

Het gebruik van de nagalmtijd bij de normstelling van sportzalen

**Lau Nijs
Aart Schuur**

**Artikel eerder verschenen in
Bouwfysica, jaargang 15, nr. 1, mei 2004, pp. 11-17**



**Faculteit Bouwkunde
Sector Bouwfysica
Berlageweg 1
2628 CR Delft**

1. Aan- en inleiding

Indien een sporthal wordt gebouwd zal daarbij allereerst worden gedacht aan materialen die weinig geluid absorberen (beton, baksteen, metaal, glas, hout). In dat geval kan de nagalmtijd in de hal waarden van 5 of 10 s bereiken en er zal door gebruikers ongetwijfeld worden geklaagd over de “herrie”. Toevoeging van geluidabsorberend materiaal (uiteraard komt het plafond hiervoor als eerste in aanmerking) verbetert de hal aanzienlijk. Een nieuwe meting zal nagalmtijden in de orde van 1 tot 3 s opleveren en de geluidoverlast vermindert of verdwijnt.

Een kortere nagalmtijd valt dus samen met een beter akoestisch klimaat, maar is (omgekeerd) de nagalmtijd daarmee ook een goede indicator van het akoestisch klimaat? Met behulp van een voorbeeld zullen we vast een indicatie geven van het antwoord op de gestelde vraag.

Stel, we hebben een sporthal van $40 \times 30 \times 8 \text{ m}^3$. De hal is bekleed met absorberend materiaal volgens de regels der akoestische kunst en de nagalmtijd bedraagt 1.8 s. Vervolgens nemen we een fictieve sporthal waarbij alle maten met een factor twee worden vergroot. De hoeveelheid absorberend materiaal op het plafond wordt dus vier maal zo groot in oppervlak en ook de vloer en wanden worden opgeschaald. Een berekening van de nagalmtijd toont nu aan dat de nagalmtijd in de grote hal stijgt naar 3.6 s. Betekent dat nu dat de akoestische kwaliteit van de grote hal veel slechter is dan die van de kleine? Het antwoord is “neen” en we zullen dat in het vervolg van dit verhaal proberen aan te tonen. Het is ook interessant om vanuit de kleine sporthal omlaag te schalen naar steeds kleinere ruimten. Zijn achtereenvolgens een gymzaal, een klaslokaal of een huiskamer met een nagalmtijd van 1.8 s acceptabel? Uiteraard niet; het meerekenen van het volume van de ruimte is strikt noodzakelijk om de akoestische kwaliteit te karakteriseren.

2. De akoestische kwaliteit in meetbare grootheden

2.1 Welke grootheden zijn bepalend in een sporthal?

Sinds Sabine aan het begin van de twintigste eeuw de zaalakoestiek als wetenschap op de kaart zette zijn velerlei maten ontwikkeld om de akoestische kwaliteit van een ruimte te meten of te berekenen. Sabine zelf introduceerde de nagalmtijd als belangrijke parameter en nog steeds wordt de nagalmtijd als allereerste grootheid gebruikt om de kwaliteit van een ruimte voor muziek vast te leggen. Daarbij zijn waarden van 2 sec gebruikelijk voor concertzalen, teruglopend naar 1.4 s voor kleine zalen.

Omdat een sporthal niet is ontworpen voor muziekkuitvoeringen, kan de “akoestische kwaliteit” van een sporthal beter worden vastgelegd via de spraakverstaanbaarheid. Een coach die tijdens een zaalvoetbalwedstrijd zijn spelers probeert te instrueren zal *altijd* moeten schreeuwen (zoals ook op het sportveld), hoe goed de akoestiek van de hal ook is. Daaraan is dus geen criterium te ontnemen. Voor de spraakverstaanbaarheid moet veeleer worden gedacht aan een coach of leerkracht die sporters toespreekt die zich op een afstand van 0.5 tot 5 meter rond hem hebben verzameld. Op 0.5 m afstand is de rol van de akoestiek van de hal vrij klein, maar op grotere afstand wordt die steeds belangrijker.

De spraakverstaanbaarheid wordt door een paar grootheden bepaald:

1. de sterkte van de stem van de spreker,
2. de nagalm van de eigen spraak,
3. het “rumoer” van de overige coaches/sporters die geluid produceren,
4. eventuele geluidproducerende ventilatiesystemen,
5. eventuele aanwezige toeschouwers in een sporthal.

Het eerste punt bepaalt het akoestische “signaal”, de overige punten noemen we “ruis”. De spraakverstaanbaarheid staat of valt met de verhouding tussen signaal en ruis. Uiteraard is het tweede punt afhankelijk van de hoeveelheid geluidabsorberend materiaal, maar het interessante is dat dat ook geldt voor de punten 3, 4 en 5.

