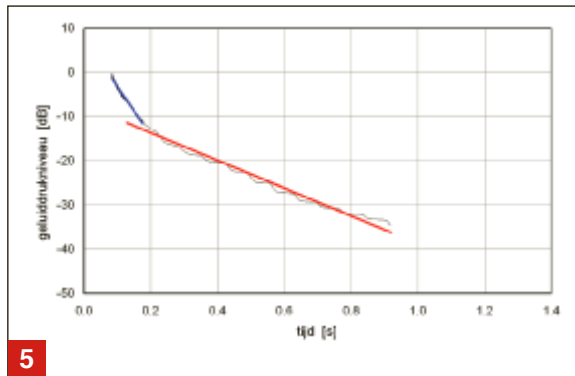
<sup>1</sup> De plafondplaten zijn geleverd door Ecophon. Die voeren in hun Master-serie een type alfa en een type bèta. Het type bèta heeft bewust wat minder absorptie in de hogere frequenties. Het type alfa was bedoeld en geleverd, maar de nagalmcurve duidt veel meer op type bèta. Dat leidde in eerste instantie tot grote verwarring.

**Zichtbare en hoorbare utters**

De belangrijkste vraag is nu: zijn flutterecho’s hinderlijk en dienen ze dus te worden bestreden? Daaraan vooraf gaat nog de vraag: zijn ze überhaupt hoorbaar?

In de gebruikte meetmethode wordt de eigenlijke pulsresponsie steeds weggeschreven als een wav-file en met een geëigend programma kunnen ze dus ook hoorbaar worden gemaakt.

Om de hoorbaarheid te beoordelen, is een zeer summier onderzoekje gedaan met één testpersoon. Daarbij is de hoorbaarheid in beeld gebracht door een RC-filter over het histogram van figuur 4 te halen. Door dit filter wordt een “traagheid” geïntroduceerd die we ook in het menselijk oor vinden en die mede daarom in meetinstrumenten is ingebouwd. Het resultaat staat in figuur 6. Bij een RC-tijd in de orde van 50 ms ontstaat voor de desbetreffende testpersoon een beeld dat overeenkomt met de hoorbaarheid. De pulsen die binnenkomen voor 400 ms zijn niet afzonderlijk hoorbaar; de latere pulsen veroorzaken het typisch ratelende geluid van een flutter. De hoorbaarheid van de echo’s begint bij deze testpersoon dus pas op ongeveer 20 dB onder het beginniveau van de curve. Dat betekent dat de flutter in lopende spraak volstrekt onhoorbaar is; daarvoor is de dynamiek van spraak te gering. De desbetreffende lesruimte wordt voor spraak dan ook positief beoordeeld. Echter, ieder vallend potlood in de ruimte wordt begeleid door een rateltje. Het ligt in de bedoeling dit soort onderzoek systematischer met meer proefpersonen aan te pakken. Hier zien we nog slechts hypothesevorming. Als de vraag naar de hoorbaarheid is beantwoord, volgt de vraag in hoeverre hoorbare echo’s ook hinderlijk zijn. Daarover is nog niets te zeggen, temeer omdat ook de literatuur zich lijkt te beperken tot echo’s in concertzalen, die waarschijnlijk kritischer zijn.



5

De Schroedercurve afgeleid uit de curve van guur 4. Een Schroedercurve geeft “ongeveer” dezelfde curve als een continue ruisbron die wordt uitgeschakeld. De curve is voor  $t = 0$  bewust op nul gezet. De blauwe en de rode lijn geven de regressielijnen; uit de helling wordt de nagalmtijd over het desbetreffende interval berekend. In dit geval dus  $EDT$  en  $RT_{30}$ . Zie ook [13] voor de methode

### Echo's en frequenties

Voorgaande figuren 4, 5 en 6 zijn gemeten in de octaafband van 2000 Hz. In figuur 7 is daar het octaaf van 500 Hz aan toegevoegd.

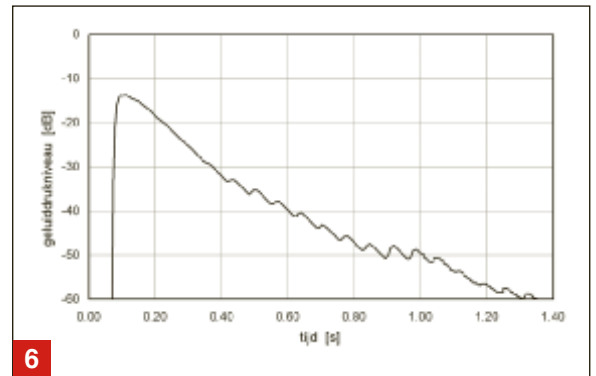
Uit de figuren (en uit het hoorbare signaal) blijkt dat er bij 500 Hz geen flutter optreedt. De nagalmtijd is over de eerste 10 dB ongeveer gelijk aan die bij 2000 Hz, maar na 0,25 s is de helling bij 500 Hz veel steiler en de nagalmtijd dus korter. We zagen dat ook al in figuur 3. Het lijkt overigens ook bij 500 Hz nog niet op de ideale rechte lijn uit de theorie. Dat komt omdat de ruimte geen kubus is. Zie daartoe nogmaals [11].

Ook hier willen we weer een hypothese formuleren: flutters treden op in de hoge frequenties. Die hypothese is gebaseerd op het feit dat we nog nooit een meetresultaat hebben gezien waar 500 Hz meer flutter vertoont dan 2000 Hz. Maar er zit in dit geval meer wetenschap achter: als de golflengte in de buurt komt van de afmetingen van de obstakels wordt de reflectiecoëfficiënt, zelfs bij een spiegelende wand, kleiner dan 1. In de praktijk ziet men bij sportzalen vaak een nagalmtijd die in de laagste frequenties (63 en 125 Hz) lager is dan bij 250 tot 2000 Hz. Dat komt inderdaad door de wandafmetingen. Het effect is daadwerkelijk gemeten in een schaalmodel dat later wordt behandeld.

