



BOUWFYSICA

KWARTAALBLAD VAN DE NEDERLANDS VLAAMSE BOUWFYSICA VERENIGING



WONEN IN EEN PASSIEFHUIS

- ▶ GELUIDBEHEERSING IN SPORTZALEN – EEN ANTWOORD
- ▶ SPRINKLERBEVEILIGING IN ATRIUMGEBOUWEN ▶ BREEAM-NL WONINGEN

2

2010
JRG 21

GELUIDBEHEERSING IN SPORTZALEN

EEN ANTWOORD AAN EVERT DE RUITER EN MARC NOORDERMEER

In het voorgaande nummer van dit blad hebben Evert de Ruiter en Marc Noordermeer [1] een reactie geschreven op een artikel van mijn hand dat in het nummer daarvoor was verschenen [2]. Op een paar punten wil ik graag wat nader ingaan. Daarbij citeer ik een aantal malen De Ruiter en Noordermeer, maar, om mijn verhaal begrijpelijk te houden, doe ik dat niet in de volgorde waarin de citaten bij De Ruiter en Noordermeer aan de orde komen.



ir. L. (Lau) Njs,
TU Delft, Faculteit Bouw-
kunde, Sector Bouwfysica

DE NAGALMTIJD ALS NORM, IS HET GELUIDNIVEAU EEN BRUIKBAAAR ALTERNATIEF?

Citaat van De Ruiter en Noordermeer:

De hoeveelheid geluidabsorptie duikt ook op in de relatie tussen het geluidvermogen van een bron (L_w) die in een ruimte staat en het geluidniveau in het (diffuse) nagalmveld (L_{pn}) van de ruimte. Deze relatie kan op verschillende manieren gebruikt worden:

- bepaling van het geluidvermogen in de nagalmkamer (uit L_{pn} en A)
- prognose van het geluidniveau in een ruimte (uit L_w en A)
- bepaling van de hoeveelheid geluidabsorptie (uit L_w en L_{pn})

De eerste twee zijn gebruikelijk, de laatste (nog) niet.

(...)

In die gevallen waar de nagalm als criterium niet bruikbaar is, zal de hoeveelheid geluidabsorptie op een andere wijze bepaald moeten worden. En dat is de derde van de eerdergenoemde methoden.

Spreiding in meetresultaten

Eigenlijk delen we alle drie een afkeer van de nagalmtijd voor de normstelling van sportzalen; er zijn zalen die niet de vereiste nagalmtijd halen en toch wel degelijk “goed” kunnen worden genoemd. Omgekeerd pleit voor de na-

galmtijd dat alle zalen die wel aan de nagalmtijd voldoen ook goed kunnen worden genoemd; slechte zalen met een korte nagalmtijd bestaan volgens mij niet. Het gaat in een sportzaal naar ons aller mening veel meer om het geluidniveau en/of de spraakverstaanbaarheid. Echter, we verschillen van mening over de mogelijkheid om een alternatief voor de nagalmtijd te vinden: ik ben veel pessimistischer. De Ruiter en Noordermeer noemen als alternatief het gebruik van het geluidniveau en ik ben het roerend met ze eens dat dat meer informatie geeft, maar wat moeten we toch doen met de geweldige spreiding in de meetresultaten zoals ik die in het artikel heb laten zien en die hier herhaald wordt in figuur 1?

Aan het eind van de vorige eeuw heeft de akoestische groep van het Laboratorium voor Akoestische en Seismische Technieken (AST) van de TU Delft een railsysteem ontwikkeld waarover een microfoon eventueel per millimeter kan worden verplaatst. Eén van onze Bouwkundeafstudeerders heeft het systeem een paar maal gebruikt voor metingen in instellingen en het viel op dat allerlei grootheden flink variëren als functie van de plaats. We hebben over de consequenties voor ons eigen onderzoek gepubliceerd op het International Congress on Acoustics [4], maar in meer algemene zin was en is het binnen de groep AST steeds subject van onderzoek (voor een vroege en een meer recente publicatie zie [5] en [6]).

De waarde van G in figuur 1 is, afgezien van een constante, precies hetzelfde als het geluidniveau bedoeld door De Ruiter en Noordermeer. De spreiding in G blijkt echter enorm, want de punten 2 tot en met 6 zouden in het ideale geval over elkaar moeten vallen. Dat klemt temeer als we uit het geluidniveau de absorptie proberen terug te rekenen. Die varieert namelijk tussen 0,27 en 0,47. In de desbetreffende sporthal is dat een verschil van 872 m² absorptie en dat is minimaal 1000 m² aan absorptiemateriaal. De spreiding in de nagalmtijd RT blijkt aanzienlijk kleiner, van 0,21 tot 0,22. En dat geldt niet alleen hier; in zeer veel metingen keert dit beeld terug. Ik vermoed zelfs dat dat verklaart waarom de nagalmtijd zo

Om de discussie niet te veel te laten uitdijen, hebben Evert de Ruiter en ik om de tafel gezeten om een concept van dit verhaal door te nemen. Dat zorgde wederzijds voor extra inzicht; sommige stellingen werden ondermijnd. Helaas werd de onzekerheid over het stellen van normen in sportzalen daar alleen nog maar groter van. Anderzijds zijn de ideeën over de speech transmission index de vrucht van het gesprek. Uiteraard blijft de onderstaande reactie geheel voor mijn rekening.

Lau Njs

populair is om te meten; men heeft graag een maat die weinig spreiding vertoont, zelfs als die maat niet het gehele verhaal vertelt.

Als we de waarde van 0,27 voor G aanhouden, kunnen we dit een goede zaal noemen als we geïnteresseerd zijn in het geluidniveau. De kwaliteit van de zaal wordt nog duidelijker indien we ook de spraakverstaanbaarheid tonen uitgedrukt in de grootheid STI , de speech transmission index. Dat wordt gedaan in figuur 2.

De spraakverstaanbaarheid is veel beter dan mag worden verwacht op grond van de theorie, want de punten liggen flink rechts van de theoretische zwarte lijn. Uiteraard is de waarde op 1 m (punt 1) “uitstekend”, maar de punten 2 tot en met 6 doen het nog heel aardig ondanks een afstand van 12,5 m tot de bron.

De spreiding in G en STI is geheel in overeenstemming met de resultaten van velerlei andere metingen. Waarschijnlijk is de spreiding veroorzaakt door staande golven. Dat betekent ook dat stralenmodellen, die staande golven niet kunnen voorspellen, veel minder spreiding vertonen tussen de meetpunten. Ik heb het voor dit geval nog eens nagerekend in Catt Acoustic en inderdaad lukt het me niet om een soortgelijke spreiding te vinden. Dat heeft ook als nare consequentie dat we geen nauwkeurig rekenmodel hebben voor het geluidniveau in een sporthal die zich nog op de tekentafel bevindt.