2.2 Geluidabsorberende materialen

Indien geluid invalt op een materiaal wordt slechts een deel van de energie gereflecteerd. Het gaat in een ruimte om de gereflecteerde t.o.v. de invallende energie, maar het is gebruikelijk om hiervan de complementaire waarde te nemen. Dit is de geluidabsorptiecoëfficiënt, meestal aangeduid met het symbool α . In de praktijk varieert die van ca. 0.02 bij glas of speciaal geverfde beton tot ca. 0.8 voor glas- en steenwol. Waarden tussen 0.8 en 1.0 zijn mogelijk met speciale constructies¹.

Om in een ruimte de totale absorptie te karakteriseren is niet alleen α belangrijk, maar ook het oppervlak in vierkante meters (S) van het desbetreffende materiaal. Vermenigvuldiging van beide grootheden levert, voor oppervlak i de grootheid A_i :

$$A_i = \alpha_i \times S_i \tag{1}$$

Om geluidenergie te absorberen zijn dus vaak vele vierkante meters noodzakelijk. Om die reden is plafondabsorptie in de praktijk zo populair.

¹ Zelfs waarden boven 1.0 worden gerapporteerd, maar dat ligt vooral aan de voorgeschreven meetmethode [Nijs et al, 2002]

Voor een gehele ruimte kan vergelijking (1) worden gesommeerd over alle n materialen en alle oppervlakken in een ruimte:

$$A_{tot} = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (2a)$$

Dat is soms nog helemaal niet zo simpel omdat van veel materialen de absorptiecoëfficiënten slechts bij benadering bekend zijn. De gemiddelde waarde van de absorptiecoëfficiënt voor een totale ruimte wordt eenvoudigweg berekend door deling:

$$\bar{\alpha} = A_{tot} / S_{tot} \quad (2b)$$

2.3 De nagalmtijd, het geluidniveau en de “strength”

Om de nagalm in een fysische maat vast te leggen introduceerde Sabine de “nagalmtijd”. Daartoe wordt een geluidbron verondersteld die een continu geluiddrukkniveau produceert. Als de bron wordt uitgeschakeld is nog slechts nagalm hoorbaar en Sabine nam een afname van 60 dB t.o.v. het startniveau als maatgevend voor de nagalmtijd (RT in s)². Die blijkt afhankelijk van het volume van een ruimte en van het totale absorberende oppervlak:

$$RT = \frac{55.3 V}{c A_{tot}}, \quad (3a)$$

waarin c staat voor de geluidsn snelheid.

Formule (3a) is te vinden in normbladen. Indien 332 m/s zou worden ingevuld voor de geluidsn snelheid, ontstaat de wellicht meest gebruikte formule uit de akoestiek:

$$RT = \frac{V}{6 A_{tot}}. \quad (3b)$$

In het vervolg zullen wij echter rekenen met formule (3a) met $c = 343 \text{ m/s}$ ³. Die waarde geldt bij kamertemperatuur⁴.

Door geluidreflecties tegen de wanden van een ruimte stijgt de waargenomen geluidenergie bij de toehoorder. Uit de akoestische theorie⁵ blijkt dat het “geluiddrukkniveau” (L_P) in decibel (dB) in formulevorm kan worden geschreven als:

² Sabine gebruikte daartoe daadwerkelijk een stopwatch. Dat attribuut wordt in de sportwereld nog vaak gebruikt, maar uit de akoestiek is het toch wel verdwenen.

³ Formule 3a geldt over de gehele wereld, formule 3b niet. In de Angelsaksische wereld gaat/ging c in voeten per seconde en dan is het getal 6 niet meer geldig.

⁴ Sinds Sabine honderd jaar geleden zijn vergelijking formuleerde zijn er steeds weer andere formules opgesteld die tot andere uitkomsten leiden. Steeds weer blijkt Sabine’s formule toch het beste te werken [Ducourneau en Planeau, 2003], [Nesselaar, 2001]. Modellen als bijvoorbeeld van Eyring en Fitzroy voorspellen kortere nagalmtijden, maar zij werken eigenlijk alleen bij een ideale lineaire nagalmcurve. Bij metingen en berekening “hangt de nagalmcurve vaak wat door” (bolle curven zijn ons helaas niet bekend), waardoor de nagalmtijd wat langer wordt en de overeenkomsten met Sabine beter zijn. Daarom wordt in dit artikel uitsluitend met Sabine’s formule gewerkt.

⁵ Onze favoriet voor studenten is [Luxemburg & Martin, z.j.], maar daarin wordt gewerkt met een benaderde formule voor (4a). Een ander probleem is nog dat het boek niet wordt herdrukt.

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{A_{tot}} \right) \quad (4a)$$

Hierin geeft r de afstand tussen de bron en de toehoorder; de grootheden α en A_{tot} zijn reeds eerder gedefinieerd.

De grootheid Q geeft de richtingscoëfficiënt van de bron. Bij een “omni-directionele” bron wordt de geluidenergie in alle richtingen even sterk uitgezonden. Dan geldt $Q = 1$. Indien de bron wel een richting heeft geldt vrijwel altijd dat Q groter is dan 1 in de as van de bron. Dat wordt gecompenseerd door waarden kleiner dan 1 in andere richtingen, zodat de integraal over alle richtingen precies op 1 uitkomt. L_w is het akoestisch vermogenniveau van de bron⁶.