Indien de hypothese zou worden bevestigd, moeten in de praktijk materialen worden gebruikt die juist bij 1000 en 2000 Hz goed absorberen. Een alternatief is het bevorderen van de verstrooiing van het geluid; dat gaat bij hogere frequenties redelijk eenvoudig omdat met relatief kleine elementen kan worden gewerkt.

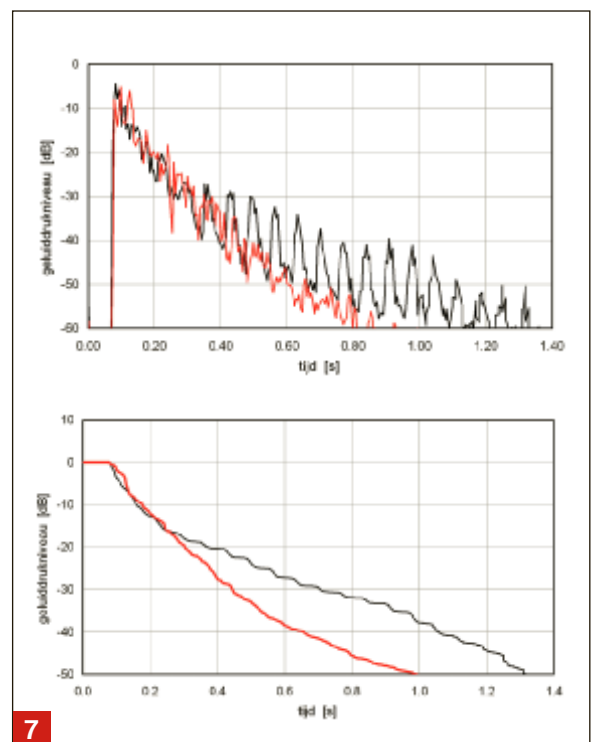
### De geluidsterkte ( $G$ )

In de voorbeeldruimte is, met dezelfde programmatuur, ook de geluidsterkte  $G$  gemeten. De resultaten worden gepresenteerd in de vorm van  $RT$ - $G$ -diagrammen in figuur 8. De bovenste rij geeft  $EDT$  versus  $G$ ; de onderste rij  $RT_{30}$  versus  $G$ . De achtergrond en toepassing van de methode wordt ruimer behandeld in [14].



6

Het histogram van guur 4 indien een sterk FC-lter van 50 ms wordt toegepast. Eigenlijk is ook het oorspronkelijke histogram al gefilterd met een rechthoek ter breedte van 1 ms



7

Het histogram (boven) en de Schroedercurve (onder) uit de guren 4 en 5 indien daar de curve voor 500 Hz (in rood) aan wordt toegevoegd

In de figuren is ook een “ideaalcurve” gegeven. Het volume ( $V$ ) en de oppervlakken ( $S$ ) zijn bekend en met behulp van formules (1) en (4) is de zwarte curve getekend voor een hele serie absorptiecoëfficiënten. Een aantal waarden voor de absorptiecoëfficiënt zijn bijgeschreven bij de curve. De curve is dus specifiek voor deze afmetingen.

In de figuren worden vier microfoonpunten weergegeven. Punt 01 ligt op 1 m van de bron. De waarde van  $G$  is daar hoog, omdat de invloed van het directe geluid een rol speelt (formule 3). De punten 02 en 03 zijn gemeten op twee verschillende plaatsen in de ruimte, maar in beide gevallen is de afstand tot de bron gelijk aan 5,17 m, dus gelijk aan de gemiddelde vrije weglengte ( $mfp$ ) voor deze ruimte. Het punt 04 ligt achter in de ruimte, op ruim 9 m van de bron.  $G$  hoort op deze positie volgens de Sabine-theorie gelijk te zijn aan  $G$  voor de punten 02 en 03, maar

volgens Barron's theorie is  $G$  daar lager, hetgeen (niet alleen hier) steeds door de resultaten wordt bevestigd.

Als we in figuur 8 linksboven naar de punten 02 en 03 kijken, zien we dat  $EDT$  gelijk is aan 0,6 s en dat de bijbehorende absorptiecoëfficiënt gelijk is aan 30%. Bij 2000 Hz vinden we respectievelijk 0,5 s en 38%. Indien theorie en metingen overeenstemmen zouden de punten 02 en 03 samenvallen en precies op de zwarte curve liggen. Te constateren valt dus dat de afwijkingen tussen theorie en metingen gering zijn.

Met wat goede wil kan ook in figuur 8 linksonder ( $RT_{30}$  in plaats van  $EDT$ ; 500 Hz) nog van overeenstemming worden gesproken, maar het gaat helemaal mis in figuur 8 rechtsonder (2000 Hz). De punten 02 en 03 hebben hier een nagalmtijd van ongeveer 1,8 s. De bijbehorende absorptiecoëfficiënt vinden we door de rode lijn te volgen en komt uit op 0,12. Echter, als we uitgaan van  $G$  moeten we de verticale blauwe lijn volgen. De  $G$ -waarden tussen 13 en 14 dB leiden dan tot een absorptiecoëfficiënt van 37%.