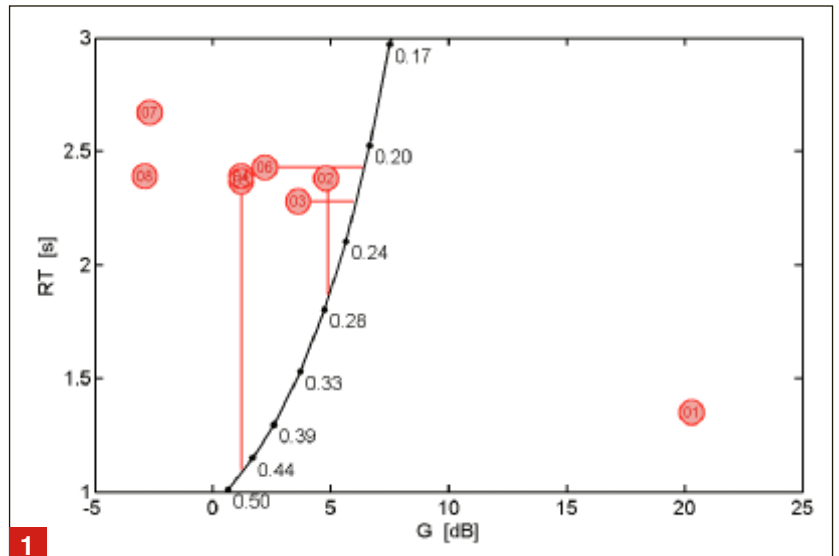
Is dat nu lastig? Iedere akoesticus met enige training ziet in één oogopslag dat de sporthal uit de figuren 1 en 2 een stuk beter is dan mag worden verwacht op grond van de nagalmtijd. Maar mijn probleem blijft dat we voor G (het geluidniveau) geen “juridische” maat kunnen vastleggen in een normblad en uiteindelijk is een normstelling altijd bedoeld om conflicten tussen een opdrachtgever enerzijds en architect/adviseur/aannemer anderzijds te beslechten. Dus hoe vertellen we het de rechter dat dit toch een goede zaal is?

Een alternatief?

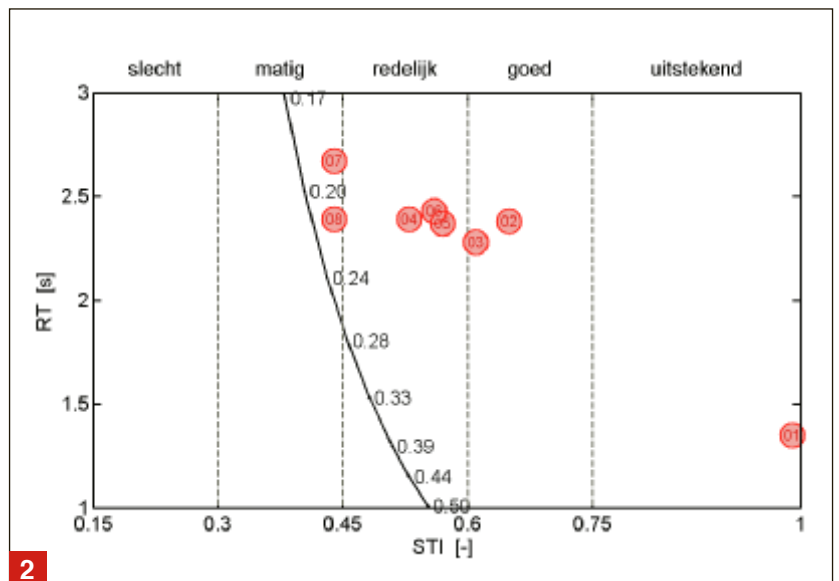
De waarden van STI uit figuur 2 zijn gemeten in een sportzaal waarin achtergrondruis vrijwel ontbrak. STI daalt indien in een zaal ruis, bijvoorbeeld van andere sporters, wordt toegevoegd. Sterker: de maat is daarvoor ontworpen. Het geluidrukniveau van de ruis wordt vastgelegd door G , zodat “ STI -in-ruis” bestaat uit een combinatie van G en STI -zonder-ruis. STI -in-ruis van een bron kan rechtstreeks worden gemeten als een tweede ruisbron wordt toegevoegd. Die ruisbron moet daartoe worden geijkt.

De methode bestaat al en is ook omschreven in normbladen. Maar voordat de methode in sportzalen kan worden gebruikt moet er toch nogal wat gebeuren:

- Hoeveel vermogen moet de bron produceren die de spreker representeert? Als wordt uitgegaan van een spreker met “normale spraak” of “stemverheffing” zijn die niveaus overigens goed bekend.
- Idem voor de ruisbron?
- De ruisbron produceert altijd continue ruis. Lukt het



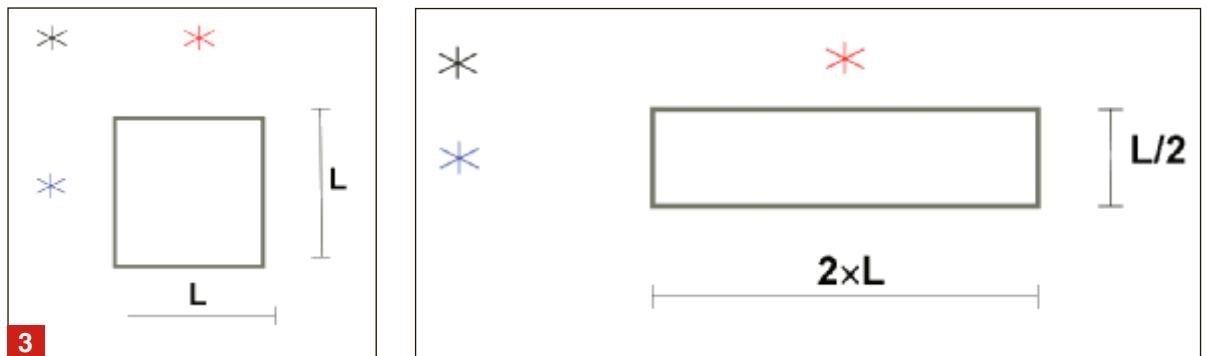
Gemeten geluidniveaus, bij 2000 Hz in een zaal van 48x30x9,5 m³, uitgedrukt in de grootheid G versus de nagalmtijd. Microfoonpunt 1 is gekozen op 1 m van de bron; de punten 2 tot en met 6 liggen alle op 12,5 m in een cirkel rond de bron; microfoonpunten 7 en 8 liggen achter in de zaal. De getrokken lijn geeft de theorie volgens Sabine, Franklin en Jaeger. Zie [3] voor meer informatie



Gemeten spraakverstaanbaarheid uitgedrukt in de grootheid STI , voor de zaal uit figuur 1. De aanduidingen boven de zaal zijn algemeen aanvaard als kwaliteitsaanduidingen voor de spraakverstaanbaarheid. De getrokken lijn geeft de lijn die mag worden verwacht in een diffuus veld dat voldoet aan de theorie (een nadere toelichting op de curve wordt in dit artikel niet behandeld)

om een niveau te kiezen dat een bonkende basketbal representeert?