Het nadeel van formule (4a) is dat het bronvermogenniveau (L_w) bekend moet zijn. Om dat eruit te werken wordt het signaal vergeleken met het geluidniveau in het vrije veld op 10 m van de bron met $Q = 1$. Daar komt $L_w - 31$ uit. Het verschil wordt G (strength) genoemd, die dus kan worden geschreven als:

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

Op grotere afstand van de bron is de tweede term in de vergelijking meestal veel groter dan de eerste. Dit heet het “diffuse geluidveld” en het is dus onafhankelijk van de afstand tot de bron.

Om de spraakverstaanbaarheid in een sporthal te beschrijven, splitsen we de vergelijking in het directe veld en het diffuse veld:

$$G_{dir} = 31 + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right). \quad (5a)$$

en:

$$G_{diffuus} = 31 + 10 \log \left(\frac{4(1-\bar{\alpha})}{A_{tot}} \right). \quad (5b)$$

2.4 Vroege reflecties, late reflecties en de spraakverstaanbaarheid

Geluid dat vanuit een bron reflecteert tegen de wanden heeft meer tijd nodig om de ontvanger te bereiken dan het directe geluid. Sommige gereflecteerde stralen doen er dusdanig lang over dat de reflecties van een gesproken lettergreep tegelijk arriveren met het

⁶ Bij de menselijke stem wordt vaak $Q = 2.5$ aangenomen, maar eigenlijk is dat getal afhankelijk van de frekwentie.

Het bronvermogen van spraak is afhankelijk van het type spraak (van fluisteren tot schreeuwen); de waarden in de literatuur zijn niet eenduidig. Wij gaan zelf meestal uit van een geluiddrukkniveau van 60 dB(A) op 1 m afstand. Dit wordt in ons land nl. als “normaal” aangeduid [Lawaai-beheersing, 1994-2001]. Bij genoemde Q -waarde is het akoestisch vermogenniveau dan terug te rekenen tot 67 dB(A). In klaslokalen zijn overigens lagere waarden gemeten [Pols, 1981] en ook De Ruiter [2000] hanteert een iets lagere waarde; hij neemt als vermogenniveau 65 dB(A). Barron [Barron, 1993] stelt een vermogenniveau voor van 70 dB(A) voor een acteur in een theater, hetgeen dus slechts 3 dB(A) luider zou zijn dan “normale” spraak.

directe geluid van een volgende lettergreep; een lange nagalmtijd stoort dan de spraakverstaanbaarheid. In de akoestische praktijk wordt ervan uitgegaan dat dit type storing optreedt bij reflecties die later arriveren dan 0.05 s (50 millisecon) na het directe geluid. Reflecties die eerder arriveren worden als “nuttig” bestempeld, omdat zij het totale geluidsdrukkniveau versterken en een spreker dus makkelijker verstaanbaar maken.

Dit leidt dus tot een dilemma: enerzijds moet de nagalmtijd omlaag om storende galm te beperken; anderzijds veroorzaakt een te korte nagalmtijd een te laag spraakniveau. De ontwerper van een spreekzaal moet dus een tamelijk delicate balans zien te vinden en in de praktijk is het dan ook niet zo moeilijk om voorbeelden te vinden waar het is misgegaan.

In ons land is een maat ontwikkeld die in eerste instantie was bedoeld voor *meting* van de spraakverstaanbaarheid: de “Speech Transmission Index”, meestal aangeduid met *STI* [Houtgast et al, 1980], [Plomp et al, 1980]. De methode blijkt ook geschikt om via een *berekening vooraf* de spraakverstaanbaarheid vast te leggen [Plomp & Duquesnoy, 1980]. *STI* heeft een waarde tussen 0 en 1. Een waarde van 0.8 heet “excellent”; *STI* = 0.3 vormt de ondergrens om zinnen nog te verstaan. De overgang van “redelijk” naar “goed” wordt steeds gekozen bij *STI* = 0.6. Dit is een veel gehanteerde grenswaarde (hoewel dus eigenlijk een ondergrens) die in een sporthal goed als uitgangspunt kan worden genomen. Helaas is *STI* in kort bestek moeilijk uit te leggen en daarom wordt nogal eens gewerkt met een simpeler maat: *C*₅₀. Die maat is gestoeld op een grootte die allereerst is ontwikkeld in de akoestiek van muziekzalen [Beranek, 1996], [Bradley, 1986, 1]. De waarde van *C*₅₀ kan wiskundig worden gedefinieerd, maar eigenlijk is het niets anders dan een signaal-ruisverhouding (in dB) die ontstaat als de vroege energie voor 50 ms (in dB) wordt verminderd met de energie die na 50 ms binnenkomt.