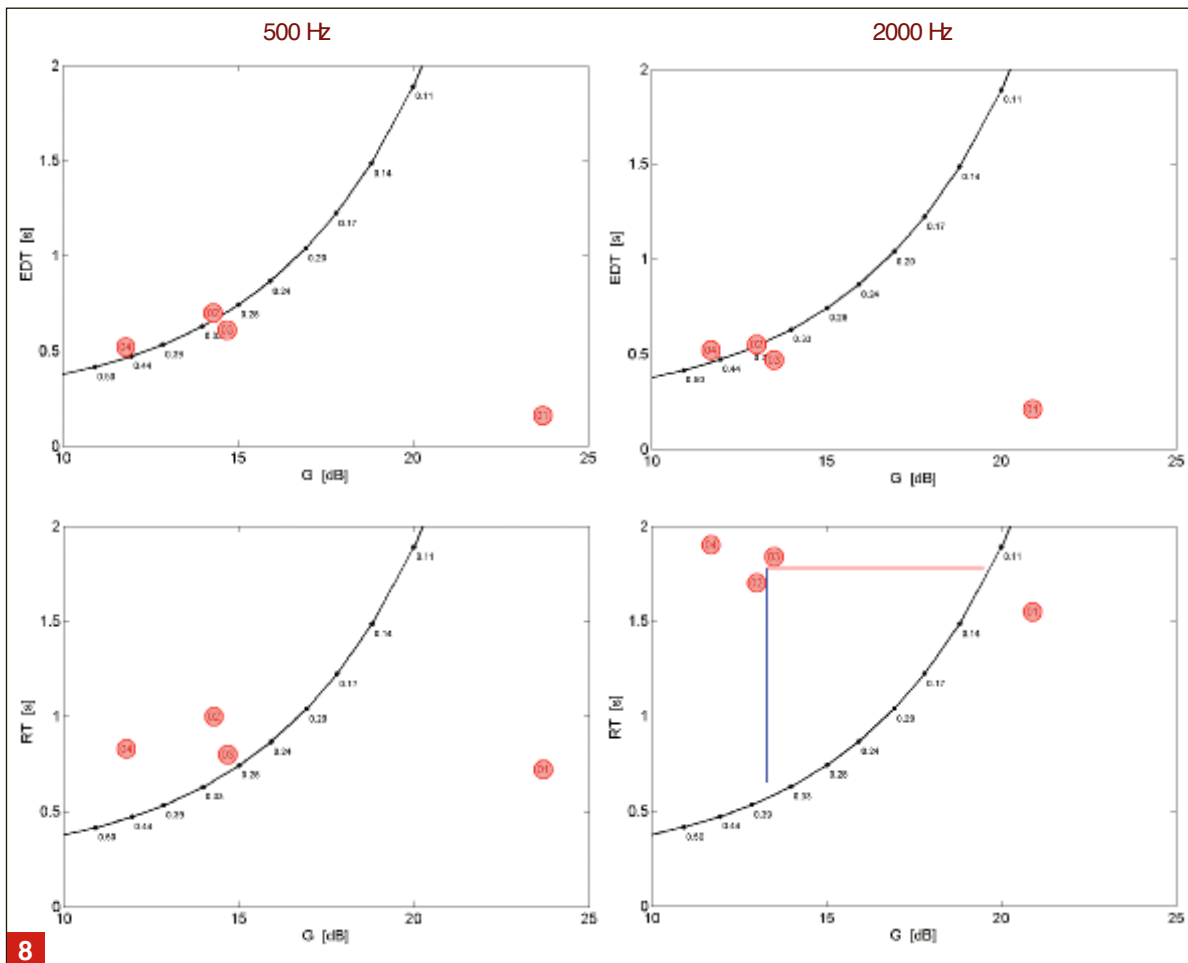
In figuur 6 wordt  $RT_{30}$  bepaald door de "staart" van de galmlcurve.  $EDT$  wordt daarentegen bepaald door het eerste stuk van de curve, maar ook  $G$  wordt voornamelijk door het eerste deel bepaald. De flutter is wel goed hoorbaar, maar de energie in de flutter is zeer klein ten op-

zichte van de energie van het begin. Daarom is de overeenkomst tussen Sabine-theorie en praktijk bij  $EDT$  veel groter dan bij  $RT_{30}$ . Maar ook  $G$  klopt veel beter met de theorie.

Daar komt nog een belangrijke tweede eigenschap van  $G$  bij die in een congresbijdrage nader is aangetoond: voor  $G$  doet de verdeling van de absorptie over de ruimte nauwelijks ter zake [11]. Om een goede  $G$ -waarde te bereiken mag eventueel alle absorptie aan het plafond worden aangebracht. Voor  $RT$  is juist de verdeling van de absorptie over de ruimte van groot belang. De hier behandelde ruimte (ware het een sportzaal) is dus goed als het gaat om het lawaai in de ruimte en ook de spraakverstaanbaarheid is goed te noemen. We hebben dus een goede zaal (2000 Hz is zelfs beter dan 500 Hz) wat betreft  $G$  en  $EDT$  en een slechte zaal wat betreft  $RT_{30}$ . De vraag is nu welke van deze grootheden het meest kenmerkend zijn voor de "akoestische kwaliteit" van de ruimte.