- Is het mogelijk om simpelweg een gemiddelde te bepalen over alle meetpunten? Ook in meetmethoden voor andere akoestische metingen wordt gemiddeld; draaiende microfoonhengels behoren tot de standaarduitrusting bij metingen van geluidisolaties.
- Hoeveel meetpunten zijn er nodig?
- Welk getal moet als streefwaarde worden gehanteerd?
- Wat kost zo'n meetmethode? De nagalmtijd kan met een geavanceerde meter en een alarmpistool of een doorgeprikte ballon worden gemeten; voor een STI -in-ruis-meting is meer vereist.



Een kubusvormige ruimte (links) en een ruimte waarvan de lengte twee maal zo groot wordt en de hoogte wordt gehalveerd. De breedte (niet getekend) blijft gelijk. De microfoon is in het centrum gedacht

Er is dus nogal wat te onderzoeken. Anderzijds moet ook in de huidige methode de nagalmtijd op zeer veel punten in een sportzaal worden bepaald. Het zou interessant zijn om op die punten ook G en STI te bepalen.

HOORBARE EN HINDERLIJKE FLUTTERS

De Ruiter en Noordermeer:

We zijn het met Nijss eens dat nader onderzoek naar de hinderlijkheid van flutterecho's in sportzalen nodig is. Overigens is onze ervaring dat ze niet alleen bij 1 en 2 kHz voorkomen, maar ook in de 500 en zelfs de 250 Hz band.

Ik had de hypothese gesteld dat hoge frequenties gevoeliger zijn voor flutters dan lagere frequenties. Dat was gebaseerd op het idee dat in de lage frequenties buiging een grotere rol speelt. Behalve De Ruiter en Noordermeer had ook Jitse Pijlman van Adviesburo Nieman mijn hypothese al ontkracht, door metingen te tonen van een sportzaal in Nieuw Vennep. Hierbij wil ik daarom mijn hypothese officieel gefalsifieerd verklaren.

De hal uit de figuren 1 en 2 lijdt aan flutters. Indien die worden vermeden zal RT dalen en vinden we een (smallere?) puntenwolk rond de zwarte curve. Nu zijn hoorbare flutters nog geen hinderlijke flutters. Sterker nog: hoorbare echo's zijn in een sportzaal nauwelijks te vermijden. Maar soms wordt wel degelijk in het bestek vastgelegd dat er geen hoorbare echo's mogen optreden. Dat kan tot rare toestanden leiden: de opdrachtgever stapt de opgeleverde zaal binnen, klapt in de handen en zegt: "Ja hoor, ik hoor nog flutters". De architect, adviseur en aannemer staan ernaast en menen "niets te horen". Ook in dit geval is een soort meetmethode nodig waarmee men naar de rechter kan stappen.

DE VERDELING VAN ABSORPTIEMATERIALEN

De Ruiter en Noordermeer:

Tenslotte een kanttekening bij de stelling dat de sterkte G nauwelijks afhankelijk is van de verdeling van de geluidabsorptie van de ruimte.

(...)

G is hoe dan ook wel degelijk afhankelijk van de verdeling van de geluidabsorptie.

De grenzen van mijn bewering

Ik beweerde in het oorspronkelijke artikel dat de verdeling van absorptiematerialen niet belangrijk is voor het geluidniveau in een sportzaal; De Ruiter en Noordermeer

beweren van wel. Allereerst heb ik een misverstand veroorzaakt. Ik had het expliciet over sportzalen. Dat is ook vermeld, maar ik had er ten onrechte niet duidelijk bijgezet dat het om "volvlakse" modellen gaat. Het ging bij mij steeds om de zes vlakken van een rechthoekige ruimte en ieder vlak heeft maar één absorptiecoëfficiënt. Die zes absorptiecoëfficiënten zijn eventueel wel verschillend. Voor andere ruimten met een wat ingewikkelder plattegrond en/of inhomogene verdeling van absorptie per vlak geldt mijn bewering uiteraard niet. We hebben daar zelf al jaren geleden over gepubliceerd.

Voor de ruimten die wel binnen mijn restricties vallen blijf ik overigens bij mijn bewering. Als je op de tiende dB nauwkeurig kijkt hebben De Ruiter en Noordermeer gelijk, maar voor de dagelijkse sportzalenpraktijk kijken we niet naar dergelijke verschillen. Voor het bewijs bevatte mijn artikel een verwijzing naar onze website [3], maar hier zal ik het nog eens uiteen zetten door een deel van de site te citeren.

De theorie zoals ontwikkeld door Sabine, Franklin en Jaeger is het best toepasbaar in een *kubus* met *homogene verdeling* van de absorptie. Dat zijn dus twee voorwaarden die moeten worden onderscheiden. We zullen dat in drie stappen doen:

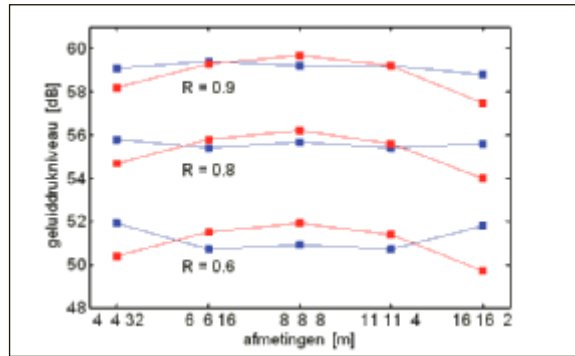
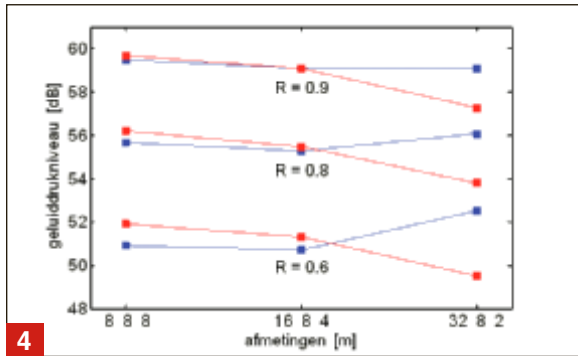
- De vorm van de ruimte speelt een rol, zelfs als alle absorptie homogeen verdeeld is.
- Daarna zullen we de absorptie *per vlak* verschillend toewijzen.
- Voor ieder vlak kan de absorptie in delen worden opgeknipt.

Deze aspecten komen aan de orde in de volgende paragrafen.