De correlatie tussen *C*₅₀ en *STI* blijkt in de praktijk buitengewoon hoog [Bradley, 1986, 2]. In een sporthal komt *C*₅₀ = 0 dB ongeveer overeen met *STI* = 0.55 - 0.58. Om een excellente waarde *STI* = 0.8 te bereiken zal *C*₅₀ in de orde van +9 dB moeten liggen. De ondergrens van het spraakverstaan ligt bij *STI* = 0.3, overeenkomend met *C*₅₀ = -6 dB. De grenswaarde *STI* = 0.60 kan worden vergeleken met *C*₅₀ = +1 à 2 dB.

Het aardige is nu dat het in een sportzaal simpeler kan. Sportzalen zijn meestal groot en, indien een spreker niet te dicht bij de wanden staat, arriveren vrijwel alle reflecties van wanden en plafond na 50 ms. Dit betekent nl. dat de reflecties via wanden of andere oppervlaktes een loopweg hebben die minimaal 17 m langer is. Men moet zich dus op minstens 8.5 m van alle reflecterende oppervlakken bevinden om aan deze voorwaarden te voldoen. De reflectie van de vloer mag dus zeker als nuttig worden beschouwd en soms geldt dit ook voor een wandreflectie; het overgrote deel van de reflecties is echter storend. We kunnen nu een signaal-ruisverhouding *S/N* invoeren (die sterk lijkt op *C*₅₀) als:

$$S / N = G_{dir} - G_{diffuus} \quad (6)$$

Indachtig de getalswaarden voor *STI* en *C*₅₀, en indachtig enige extra hulp van de vloerreflectie, zijn er nu ook wenselijke waarden voor een sporthal uit af te leiden. *S/N* = -6 dB komt overeen met de ondergrens van verstaanbaarheid; *S/N* = 0 komt ongeveer overeen met de ondergrens *STI* = 0.60 en kan als “minimaal wenselijk” worden beschouwd; *S/N* = +6 dB zullen we “uitstekend” noemen⁷.

⁷ Indien *S / N* = 0, zijn direct en diffuus even sterk. De afstand waarop dat wordt bereikt is dus precies gelijk aan de nagalmstraal.

2.5 Meerdere bronnen in een zaal

Tot nu toe is uitgegaan van één spreker plus een aantal waarnemers die allemaal naar die ene spreker luisteren. De “eigen” nagalm van de spreker fungeert dan als ruis. Daaraan wordt nog ruis toegevoegd die door genoemde waarnemers wordt geproduceerd, zoals schuifelende voeten, gefluister, enz. Dat effect reageert vrijwel gelijk op toegevoegde absorptie als de galm van de spreker, zodat de signaal-ruisverhouding gelijk blijft en het effect hier dus kan worden genegeerd⁸.

In een gymnastieklokaal zal een situatie met één bron regelmatig voorkomen, maar in een sporthal zijn vaak meerdere bronnen aanwezig. Te denken valt bijvoorbeeld aan een grid van badmintonvelden voorzien van een trainer plus pupillen. Het (gewenste) geluid van het ene veld is dan ruis voor het andere. In formule (4a) is het effect te introduceren door aanpassing van het vermogen via de bronterm. Als alle bronnen *evenveel*⁹ geluid produceren is een simpele aanpassing mogelijk van formules (4a) en (5b) door introductie van het aantal bronnen N_{br} .

$$G_{diffuus} = 31 + 10 \log \left(\frac{4(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S} \times N_{br} \right). \quad (7)$$

Nu ontstaat er een zeer interessant geval indien het aantal bronnen per vloerooppervlak gelijk blijft. Dan is N_{br}/S vrijwel constant¹⁰ en de enige grootte die in dat geval maatgevend blijkt voor de herrie in sporthallen van verschillende grootten is de gemiddelde absorptiecoëfficiënt.

2.6 Een rekenvoorbeeld ter illustratie

Gewapend met de kennis uit de voorgaande paragrafen worden drie zaaltypen doorgerekend. Een hal van $44 \times 24 \times 7 \text{ m}^3$ zullen we hier als standaardtype beschouwen. De modale gymzaal meet $21 \times 12 \times 5.5 \text{ m}^3$; de maten voor de grote hal zijn ontleend aan een tamelijk nieuwe zaal in Dordrecht waarin zich ook een atletiekbaan bevindt. Tabel 1 geeft de nagalmtijden zoals berekend met Sabine's formule (3a). Er zijn twee waarden gebruikt voor de gemiddelde absorptiecoëfficiënt, nl. 10 en 25%.

Hier zij reeds vermeld dat er in Nederland een aanbevolen waarde bestaat voor de nagalmtijd van 1.5 s voor de middenformaathal. Bij 25% wordt daar dus net niet aan voldaan. De bestaande “minimumeis” van 1.8 s wordt wel gehaald.

⁸ In kleinere ruimten (een schoollokaal bijvoorbeeld) speelt het echter wel degelijk een belangrijke rol.

⁹ Helemaal aan het eind komen we nog even terug op bronnen met een ongelijke sterkte.