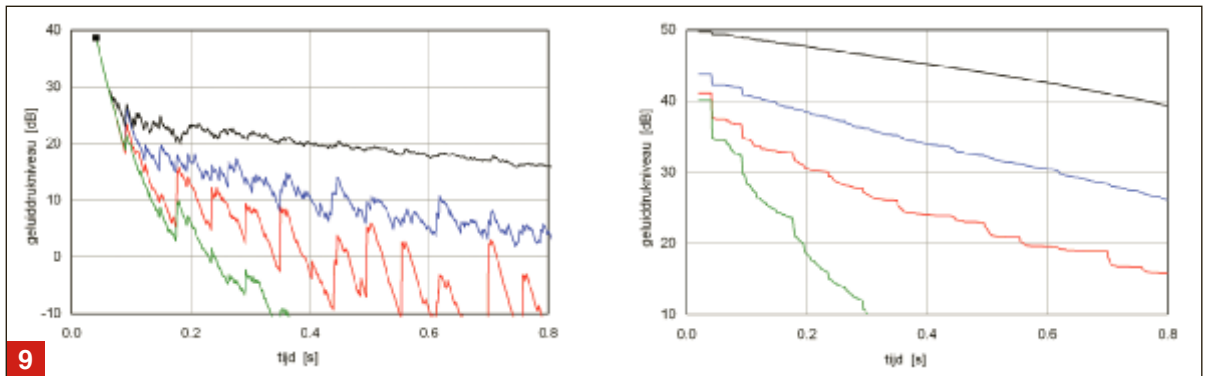
**EEN BETERE MEETMETHODE VOOR EEN SPORTZAAL?**

Uit de voorgaande paragrafen zou men kunnen concluderen dat  $EDT$  extra informatie biedt over het akoestisch klimaat. Helaas is dat alleen het geval in situaties waarbij de flutter optreedt langs één as, zoals in ons voorbeeld. Veel sportzalen hebben echter een 2-D-flutter: zowel langs de lengte- als langs de breedte-as.



8

$RT$  versus  $G$  voor de lesruimte uit het Bouwkundegebouw. De zwarte curve geeft de berekende waarden volgens formules (1) en (4), de bijbehorende absorptiecoëfficiënten zijn weergegeven. De rode punten geven de gemeten waarden. Indien deze ruimte de theorie zou volgen zouden de punten 02 en 03, gemeten op  $r = mfp$ , over elkaar vallen en precies op de zwarte curve liggen



Histogrammen (links) en Schroedercurven (rechts) berekend voor een sportzaal van  $45 \times 30 \times 10 \text{ m}^3$ . De berekeningen zijn uitgevoerd in Catt Acoustic. De bron-microfoonafstand is gelijk aan  $mfp$ . De zwarte curve vertoont een enigszins bol verloop aan het eind; dat komt omdat net niet lang genoeg is gerekend

In figuur 9 staat een voorbeeld waarbij de vloer altijd 5% absorptie krijgt toebedeeld. De wanden en plafond van de zaal hebben 10 of 80% absorptie (zie tabel 1). De rode curve geeft het eendimensionale geval met een “prachtige” flutter in de lengterichting. In het tweedimensionale geval (blauwe curve) werken de twee horizontale velden dusdanig op elkaar in dat de regelmaat verdwijnt. De rode pieken zitten ook in de blauwe curve, maar ze zijn wel een beetje verstopt geraakt. De zwarte curve toont ons een merkwaardige paradox: zichtbare en hoorbare echo's zijn verdwenen. Eén van de manieren om een flutter te bestrijden is dus kennelijk om de galm op te hogen. In een nagalmkamer bestaan immers geen flutterecho's. De effecten zijn ook te horen. In het rode geval treedt een typisch ratelend geluid op; in het blauwe geval is er wel degelijk een lelijk metalig geluid, maar de ratel is verdwenen. In de groene curve is het repeterende patroon verdwenen, maar er is wel één echo over gebleven, na circa 0,15 s. Op de website [4] wordt met een geluidvoorbeeld gedemonstreerd dat die echo duidelijk te horen is bij impulsieve geluiden (een stuitende basketbal) maar bij spraak geen afbreuk doet aan de akoestische kwaliteit. Er is ook een berekening gemaakt met 80% absorptie op het plafond en 30% op alle wanden. Het resultaat ligt (uiteraard) tussen de groene en de rode curve in en bij beluistering van de pulsresponsie begint het er ook heel aardig op te lijken. Dat is interessant voor de praktijk want met een slim gekozen poreuze (bak)steen benaderen we het ideaal. Het onderzoek is echter niet gedegen genoeg om er conclusies aan te verbinden.

Tabel 1: Varianten in absorptieverdeling

	zwart	blauw	rood	groen
abs. plafond [%]	10	80	80	80
abs. lange zijden [%]	10	10	80	80
abs. kopse kanten [%]	10	10	10	80
abs. vloer [%]	5	5	5	5

De Schroedercurven aan de rechterzijde van figuur 9 laten zien dat  $EDT$  niet bruikbaar is om de akoestische kwaliteit van een sportzaal (mede) te bepalen.  $EDT$  hangt te sterk af van de plaats in de ruimte omdat het directe geluid een rol speelt. Dit directe geluid uit zich door een

sterke afval van de Schroedercurve bij 0,04 s. Het microfoonpunt is gekozen op een afstand  $r = mfp$ . Dat is vaak ver genoeg om in het diffuse veld te meten, maar niet in het geval van sportzalen met grote afmetingen. Helaas moeten we eenzelfde conclusie trekken voor  $G$ . Figuur 10 toont de meetuitkomsten van een sportzaal van  $48 \times 30 \times 9,5 \text{ m}^3$  die geteisterd wordt door een flutter bij 2000 Hz. Er zijn acht meetpunten. Punt 01 ligt op 1 m van de bron; de punten 07 en 08 liggen achter in de zaal. De punten 02 tot en met 06 liggen alle vijf op 12,5 m van de bron, hetgeen in dit geval gelijk is aan  $mfp$ . In het ideale geval liggen de punten 02 tot en met 06 over elkaar. Bij 500 Hz (linker figuur) klopt dat heel aardig; bij 2000 Hz klopt er weinig van. Het zijn juist de flutterecho's die deze spreiding veroorzaken.