Een niet-kubische ruimte met homogene absorptie

Met een simpel spiegelbronnenmodel kan worden aangetoond dat het geluidniveau oploopt indien een kubus wordt uitgerekt tot de verhoudingen van een sporthal¹. In figuur 3 is links een kubusvormige ruimte getekend waarvan de ribben gelijk zijn aan L . Het aantal spiegelbronnen is oneindig groot; er zijn er drie getekend. Zowel de rode als de blauwe

¹ Ook ray-tracing modellen komen tot dezelfde conclusie om de eenvoudige reden dat dat ook maar veredelde spiegelbronnenmodellen zijn. In schaalmodellen heb ik dezelfde effecten gemeten, maar die metingen zijn niet systematisch genoeg uitgevoerd om er een bewijs aan te ontleen dat de rekenmodellen nauwkeurige voorspellingen opleveren.



Het geluiddrukkniveau als functie van de vorm van een rechthoekige ruimte. De rode lijnen geven de klassieke SFJ-theorie, de blauwe lijnen geven de resultaten van een spiegelbronnenmodel. Alle berekeningen zijn uitgevoerd met $L_w = 70$; dat is ongeveer de sterkte van normale spraak. De afstand tussen bron en ontvanger is gelijk gekozen aan vrije weglengte (mfp), die met de vorm verandert

komen na één reflectie tot stand, de zwarte geldt bij twee reflecties.

De bijdrage aan het kwadraat van de geluiddruk p [Pa] kan in de linker figuur, voor zowel de blauwe als de rode bron, worden geschreven als:

$$p^2 = \frac{\rho c W_0 R}{4\pi L^2} \quad (1)$$

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W_0}{W_{ref}} \right) \quad (2)$$

Voor de gebruikte symbolen zie het kader aan het eind van het artikel. Het totale geluiddrukkniveau L_p [Pa] kan worden afgeleid door alle mogelijk bronnen te sommeren. De reeks is convergent en volgens de SFJ-theorie gelijk aan:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{4(1-\alpha)}{\alpha S} \right) \quad (3)$$

met $\alpha = 1 - R$.

S is het totale oppervlak van de wanden in m^2 .

De SFJ-theorie heeft echter een paar kunstgrepen nodig om tot dat resultaat te komen dat in de volgende paragraaf wordt vermeld.

In het rechterdeel van figuur 3 wordt de kubus vervormd tot een rechthoekige ruimte. De lengte wordt tweemaal zo groot, de breedte (niet getekend) blijft gelijk en de hoogte wordt gehalveerd. We houden de reflectiecoëfficiënt R gelijk voor alle wanden.

In de SFJ-theorie volgens formule (3) gebeurt maar één ding: het totale oppervlak wordt groter. Voor de kubus in de linker figuur geldt:

$$S = 6 \times L^2 \quad (4a)$$

Terwijl voor de rechter ruimte geldt:

$$S = 2 \times (2 \times L^2 + L^2 + 0.5 \times L^2) = 7 \times L^2 \quad (4b)$$

Dat betekent dat, ten opzichte van de kubus, de grootte van het geometrisch oppervlak stijgt en daardoor het geluiddrukkniveau volgens formule (3) *daalt*. Echter, volgens het spiegelbronnenmodel gebeuren er andere dingen. De

afstand tot de rode bron wordt gehalveerd, waardoor het vermogen volgens formule (1) wordt verviervoudigd. De bijdrage aan het vermogen door de blauwe bron wordt daarentegen vier maal zo klein. In totaal vinden we bij vergelijking tussen links en rechts dat het vermogen in het rechter geval groter is omdat:

$$4 + 1 + 0.25 > 1 + 1 + 1 \quad (5)$$

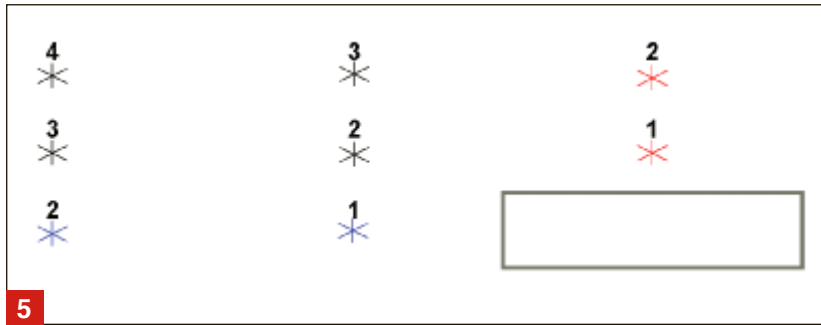
zodat het geluiddrukkniveau dus *stijgt*. Uiteraard passen we het model nu alleen toe op bronnen die slechts eenmaal hebben gereflecteerd, maar voor een bolschil op grote afstand van de bron kan een soortgelijke redenering worden gehouden.

Voor zover valt na te gaan is er in de literatuur nog nooit een gesloten oplossing gevonden voor een berekening over *alle* spiegelbronnen, noch als som, noch als integraaloplossing en ook ons is het niet gelukt. (Het aantal spiegelbronnen is uiteraard oneindig, maar de som is wel degelijk eindig, hier wordt niet nader op in gegaan.) Sommige integralen zijn nu eenmaal onoplosbaar en we moeten vrezen dat dit probleem daar bij hoort. Anderzijds is een numerieke berekening een peulenschil. Het resultaat staat in figuur 4.

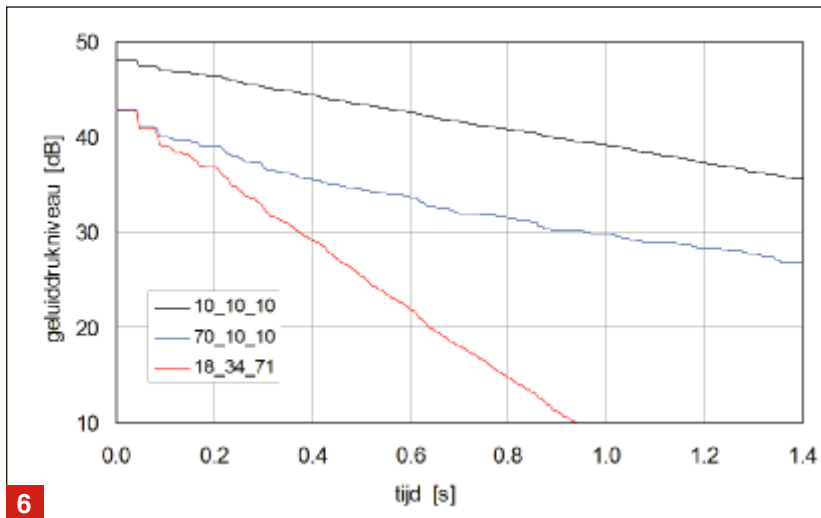
In de linker figuur zijn een paar numerieke exercities gepleegd aan de vorm van de ruimte die langs de horizontale as is uitgezet. Links wordt gestart met een kubus van $8 \times 8 \times 8 \text{ m}^3$. Dan wordt de lengte tweemaal zo groot en de hoogte tweemaal zo klein, waardoor een ruimte van $(16 \times 8 \times 4) \text{ m}^3$ ontstaat. Die verdubbeling wordt nog eens tweemaal herhaald. In de rechter figuur wordt weer het volume constant gehouden, maar nu zijn er telkens twee dimensies gelijk gehouden. We zien daardoor links corridor-achtige ruimten en rechts vierkante zalen met een laag plafond.