¹⁰ De hoogte van een hal schaalt meestal niet helemaal mee, zodat dit niet voor honderd procent opgaat.

Tabel 1: Berekende nagalmtijden voor drie zaaltypen voor twee waarden van de gemiddelde absorptiecoëfficiënt: 10 en 25%.

Haltype	Afm. [m]	Volume [m ³]	S [m ²]	T [s]	
				$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.25$
Gymzaal	21 × 12 × 5.5	1386	867	2.6	1.0
Normaal	44 × 24 × 7	7392	3064	3.9	1.6
Groot	80 × 35 × 10	28 000	7900	5.7	2.3

In tabel 2 wordt de signaal-ruisverhouding S/N gepresenteerd berekend met formule (6). Ditmaal zijn er vier kolommen. In de linker twee kolommen staan (voor twee afstanden tussen bron en ontvanger) de waarden indien zich één bron in de zaal bevindt; in de rechter twee is een fictieve waarde van 1 bron per 200 vierkante meter genomen. Dat is uiteraard een tikkeltje merkwaardig, want het betekent dat in de gymzaal met 1.3 bronnen wordt gewerkt, maar het is gedaan om een onderlinge vergelijking tussen de zalen mogelijk te maken.

Tabel 2: De signaal-ruisverhouding S/N bij twee bron-mikrofoon-afstanden (r) voor 1 bron per zaal of 1 bron per 200 m² vloeroppervlak.

De gemiddelde waarde van de absorptiecoëfficiënt bedraagt 25%. Als bron is een omni-directionele bron verondersteld met $Q = 1$.

Haltype	Afm. [m]	S/N , 1 bron per zaal [dB]		S/N , 1 bron per 200 m ² [dB]	
		$r = 2$ [m]	$r = 5$ [m]	$r = 2$ [m]	$r = 5$ [m]
Gymzaal	21 × 12 × 5.5	1.6	-6.4	0.6	-7.4
Normaal	44 × 24 × 7	7.1	-0.9	-0.1	-8.1
Groot	80 × 35 × 10	11.2	3.2	-0.3	-8.7

Indien zich in de zaal één bron bevindt zien we een verschijnsel dat bij beginners in dit vak nogal eens merkwaardig overkomt: de grote zaal heeft een langere nagalmtijd dan de gymzaal, maar desondanks is in de grote zaal de spraakverstaanbaarheid veel beter. Op een afstand van 5 m daalt in een gymzaal S/N tot -6.4 dB. Dat is ongeveer de afstand waarop een gymleraar zijn/haar leerlingen toesprekt. De spraak is daar eigenlijk niet meer te verstaan en slechts omdat de vloerreflectie nog ca. 2 dB bijdraagt en Q voor de menselijke stem 2.5 bedraagt¹¹, onttaardt deze situatie niet in een ramp¹².

Indien het aantal bronnen per vierkante meter vloeroppervlak gelijk is vertonen de drie zalen waarden die ongeveer even goed of slecht zijn. De kleine winst van de gymzaal

¹¹ Dat geldt alleen in de as van de mond van de leerkracht; aan de zijkant of achterkant van het hoofd wordt de leerkracht dus vrijwel onverstaanbaar.

¹² Veel leerkrachten hebben ten onrechte de neiging om luider te gaan praten. S/N blijft dan echter gelijk, hetgeen in de praktijk wordt bevestigd. Alleen als het stoorlawaai mede wordt veroorzaakt door andere geluiden (geluid van buiten, van installaties of van de leerlingen) biedt luider spreken soelaas.

komt doordat in de gymzaal de hoogte relatief groter is dan in de andere zalen. Indien de hoogte zou meeschalen met het vloeroppervlak zou er driemaal hetzelfde uitkomen.

Uit de voorgaande beschouwingen komt de gemiddelde absorptiecoëfficiënt tevoorschijn als een grootheid die bij sportzalen een goede schatting geeft van het lawaai dat mag worden verwacht.

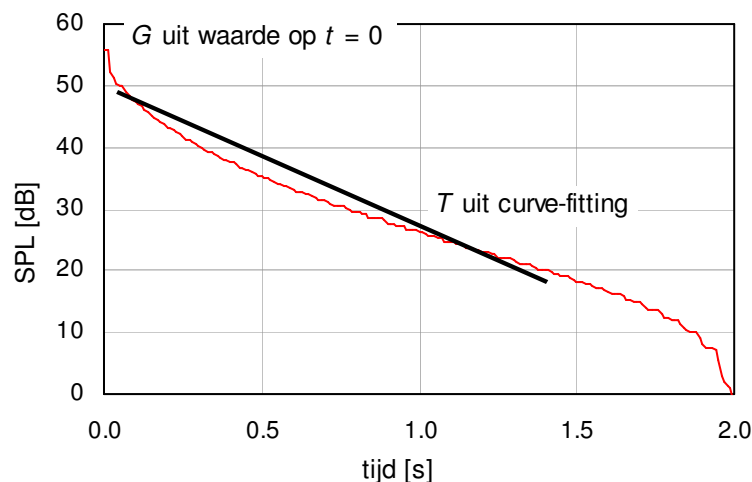
3. Meten en berekenen van akoestische grootheden