Uit figuur 10 zijn overigens wel degelijk conclusies te trekken. Omdat de punten 02 tot en met 06 een stuk links van de zwarte curve liggen, mag worden geconcludeerd dat deze zaal goed presteert als het om geluidniveaus gaat; hetzelfde kan worden geconcludeerd voor de spraakverstaanbaarheid (hier verder niet behandeld en getoond). Het is anderzijds uiteraard onmogelijk om  $G$  in de rechter figuur (2000 Hz) te toetsen aan een norm want welk punt zou dan moeten worden genomen? Een verticale lijn vanuit punt 02 levert een absorptiecoëfficiënt van 0,25, terwijl de (samenvallende) punten 04 en 05 leiden tot meer dan 40% absorptie.

Kortom: de nagalmtijd is geen geweldige geschikte grootte voor een norm, maar alternatieven zijn niet direct voorhanden.

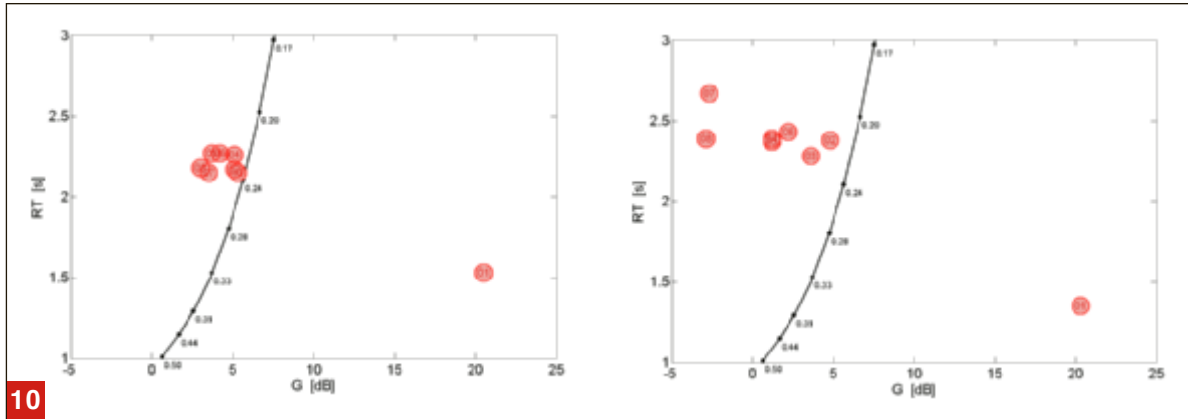
## ENKELE OVERWEGINGEN VOOR DE PRAKTIJK

### Hoeveel absorptie en waar?

De hoeveelheid absorptiemateriaal in een zaal zal zelden een probleem zijn; de norm gaat uit van een gemiddelde absorptiecoëfficiënt van 25%. Als we daar een correctie voor niet-kubische ruimten op toepassen, loopt die waarde op tot ruim 30%, maar met een goed absorberend plafond plus wat absorptie op de wanden kan de hoeveelheid absorptie probleemloos worden gehaald.

Voor het lawaai in de zaal en voor de spraakverstaanbaarheid doet de plaats van het materiaal er eigenlijk niet toe.





**10** RTG-diagrammen voor een sportzaal van  $48 \times 30 \times 9,5 \text{ m}^3$ . Links wordt 500 Hz gegeven, rechts 2000 Hz. Punt 01 ligt op 1 m van de bron; punten 07 en 08 liggen achter in de zaal; punten 02 tot en met 06 liggen in een halve cirkel op afstand  $mfp$

Alle materiaal mag dus op het plafond worden aangebracht. Echter, als alles op het plafond wordt aangebracht ontstaat de flutter die in de voorgaande paragrafen is behandeld. We zullen er thans vanuit gaan dat die flutter moet worden bestreden omdat die tot hinder aanleiding geeft, waarbij we ons realiseren dat ons geen onderzoekresultaten bekend zijn om die bewering te staven.

In figuur 1 zijn de twee basisprincipes voor de bestrijding van een flutter eigenlijk al gegeven. De absorptieoplossing spreekt voor zich; de oplossing met een schuine wand stuurt de reflecties omhoog naar het absorberende plafond. Die oplossing is met papier, potlood en een geodriehoek goed te berekenen. Dat kan omdat de flutter vooral bij 1000 en 2000 Hz moet worden bestreden en juist daar zijn modellen met spiegelbronnen en geluidstralen het meest betrouwbaar. Zoals in eerdergenoemde websitepagina [4] wordt gedemonstreerd, is het tamelijk eenvoudig om flutterecho's te bestrijden. De echo die optreedt na slechts één reflectie tegen de wanden is echter alleen met draconische maatregelen (bijvoorbeeld een dode kamer) te bestrijden. De geluidvoorbeelden laten horen dat het bestrijden van deze echo eigenlijk niet nodig is.

**De onderrand in een sportzaal**

Veel sportzalen hebben absorptie op het plafond én op de wanden. Maar veel absorptiematerialen zijn niet "balvast" en om die reden wordt de onderstrook nogal eens in niet-absorberend materiaal (baksteen, geveerd hout e.d.) uitgevoerd. Om de invloed van de onderstrook te onderzoeken is recentelijk een schaalmodelonderzoek uitgevoerd waarbij juist de onderrand werd onderzocht. Figuur 11 geeft de situatie weer. De sporthal is vertaald in een simpele strook (aan vier zijden) op een harde ondergrond. Vonkbron en microfoon stonden op 22 mm (1,10 m bij schaal 1:1) boven de vloerplaat. Akoestisch is de ideale absorptie door weglating van de wand- en plafondoppervlakken niet helemaal zuiver, maar de invloed van de onderstrook is op deze manier toch heel goed te schatten.