Op het eerste gezicht zal een ruimte van $32 \times 8 \times 2 \text{ m}^3$ niet vaak voorkomen. Maar het gaat in alle modellen om de *verhouding* tussen de afmetingen. Alle formules, zowel voor Sabine als voor het spiegelbronnenmodel mogen namelijk worden geschaald. Bij een verdubbeling van de ruimte met een factor 2 moet er 6,0 dB van het geluiddrukkniveau worden afgetrokken; bijvoorbeeld:

$$L_p(64 \times 16 \times 4) = L_p(32 \times 8 \times 2) - 6.02 \quad (6)$$



5 Een rechthoekige ruimte waaromheen een paar spiegelbronnen zijn getekend. Het getal bij een spiegelbron geeft het aantal reflecties



6 Drie nagalmcurven (schroedercurven) in een sporthal van 70×25×12 m³. In de bovenste curve hebben alle oppervlakken R=0,9, dus 10% absorptie; het totaal absorberend oppervlak is dan 578 m². In de middelste curve heeft het plafond 70% absorptie, terwijl de wanden en de vloer gelijk blijven aan 10%. Het totaal absorberend oppervlak stijgt naar 1628 m². In de onderste curve is dit absorberend oppervlak gelijk, maar de verdeling is gebaseerd op het minimaliseren van de nagalmtijd. Plafond en vloer hebben een absorptiecoëfficiënt van 18%, de lange wanden hebben 34% en beide kopse wanden 71% [7]. De berekening is uitgevoerd in Catt Acoustic waarbij alle wanden een diffusiecoëfficiënt hebben van 10%

De rode punten in figuur 4 geven de uitkomsten van de SFJ-theorie, de blauwe komen uit het spiegelbronnenmodel. De conclusie uit figuur 4 is dat de SFJ-theorie een dalende tendens voorspelt bij afwijkingen van een kubus. Het spiegelbronnenmodel toont daarentegen juist een stijgende tendens.

Waarom de SFJtheorie slechts een benadering geeft

Het is interessant om formule (3), de vrucht van de Sabine-Franklin-Jaeger-theorie, eens te ontrafelen. Er staat:

$$L_p = L_w + 10\log\left(\frac{4(1-\alpha)}{\alpha S}\right) \quad (3, \text{herhaling})$$

Als we de absorptiecoëfficiënt α vervangen door de reflectiecoëfficiënt R staat er:

$$L_p = L_w + 10\log\left(\frac{4R}{(1-R)S}\right) \quad (7a)$$

$$= L_w + 10\log\left(\frac{4}{S}\right) + 10\log\left(\frac{R}{1-R}\right) \quad (7b)$$

De laatste term binnen de haakjes kan worden geschreven als het resultaat van een reeksontwikkeling. Immers:

$$R + R^2 + R^3 + R^4 + \dots + R^n + \dots = \frac{R}{1-R} \quad (8)$$

De voorwaarde voor convergentie is dat $R < 1$. Aan die voorwaarde is hier uiteraard voldaan.

De SFJ-theorie stoelt eigenlijk op een paar veronderstellingen²:

- Alle spiegelbronnen op dezelfde afstand hebben een gelijk aantal reflecties.
- Alle bronnen op gelijke afstand vertegenwoordigen daardoor dezelfde energie.

Als we het spiegelbronnenmodel bekijken zien we dat beide beweringen op losse schroeven staan; zie daartoe figuur 5.

De figuur geeft de ruimte van figuur 3, rechts. Er zijn slechts een paar spiegelbronnen getekend; in de figuur staat bij iedere spiegelbron ook het aantal reflecties aangegeven. Volgens de SFJ-theorie moet men nu alle bronnen samenvoegen die één, twee, drie, ... maal hebben gereflecteerd. Maar we zien dat het geluid van de bovenste rode bron met twee reflecties gelijktijdig binnenkomt met dat van de blauwe bron dat eenmaal heeft gereflecteerd. Eén van de zwarte bronnen heeft driemaal gereflecteerd en komt zelfs eerder binnen dan de blauwe met twee reflecties. De tijdsaanduiding op grond van het aantal reflecties is dus niet correct. Daarmee is tevens de sterkte van de bronnen niet correct die immers (volgens formule 1) op de afstand is gebaseerd en daarmee rechtstreeks is gelinkt aan de tijd. Indien in figuur 5 een langwerpige ruimte wordt vervangen door een kubus, zijn de afwijkingen veel kleiner. Ze verdwijnen echter nooit helemaal en zelfs voor een kubus is de SFJ-theorie slechts een benadering.

Een ruimte met verschillende absorberende vlakken

De vorm van de sporthal (lengte, breedte, hoogte) is van belang; het kan in een sportzaal globaal 1 tot 3 dB schelen ten opzichte van een berekening met de SFJ-theorie. Maar de vorm van de sportzaal ligt bij het ontwerp meestal al vast. De volgende fase is dan om de absorberende materialen over de ruimte te verdelen en mijn bewering was dat die verdeling er nauwelijks toe doet. We gaan er hier wat dieper op in. Opnieuw is een groot deel van de tekst ontleend aan de eerdergenoemde website [3].

Gestart wordt met een voorbeeld van een sportzaal. Het voorbeeld betreft een grote sportzaal van 70×25×12 m³, zodat de lengte ongeveer zes maal de hoogte is. De gemiddelde vrije weglengte mfp is gelijk aan 14,5 m.

In tabel 1 en figuur 6 staan drie nagalmcurven. De bovenste (zwarte) curve wordt berekend in een ruimte waarvan alle oppervlakken 10% absorberen. Dan wordt

² De formule is gegeven voor een continue bron. Bij een puls uit een luidspreker of een bron die wordt uitgeschakeld, verschijnen ook tijdafhankelijke functies waaruit de nagalmtijd kan worden afgeleid.