3.1 De absorptiecoëfficiënt α

In het voorgaande hoofdstuk kwam de gemiddelde absorptiecoëfficiënt naar voren als een goede maatgevende grootheid. Dat maakt een eenvoudige berekening mogelijk in de ontwerpfase van een zaal met behulp van de uiterst simpele formules (2a) en (2b). Er is “slechts” één probleem. Hoe komen we aan de juiste waarden? Van leveranciers van absorptiematerialen? En vertrouwen we die gegevens dan? In de ontwerpfase is er niets beters, maar in de praktijk zal, na voltooiing van de zaal, vaak een meting worden verricht om te controleren of fabrikant, architect en eventuele adviseur hun rekenwerk goed hebben gedaan.

De gebruikelijke controlemethode is om een nagalmmeting te verrichten en via formule (3a) de absorptiecoëfficiënt terug te rekenen. Ook uit een meting van G is, via formule (4b), een absorptiecoëfficiënt terug te rekenen. Dat gaat minder soepel omdat ook de afstand tussen bron en mikrofoon moet worden ingevoerd, maar als het goed is, leveren beide methoden dezelfde waarde. Of dat ook het geval is willen we in dit hoofdstuk nagaan.

De hedendaagse akoestiek leunt zwaar op de Schroedercurve [Schroeder, 1965]. Die wordt verkregen met de computer, maar eigenlijk wordt de onderliggende methode al een eeuw gebruikt. Het is nl. de afname van de geluidenergie indien in een ruimte een bron wordt uitgeschakeld die ideale ruis produceert. Figuur 1 geeft een voorbeeld. De waarde van G wordt (na ijking van de bron) afgeleid uit het geluiddrukkniveau (SPL) op $t = 0$. De nagalmtijd ontstaat uit curve-fitting langs de helling.



Figuur 1: Een Schroedercurve waaruit G en T worden afgeleid.

In theorie is de Schroedercurve een rechte lijn, zodat curve-fitting eenvoudig is. In de praktijk zijn curves echter heel vaak concaaf; figuur 1 geeft (met opzet) een enigszins extreem voorbeeld¹³. Om de methode ook voor die gevallen vast te leggen is een ISO-

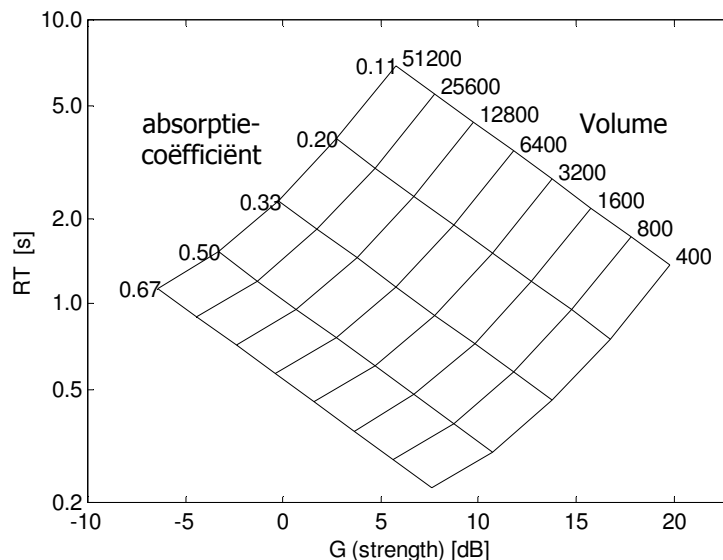
¹³ Sabine's theorie is gebaseerd op een kubus met homogene absorptie op de wanden. In de praktijk hebben we dat zelden, zodat er inhomogeniteit/asymmetrie ontstaat met “doorhangende curves”. Dat blijft hier verder onbehandeld.

norm ontwikkeld [ISO 3382, 1997]. De nagalmtijd moet dan worden bepaald via curve-fitting tussen de punten -5 en -25 dB of -35 dB t.o.v. het beginniveau. Curve-fitting is op zich eenvoudig (daar hebben we de computer voor), maar de vraag is of zo'n waarde iets zegt.

3.2 De correlatie van G en RT via het G - RT -diagram

Om de correlatie tussen G en RT te kunnen nagaan introduceren we hier een diagram waarin beide grootheden tegen elkaar worden uitgezet. Figuur 2 toont een voorbeeld waarin de formules (3a) en (5b) zijn gebruikt. Dit diagram is dus expliciet voor G in het diffuse veld¹⁴.

In de figuur zijn twee variabelen ingevoerd: het volume V en de absorptiecoëfficiënt α . Echter, de vorm van de ruimte speelt ook een rol. Die komt tot uiting door ook het oppervlak S mee te rekenen (V/S varieert immers met de vorm). Dat heeft wel degelijk invloed; anderzijds zijn de onderlinge verschillen verbluffend klein tussen enerzijds een kubus en anderzijds een lange, lage sporthal.