Figuur 12 geeft de nagalmtijden die in het model zijn gemeten. Te constateren valt dat door de harde onderstrook de nagalmtijden steeds boven 2 s uitkomen, zodat zo'n zaal niet aan de normen zal voldoen. De figuur toont twee curven voor een onderstrook van 3 en van 6 m

hoog. De invloed van de hoogte blijkt groot in de lagere frequenties waar de afmetingen in de orde liggen van de golflengte van het geluid. Het voert hier te ver om frequentieafhankelijke reflecties te behandelen, maar juist op dat terrein is een schaalmodel superieur aan een ray-tracing model, waar frequentieafhankelijke buiging altijd via "trucs" moet worden opgelost.

Een goed ontworpen onderstrook is dus een noodzakelijke voorwaarde voor de bestrijding van flutters; het is anderzijds geen voldoende voorwaarde. In figuur 13 staat het reflectiepatroon dat nog steeds kan optreden. Het hangt onder andere af van de absorptiecoëfficiënt van het plafond, maar die is uiteraard nooit 100%. Berekeningen in een ray-tracing programma tonen aan dat er wel degelijk flutterecho's optreden en dat die ook hoorbaar zijn. Anderzijds zijn de situaties uit figuur 13 verre te verkiezen boven die uit figuur 11. Er zijn zelfs praktijkvoorbeelden waar slim geplaatste reclameborden tot het gewenste effect hebben geleid.

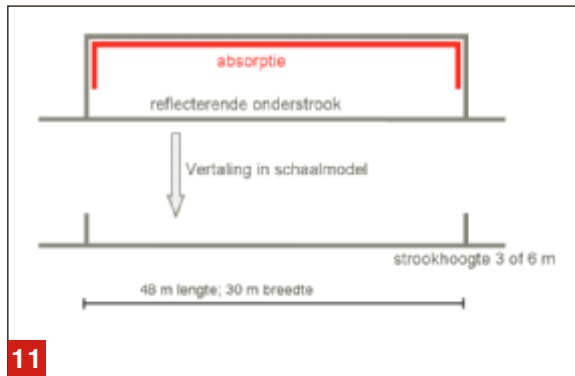
Het is lastig om algemene richtlijnen voor de verdeling van absorptiematerialen te geven, omdat iedere sportzaal een specifieke vorm heeft. De ervaring leert echter dat berekeningen in een ray-tracing model zeer behulpzaam kunnen zijn.

**Werken absorptiematerialen in de praktijk eigenlijk wel?**

Bij het ontwerp wordt ervan uitgegaan dat de bestelde absorptiematerialen in de praktijk ook daadwerkelijk werken. Er kan echter wel degelijk een en ander misgaan. De onderlaag van een sportzaal is moeilijk balvast te krijgen. Een van de (weinige) mogelijkheden is dan om bijvoorbeeld een houten plaat met gaatjes of spleten te nemen. Dit materiaal is in alle mogelijke fineren, kleuren, enz. te vervaardigen. Het probleem met dit soort materialen is echter dat de uitvoering kritisch is. Met behulp van het rekenprogramma Zorba worden enkele exercities getoond om het effect te illustreren [15].

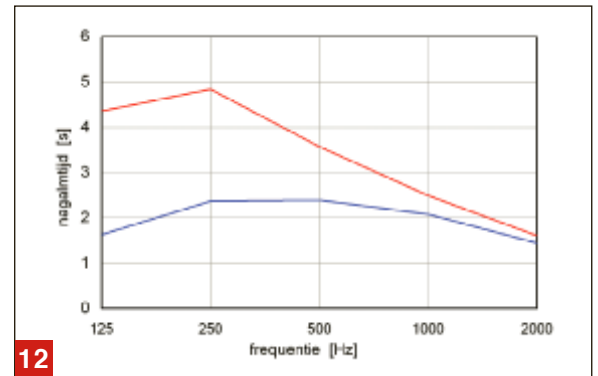
Figuur 14 geeft een gaatjesplaat met een achterliggende laag. Daar moet in ons geval absorberend materiaal in. Er kan in theorie in termen van helmholtzresonatoren worden gedacht, maar in de voorgaande paragrafen is uiteengezet dat absorptie bij 1000 en 2000 Hz nodig is en dat kan alleen worden bereikt met spouwvulling.





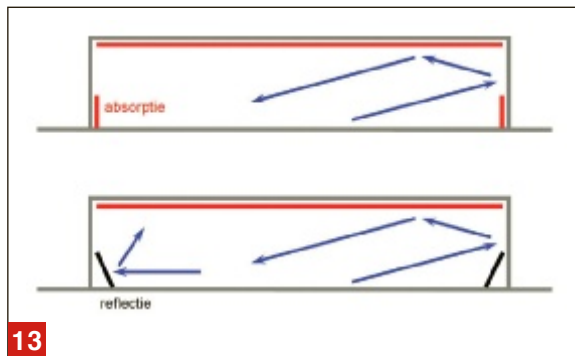
11

Een sportzaal waarin het plafond absorbeert en alle vier de wanden absorptie hebben op de bovenzijde. De onderstrook is reflecterend. Het model is vertaald in een 1:50 schaalmodel waarbij alle absorptie ideaal is verondersteld