Tabel 1: Enkele grootheden berekend met drie verschillende absorptieverdelingen. Zie daartoe ook het onderschrift van figuur 6. Waarden onder voor $STI > 0,30$ worden als "slecht" beoordeeld. Uitstekende spraakverstaanbaarheid treedt op bij $STI > 0,75$. Dat zijn waarden die in een klaslokaal gewenst zijn, maar voor een sportzaal op 14 m kan met een lagere waarde genoeg worden genomen. De waarde van L_w is weer gelijk aan 70 dB

Absorptieverdeling	Vol	S	α	A	RT _{sab}	EDT	RT _{5_35}	SPL	STI
Alles 10%	21000	5780	0,10	578	5,9	6,7	6,5	48,0	0,26
70% op plafond	21000	5780	0,28	1628	2,1	4,3	6,1	42,9	0,45
18 34 71	21000	5780	0,28	1628	2,1	1,8	1,7	42,8	0,51

aangenomen dat die vlakken een klein beetje absorberen (10%), want glas en beton halen nog lagere absorptiewaarden. Zoals te verwachten, wordt een nagalmtijd gehaald van ruim 6 s, terwijl de sterkte van het galmveld van één spreker 48 dB bedraagt op een afstand van 14,5 m van de bron. Die afstand is bewust gelijk gekozen aan de gemiddelde vrije weglengte *mfp*.

De middelste (blauwe) lijn geeft dezelfde hal, maar nu is een absorberend plafond aangebracht met een absorptiecoëfficiënt van 70%. We zien een verlaging van het galmniveau met ruim 5 dB. Echter, het model voorspelt dat de nagalmtijd vrijwel niet afneemt. Dat is te zien aan de blauwe curve. Tussen $t = 0$ en $t = 0,2$ s is de helling van de blauwe curve steiler dan van de bovenste curve, maar boven $t = 0,2$ zijn de hellingen gelijk. Dat komt doordat de reflecties tussen de verticale wanden blijven doorklinken, al of niet hoorbaar als een flutter-echo. Als de nagalmtijd moet worden verlaagd kan de absorptie beter op de kopse wanden worden aangebracht. Dat toont de onderste (rode) curve. Deze hal heeft bij elkaar precies evenveel vierkante meters absorptiemateriaal als de voorgaande waar alles aan het plafond zat, maar de reflecties tegen de kopse wanden worden afdoende bestreden. De nagalmtijd is, volgens het spiegelbronnenmodel, slechts 1,7 s, hetgeen zelfs nog iets onder de Sabinewaarde ligt³. Echter, de sterkte van het geluid (de waarde van de curven op $t = 0$) daalt slechts een paar tienden van een dB. Deze ingreep heeft vrijwel geen invloed op het geluiddrukkniveau en bijvoorbeeld de spraakverstaanbaarheid.

Uit dit voorbeeld wordt de stelling afgeleid dat de vorm van de ruimte is gekoppeld aan het geluidniveau en de verdeling van de absorptiematerialen aan de nagalmtijd. Het voorbeeld kan worden aangevuld met meer numerieke berekeningen, maar uiteraard is dat nog geen bewijs. Sterker nog: het bewijs is er ook helemaal niet en op de tiende dB hebben De Ruiter en Noordermeer ook gelijk. Interessant is trouwens dat we een hoger geluidniveau voorspellen én een langere nagalmtijd. Er wordt eigenlijk een minder effectieve absorptie gevonden dan kan worden afgeleid uit de gegevens zoals die meestal in het allereerste ontwerpstadium worden ingevoerd.

Nogmaals STI als criterium

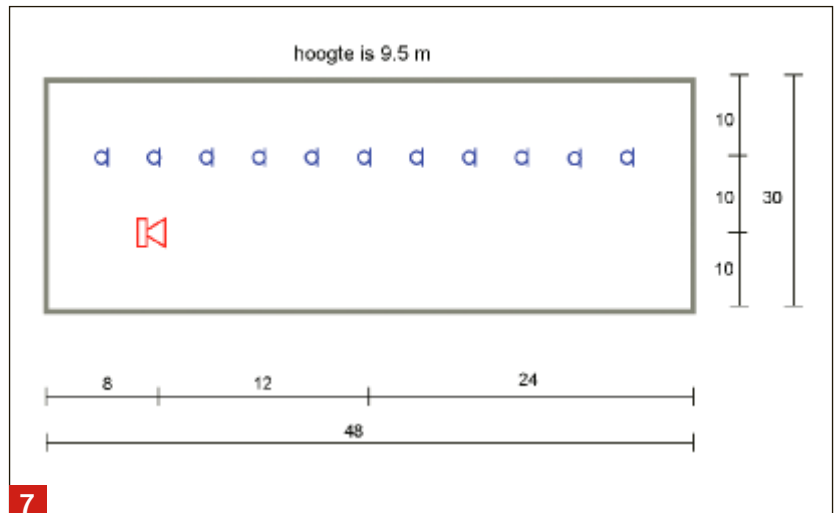
De rechter twee kolommen van tabel 1 geven het geluiddrukkniveau *SPL* en de speech transmission index *STI* zonder-ruis. In het begin van dit artikel is er al op gespeeld om die twee grootheden te combineren tot *STI-in-ruis*. Volgens *SPL* zijn de tweede en derde zaal ongeveer even goed; volgens *RT* (de twee-na-laatste kolom) is de derde zaal veruit superieur aan de tweede. Volgens *STI* is de derde zaal inderdaad beter dan de tweede, maar de verschillen zijn vrij klein. Mijn hypothese is dat de rangordering volgens *STI-in-ruis* de hoorbare verschillen veel beter representeert.

De invloed van lokale absorptie

Thans wordt een voorbeeld gegeven waarbij de absorptie op één vlak in stukken is opgedeeld. De berekening is gemaakt in Catt Acoustic.

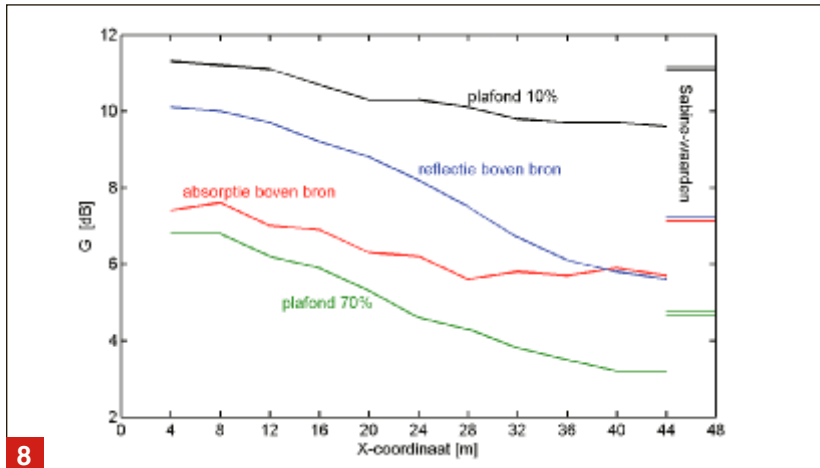
Figuur 7 geeft een plattegrond van de sportzaal. Er zijn vier gevallen van absorptieverdeling:

- Het gehele plafond absorbeert 10% (zwart in onderstaande figuren).
- De linkerhelft van het plafond absorbeert 70%, de rechterhelft absorbeert 10% (rood).
- Nu absorbeert het linker deel juist 10% en het rechter 70% (blauw).
- Het gehele plafond absorbeert 70% (groen).