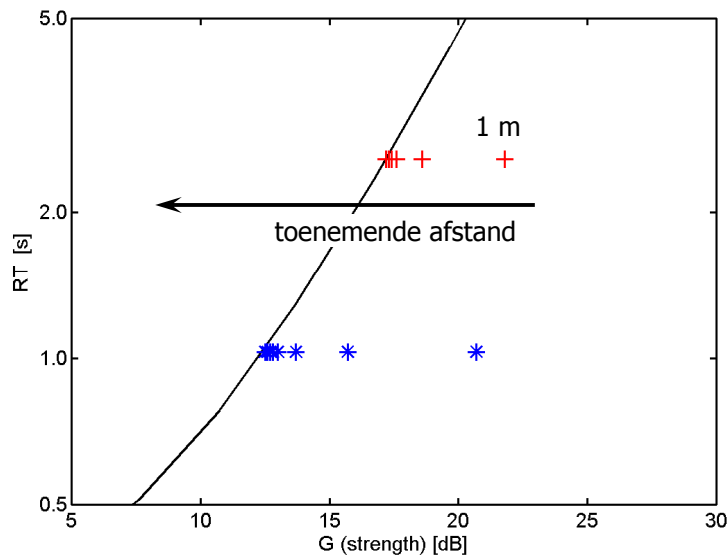


Figuur 2: Een G - RT -diagram geeft de nagalmtijd tegen de waarde van G (strength) in het diffuse veld. Het volume van de ruimte en de gemiddelde absorptiecoëfficiënt zijn de parameters¹⁵.

Indien een gymzaal van $21 \times 12 \times 5.5$ m³ (dus met een volume van 1386 m³) wordt doorgerekend, blijft in figuur 2 uiteraard slechts één lijn over. Die staat getekend in figuur 3.

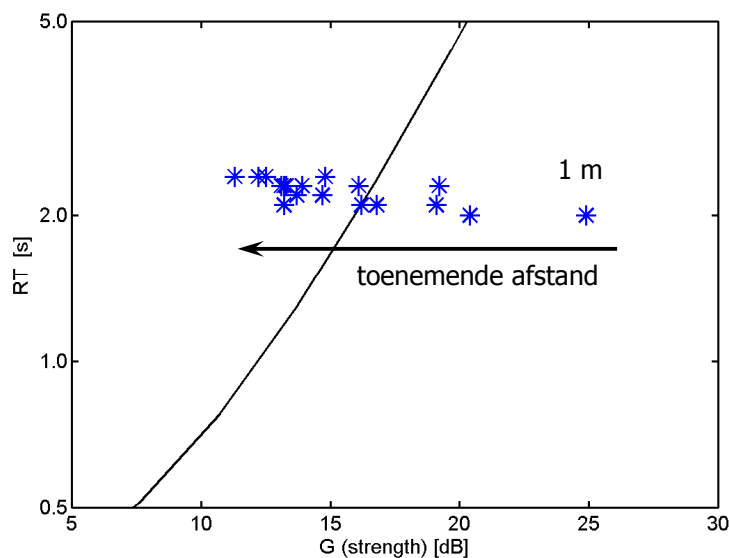
¹⁴ Aangetoond kan worden dat dit soort figuren het betrouwbaarst is indien de bron-ontvanger-afstand gelijk is aan de gemiddelde vrije weglengte ($= 4V/S$).

¹⁵ De schaal van de nagalmtijd is logaritmisch. Daardoor ontstaat een betere figuur, maar het heeft ook een principiële achtergrond. Een eventuele verlaging van de nagalmtijd zou altijd relatief moeten worden gepresenteerd. Een verbetering van 1.0 naar 0.8 s is groter dan van 2.0 naar 1.8 s.



Figuur 3: Een G-RT-diagram berekend voor twee absorptiecoëfficiënten (0.10 en 0.25) voor een gymzaal van $21 \times 12 \times 5.5$. De resultaten bij $\alpha = 0.10$ worden gegeven met (+); $\alpha = 0.25$ hoort bij (*).

In dezelfde figuur zijn punten getekend die zijn berekend met de theoretische formules, maar nu rekening houdend met de afstandsterm (formule 4b i.p.v. 5b). Op 1 m ligt G uiteraard hoger dan de voorspelde waarde. Bij toename van de afstand vormt de schuine curve de limietwaarde. In de formules voor de nagalmtijd ontbreekt een afstandsterm zodat in verticale richting geen spreading ontstaat.



Figuur 4: Een G-RT-diagram zoals gemeten voor een gymzaal van $21 \times 12 \times 5.5$.

Figuur 4 geeft een voorbeeld van *metingen* in een gymzaal. Uiteraard is er nu geen sprake van een vooraf bekende absorptiecoëfficiënt; het is eerder de bedoeling dat we die uit de figuur afleiden.