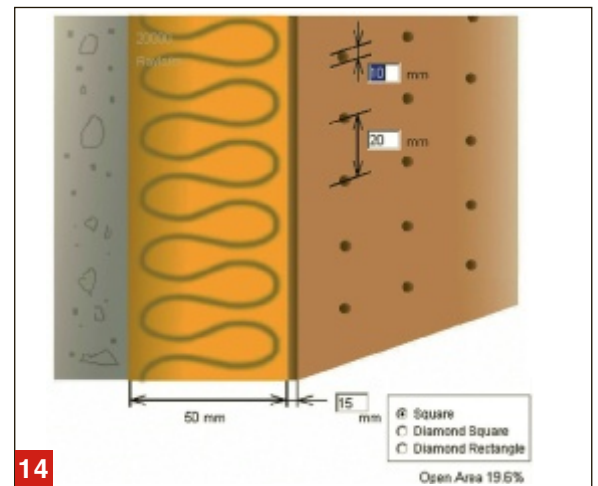
12

De nagalmtijden gemeten in een 1:50 schaalmodel teruggerekend naar een echte zaal. Voor de blauwe lijn is de strookhoogte 3 m; voor de rode lijn is dat 6 m. In het schaalmodel is geen correctie toegepast voor luchtabsorptie. Indien dat wel zou zijn gedaan waren ook de nagalmtijden bij 1000 en 2000 Hz ruim boven 2 s uitgekomen



13

De blauwe pijlen geven het reflectiepatroon indien de bovenzijde niet absorberend is. Alleen de eerste reflectie is getekend, maar er zijn wel degelijk uiterecho's mogelijk al zijn die veel minder prominent dan in figuur 11



14

De basisinstellingen van het Zorba-programma

Figuur 15 geeft de berekende absorptie als functie van de frequentie. De zwarte lijn toont de uitkomsten voor de situatie uit figuur 14. Het materiaal doet het geweldig bij 500 Hz, maar bij 1000 en 2000 Hz begint de absorptiecoëfficiënt al terug te lopen. Uiteindelijk, in de vele kilohertzen, zal de absorptiecoëfficiënt gelijk worden aan de openingsgraad (hier 19,6%) en dat effect begint al in het hoorbare gebied. Vergroting van de openingsgraad door toevoeging van extra gaten helpt, maar dan sla je er wellicht weer een gat in met een hockeybal.

Desastreus is een luchtlaag tussen het absorptiemateriaal en de gaatjesplaat. Dat wordt getoond door de rode en de groene lijn, waarbij een luchtlaag van 2, respectievelijk 50 mm is doorgerekend. Door die luchtlaag wordt een hoop geld en moeite in het water gegooid, maar toch komen dit soort constructies in de praktijk veelvuldig voor. De absorberende laag wordt dan bevestigd op de muur van de zaal, waarna de plaat er op een rachelwerk voor wordt gezet waardoor automatisch een luchtlaag ontstaat.

Platen met een dikte van bijvoorbeeld 1 mm met gaten van 1 mm bij 2 mm afstand (dus veelal staalplaten) zijn volgens Zorba minder gevoelig voor het luchtlaag-effect.

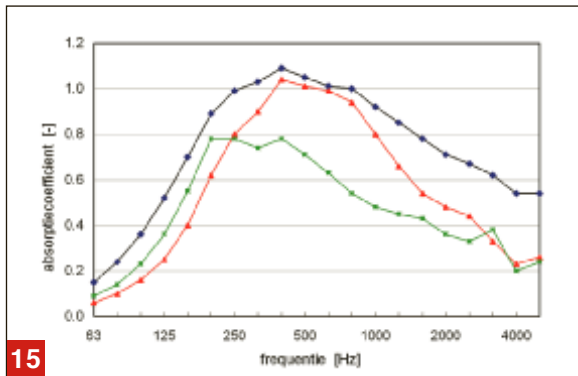
Eigenlijk “kijk” je bij dit soort platen direct naar het absorptiemateriaal. Bovendien worden ze vaak als kant-en-klare cassettes geleverd en zit de absorptie stevig aangedrukt.

Maar ook hier rijzen twijfels in een paar praktijkgevallen. In sportzalen worden voor plafondabsorptie nogal eens stalen trapeziumprofielen toegepast, waarbij de geperforeerde cannelures worden gevuld met absorptiemateriaal. Naar onze eigen ervaring is dit een prima oplossing, maar er zijn een aantal kanttekeningen te plaatsen:

- Er is een geval bekend waarbij de plastic dampremmende laag te veel naar de oppervlakte was aangebracht waardoor het effect voor een deel teniet werd gedaan.
- In het eerder geciteerde rapport van Sander Uittenbosch [2] zijn vier zalen doorgemeten waarvan er drie zo'n dak hebben. Waarom gaat het in één geval prima en is de nagalmtijd in twee andere gevallen te lang?

## CONCLUSIE PLUS NADER ONDERZOEK

In de ontwerpfase van een zaal is een berekening nodig van de totale absorptie van de zaal. De daaruit berekende gemiddelde absorptiecoëfficiënt zal in de orde van 30 à



15 De absorptiecoëfficiënt berekend met het Zorba-programma. De zwarte lijn geeft de situatie zoals geschetst in paragraaf 14. Voor de rode curve is een luchtlaag aangenomen tussen de plaat en het absorptiemateriaal van 2 mm dik. De groene lijn is berekend met een luchtlaag van 50 mm

35 % moeten liggen als er rekening mee wordt gehouden dat in niet-kubische ruimten de effectiviteit van absorptie wat minder is dan voorspeld door Sabine's formules. Voor de spraakverstaanbaarheid en het geluidniveau in de zaal doet het nauwelijks ter zake waar de absorptiematerialen worden aangebracht. Echter, als alle absorptie op het plafond is aangebracht, ontstaan tussen de niet-absorberende wanden flutterecho's die de nagalmtijd aanzienlijk verlengen. Het effect treedt vooral op in de octaafbanden van 1000 en 2000 Hz.