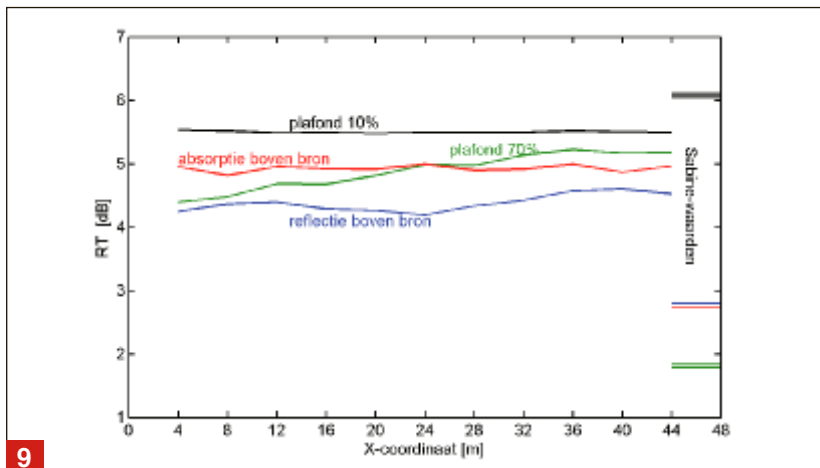
7 Plattegrond van een sportzaal van 48x30x9,5 m³. De microfoons zijn gerangschikt in een rij met een spatiering van 4 m. De vloer heeft 5% absorptie, de vier wanden ieder 10%. Er zijn vier verschillende verdelingen van de absorptie over het plafond; zie daartoe de tekst. Bronhoogte is 1,5 m; de microfoons staan alle op 1,2 m

³ Dat komt ook omdat eigenlijk de nagalmtijd volgens Eyring moet worden gebruikt, die altijd nog wat lager is dan die van Sabine.



8

De sterkte van het geluid, gegeven in Gals functie van de X-coördinaat van de microfoons



9

De nagalmtijd RT als functie van de X-coördinaat van de microfoons

In alle vier de curven daalt het geluidsniveau met afnemende afstand. Bij de zwarte en de rode curve kunnen we die daling terugvoeren op “Barrons effect” zoals dat in het voorgaande verhaal was beschreven. Bij de half-absorberende plafonds zien we dat het inderdaad van belang is *waar* de absorptie is aangebracht; het helpt om de absorptie rondom de bron aan te brengen. Bij het ontwerpen van een sportzaal zal niet snel naar dit wapen worden gegrepen, maar het heeft bijvoorbeeld in een kantine wel degelijk zin om vooral het keukengedeelte aan te pakken. Aan de rechterzijde van figuur 8 zijn de waarden gegeven die uit de SFJ-theorie volgen. Uiteraard zijn dan de rode en de blauwe waarde gelijk omdat ze precies evenveel absorberend oppervlak hebben. De waarden geven een zeer redelijke schatting van het gemiddelde geluidsniveau in de ruimte. Als we de nagalmtijd uitzetten, zoals gedaan in figuur 9, is het verband tussen de numerieke uitkomsten en de SFJ-waarden (rechts in de figuur) helemaal zoek. Daar is de hele discussie over sportzalen tenslotte om begonnen. Maar fascinerend is wel dat de numerieke waarden nauwelijks afhangen van de microfoonpositie. Dat verklaart mijns inziens nogmaals het succes van RT als (onterechte?) maat voor metingen. Aardig is ook dat de rode lijn boven de blauwe ligt. De nagalmtijden (hier niet getoond) zakken ook wel heel erg door, waardoor de vraag rijst of curvefitting voor de bepaling van de nagalmtijd wel doenlijk is.

Modellen met zichthoeken?

De Ruiter en Noordermeer:

Met de term $(1-\alpha)$ - die ook in andere formules voorkomt - wordt beoogd alleen het nagalmveld te beschouwen: de geluidenergie die na de eerste reflectie over is.

(...)

Een geluidabsorberend vlak dicht bij de bron heeft meer invloed dan een verder weg gelegen vlak. Dat zou verdisconteerd kunnen worden door de ruimtewoek gezien vanuit de bron als weegfactor te gebruiken.

De term $(1-\alpha)$ rolt rechtstreeks uit de integraal waarmee de totale energie wordt berekend in de SFJ-theorie [8]. Inderdaad zorgt die term ervoor dat alleen het nagalmveld wordt beschouwd, maar in Barrons formule is de term verdwenen en vervangen door een afstandsterm [9].

Wat het tweede deel van de bewering betreft, ken ik aardig wat modellen voor de berekening van de nagalmtijd, maar ik ben toch eigenlijk nog nooit een bruikbaar model tegengekomen. Het aantal modellen dat een herberekening geeft van het geluidsniveau is verbluffend klein. Kuttruff [10] heeft een model ontwikkeld dat de stevigste wiskundige basis heeft. Het is gebaseerd op diffuse warmtestraling tussen vlakken, maar het hele verhaal bij een sportzaal draait nu juist om het niet-diffuse karakter. Andere modellen met “zichthoeken” werken soms aardig, soms niet. Deze modellen halen mijns inziens te weinig de vorm van de ruimte (zie paragraaf ‘Een niet-kubische ruimte met homogene absorptie’) en de absorptie uit elkaar (zie paragraaf ‘Een ruimte met verschillende absorberende vlakken’). Als men bijvoorbeeld een redelijk absorberend vlak nadert, neemt de hoek waaronder de absorptie wordt gezien toe. Het lijkt daardoor dat het geluidsniveau daalt, maar in numerieke modellen zijn de niveaus vaak constant en soms kunnen ze zelfs wat stijgen.

Het is zonder numerieke modellen buitengewoon lastig om aan te voelen of te voorspellen wat er met de sommering gebeurt over de spiegelbronnen in figuur 3 indien de microfoon uit het centrum wordt gehaald. En is het zicht vanuit de bron per definitie belangrijker dan vanuit de waarnemer? Dat klopt voor G in figuur 8 maar *niet* voor RT in figuur 9.

De modellen die ik ken leveren trends die in een aantal gevallen juist zijn, maar het is me bij alle modellen gelukt om tegenvoorbeelden te verzinnen. Het meest beruchte model is dat van Fitzroy dat wel de trends in absorptieverdeling juist voorspelt, maar van de vorm een potje maakt. Helaas is ook de officiële norm NEN 12354-6 niet vrij van feilen [11].

Uiteindelijk gaat het om de vraag of een ontwerper een ontwerpmodel kan en wil “vertrouwen”. Persoonlijk vertrouw ik het meest op numerieke stralenmodellen. Schaalmodellen zijn nog nuttiger, maar die zijn voor het ontwerp van een sportzaal buiten de orde. Voor de voorspelling van *trends* (als functie van de vorm, of bij verschillende absorptieverdelingen) heb ik ze nog niet op een fout kunnen betrappen. Dat wil nog niet zeggen dat ze ook op de dB of tiende seconde betrouwbaar zijn. Met name door de keuze van diffusiecoëfficiënten van de vlakken zijn de uitkomsten behoorlijk te beïnvloeden.

HET HISTOGRAM

De Ruiter en Noordermeer:

Tussen haakjes: de term histogram is een begrip uit de statistiek met een geheel andere betekenis en kan niet gebruikt worden voor de uitklinkcurve. Wellicht ligt de term “time history” ten grondslag aan deze misgreep.

Of het een “misgreep” is, blijft te bezien, maar de term histogram is door mij zeer bewust gebruikt. Het gaat namelijk precies over het desbetreffende begrip uit de statistiek. In een stralenprogramma wordt een straal gevolgd op zijn/haar weg door de ruimte en iedere keer dat de straal de microfoon passeert, wordt van de straal de loopweg vastgelegd plus de energie die afhangt van de loopweg en het energieverlies bij iedere reflectie. Om iets zinnigs te kunnen zeggen over de energie van alle stralen in de ruimte moet alle energie die arriveert tussen t en $t + \Delta t$ worden gesommeerd [12]. Van tevoren wordt er een array aangemaakt met tijdklassen en na iedere passage van de microfoon wordt in één klasse de energie opgehoogd. Dat is nu typisch wat statistici een histogram noemen en daarom wordt het sinds jaar en dag ook histogram genoemd in sommige rekenprogramma’s. De term is niet door mij verzonnen, maar hij is volgens mij wel juist. Anderzijds zijn er Engelstalige programma’s die deze curve “echogram” noemen. De grootte van Δt wordt meestal in de orde van 1 ms gekozen, maar eigenlijk is hier sprake van een filtering met een rechthoekig venster. Dat mag natuurlijk worden vervangen door een ander type filtering waarbij een simpel RC-filter het meest wordt gebruikt. Ook dan zien we vaak een ordegrootte van 1 tot 4 ms.

Bij metingen ligt het verhaal wat anders. Daar wordt heden ten dage eerst de pulsresponsie gemeten van de geluiddruk. Door de gekozen methode gaat dat automatisch in gelijke tijdstappen, die dan in de orde zijn van (bijvoorbeeld) 20 μs . Vervolgens wordt een verdeling

berekend van de energie als functie van de tijd. De tijdstap wordt dan meestal opgehoogd, bijvoorbeeld tot 1 ms. Hierbij wordt weer gefilterd in rechthoekige klassen of met een RC-filter. De term histogram is nu niet gebruikelijk, maar noemen we dit nu het “echogram”? Of worden echo’s beter zichtbaar gemaakt met de pulsresponsie? Mijn probleem is dat het woord “echogram” op meerdere manieren wordt gebruikt en verwarring ligt dus op de loer. Ik heb geprobeerd die verwarring te voorkomen door netjes te definiëren, maar dat is kennelijk niet gelukt. Misschien iets voor een normcommissie? ■

BRONNEN

- ▶ [1] Ruiter, Evert de, Marc Noordermeer; Geluid-beheersing in sportzalen, Bouwfysica 1-2010, p. 31
- ▶ [2] Nijs, L.; Akoestiek in sportzalen, Bouwfysica 3-2009, pp. 2-11
- ▶ [3] URL: www.nijsnet.com/bk, pagina B.3.4
- ▶ [4] Nijs, L, D. van Berlo, D. de Vries; The development of architectural guidelines for the acoustical quality in rooms for mentally challenged people, 17th International Congress on Acoustics, Rome, 2001
- ▶ [5] D. de Vries, J. Baan; Fluctuation of room acoustical parameters at small spatial intervals, Forum Acusticum, Berlin, 1999
- ▶ [6] Dorp Schuitman, Jasper van, Diemer de Vries; Applying cochlear modeling and psychoacoustics in room acoustics, 124th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, 2008
- ▶ [7] URL: www.nijsnet.com/bk, pagina B.6.3
- ▶ [8] URL: www.nijsnet.com/bk, pagina B.3.2
- ▶ [9] URL: www.nijsnet.com/bk, pagina B.6.1
- ▶ [10] Kuttruff, H.; Room acoustics, Taylor and Francis, 2009
- ▶ [11] URL: www.nijsnet.com/bk, pagina B.6.4, tabel 1
- ▶ [12] URL: www.nijsnet.com/bk, pagina B.1.3, de guren 2 en 3

Terugblik op de discussie

Het is in ieder geval duidelijk geworden dat sportzalen (veel) geluidabsorptie nodig hebben. Te weinig geluidabsorberend oppervlak maakt de zaal rumoerig. Het lawaai van de sporters en supporters kan oerverdovend worden; docenten en coaches kunnen zich nauwelijks verstaanbaar maken.

Op de vraag uit de voorgaande gedachtewisseling hoeveel geluidabsorptie moet worden aangebracht en hoe dat over wanden en plafond moet worden verdeeld is het antwoord nog niet zo duidelijk. Wel is duidelijk, dat het niet om de nagalmtijd als enige criterium gaat. In sportzalen met een “nette” exponentiële uitklinkcurve (rechte lijn in L_p - t -graaf) kan de nagalmtijd gebruikt worden om de totale hoeveelheid geluidabsorptie in de zaal te bepalen, via de formule van Sabine. In veel sportzalen is dit echter niet het geval, bijvoorbeeld als sprake is van uiterecho’s. Er is weinig bekend over de mate waarin uiterecho’s de spraakverstaanbaarheid verminderen en door gebruikers van sportzalen als hinderlijk ervaren worden. Om in deze leemten in kennis te voorzien en effectieve criteria te kunnen ontwikkelen voor het ontwerpen en toetsen van de akoestische kwaliteit van sportzalen, zal vooral nader onderzoek in de praktijk nodig zijn.

Evert de Ruiter

Gebruikte symbolen

- ρ = dichtheid van lucht [kg/ m³]
- c = geluidssnelheid [m/ s]
- W_0 = continu vermogen van de bron [W]
- W_{ref} = referentievermogen, gelijk aan 1 pW[W]
- L_w = akoestisch-vermogeniveau van de bron [dB]
- R = de energie-reflectiecoëfficiënt van alle wanden [-]
- L = de lengte van de ribbe van de kubus [m]
- S = totale geometrische oppervlakte [m²]
- V = volume van de ruimte [m³]
- α = gemiddelde absorptiecoëfficiënt [-]
- mfp = gemiddelde vrije weglengte [m]
- r = afstand tussen bron en ontvanger [m]
- RT = nagalmtijd [s]
- STI = speech transmission index, spraakverstaanbaarheid index [-]
- SPL = geluidsdruk niveau [dB]