Een ray-tracing programma is niet strikt noodzakelijk voor de berekening, maar het veraangenaamt het leven van een ontwerper/ adviseur wel aanzienlijk. Deze programma's zijn juist voor energieverdelingen bij hogere frequenties zeer geschikt, omdat ze de mogelijkheid bieden om de invloed van lokale absorptie en verstrooiing door te rekenen.

Na voltooiing van de zaal moet de gemeten nagalmtijd worden getoetst aan de norm. Als de nagalmtijd te lang is, is de meting van de geluidsterkte  $G$  een goede graadmeter voor de problemen. Indien ook de  $G$ -waarden niet deugen, is simpelweg te weinig absorptie toegepast. Aanvulling van de hoeveelheid absorptie is dan noodzakelijk. Indien de  $G$ -waarden wel aan de verwachting voldoen, zijn de spraakverstaanbaarheid en het geluidniveau wel in orde, maar zijn flutterecho's de boosdoener. Die zijn overigens ook wel in de pulsresponsie te zien. Een sterk doorhangende curve wijst op flutterecho's. Een paar stevige handen om te klappen en geoefende oren schepven vaak ook duidelijkheid. Flutterers kunnen enerzijds worden bestreden door absorptie op de wanden aan te brengen, anderzijds door de wanden sterk verstrooiend te maken in verticale richting. Vooral de onderste meters van de wanden verdienen meer aandacht dan gebruikelijk.

Nader onderzoek is nodig naar de hinderlijkheid van flutterers in sportzalen. Dat kan worden uitgevoerd met behulp van auralisatie via ray-tracing programma's. Veel flutterers zijn hoorbaar bij pulsvormige geluiden, maar onhoorbaar in lopende spraak. De energie van de flutterers is daarvoor te laag. Indien flutterers relatief weinig hinder veroorzaken, zou het mogelijk zijn om de nagalm alleen te be-

palen over het eerste deel van de galmstaart. Bij meting tussen -5 en -35 dB worden alle flutterers meegenomen, bij een fit tussen bijvoorbeeld -5 en -15 dB worden alleen de energierijkere flutterers meegerekend. Enkelvoudige echo's zijn in sportzalen niet te voorkomen, vooral omdat verstrooiing in sportzalen door bijvoorbeeld meubilair vrijwel nihil is. ■

**BRONNEN**

- ▶ [1] ISA-Sport, *Handboek Sportaccommodaties*, Instituut voor Sportaccommodaties van NOC\* NSF, Arnhem, Netherlands, 2005
- ▶ [2] Uittenbosch, S., *Akoestiek in gymzalen en sporthallen*, Eindhoven, Fontys Hogescholen, ook: Nieuwegein, LBP Lichtveld Buis & partners, 2009
- ▶ [3] Nijs, L. & Rychtáriková, M., *Auralization examples to discuss the reverberation time as a standard for sports facilities*, NAG/ DAGA 2009, International conference on Acoustics, Rotterdam, 2009
- ▶ [4] URL: [www.nijsnet.com/BK/0401002.aspx](http://www.nijsnet.com/BK/0401002.aspx)
- ▶ [5] URL: [www.nijsnet.com/BK](http://www.nijsnet.com/BK), pagina's B.1.1-3, B.3.1-4 en B.6.1 ev.
- ▶ [6] Nijs, L. & Schuur, A., *Het gebruik van de nagalmtijd bij de normstelling van sportzalen*, Bouwfysica 15 pp 9-18, 2004
- ▶ [7] URL: [www.nijsnet.com/BK](http://www.nijsnet.com/BK), pagina B.3.1
- ▶ [8] URL: [www.nijsnet.com/BK](http://www.nijsnet.com/BK), pagina's B.3.2-4
- ▶ [9] URL: [www.nijsnet.com/BK](http://www.nijsnet.com/BK), pagina B.6.1
- ▶ [10] CEN, European Committee for Standardization, *Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces, EN 12354-6*, 2004
- ▶ [11] Nijs, L., *The Distribution of Absorption Materials in a rectangular room*, Internoise, Rio de Janeiro, 2005
- ▶ [12] URL: [www.nijsnet.com/BK](http://www.nijsnet.com/BK), pagina B.1.3
- ▶ [13] URL: [www.nijsnet.com/BK](http://www.nijsnet.com/BK), pagina B.6.3
- ▶ [14] URL: [www.nijsnet.com/BK](http://www.nijsnet.com/BK), pagina B.3.4
- ▶ [15] URL: [www.zorba.co.nz](http://www.zorba.co.nz)

**SYMBOLLEN**

$c$	geluidssnelheid [m/s]
$EDT$	early decay time [s]
$G$	geluidsterkte [dB]
$mfp$	gemiddelde vrije weglengte [m]
$N$	aantal vlakken [-]
$Q$	richtingscoëfficiënt van de bron [-]
$r$	afstand tussen bron en ontvanger [m]
$RT$	nagalmtijd [s]
$S$	totale geometrische oppervlakte [m <sup>2</sup> ]
$S_{corr}$	gecorrigeerde oppervlakte [m <sup>2</sup> ]
$S_i$	geometrische oppervlakte van vlak $i$ [m <sup>2</sup> ]
$V$	volume van de ruimte [m <sup>3</sup> ]
$\alpha_i$	absorptiecoëfficiënt van vlak $i$ [-]
$\alpha$	de gemiddelde absorptiecoëfficiënt berekend over de ruimte [-]