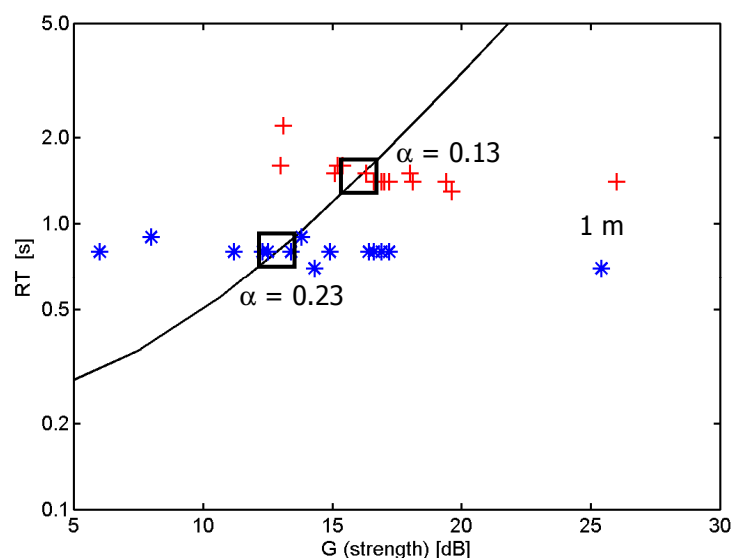
Er vallen een paar dingen op:

- Er is geen sprake van een limietwaarde in G ; naarmate we verder van de bron komen blijft die dalen. Dit effect is al vele malen gemeten. Peutz heeft in de jaren 70 reeds een empirische formule gepresenteerd; later heeft met name Barron een meer theoretische curve afgeleid [Barron, 1993]. Indien Barrons formule wordt gehanteerd verbetert de correlatie tussen meten en berekenen (hier niet gepresenteerd), maar een ideale fit wordt toch niet bereikt.
- De spreiding in RT is zeer gering in vergelijking tot de spreiding in G , zelfs indien we de invloed van de afstand eruit zouden werken. Dit is waarschijnlijk de reden waarom de nagalmtijd zo populair is geworden bij metingen. De plaats van de microfoon maakt niet veel uit. Indien we liever G zouden gebruiken om de kwaliteit van de zaal vast te leggen, zouden ook meerdere microfoonposities nauwkeurig moeten worden vastgelegd.

3.3 Een opknopbeurt van een bestaande ruimte

De gymzaal van figuur 4 heeft een nagalmtijd van 2.1 s en is dus (voor een zaal met dit volume) buitengewoon slecht. Men had in dit voorbeeld domweg vergeten om absorberend materiaal aan te brengen. Er is een opknopbeurt toegezegd, maar helaas zijn daarvan nog geen meetresultaten beschikbaar.

Dat is wel het geval met de kantine van het Bouwkundegebouw van de TUDelft (ook wel “Faculteitsrestaurant” genoemd). Daarin was 30 jaar geleden een akoestisch plafond aangebracht, waarbij een paar jaar geleden de klassieke fout was gemaakt om het dicht te verven. Recentelijk is een nieuw plafond aangebracht. In figuur 5 staan de metingen voor en na de opknopbeurt.



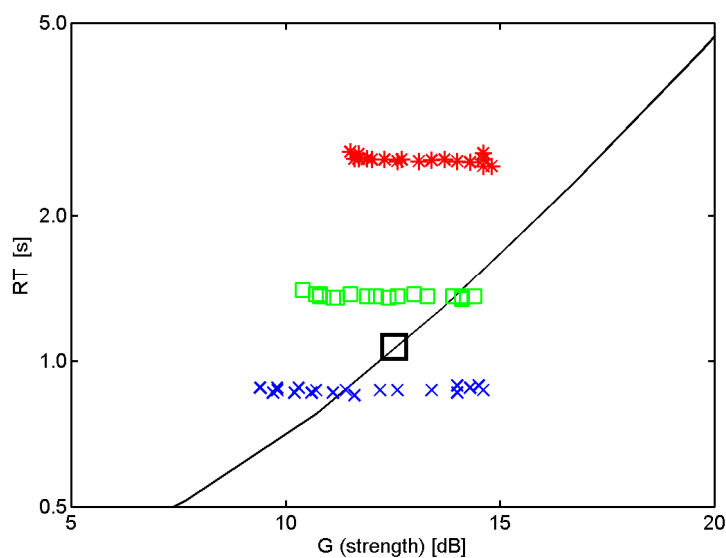
Figuur 5: Een G - RT -diagram gemeten in een restaurant voor en na een opknopbeurt.

Uit de nagalmtijden kan een schatting worden gemaakt van de gemiddelde absorptiecoëfficiënten. Vóór de opknapbeurt was die gelijk aan 0.13 (ondanks het schilderwerk absorbeerde het oude plafond toch nog wel een beetje); daarna is de waarde gestegen tot 0.23. Die verbetering is redelijk. Om van een goed resultaat te spreken is in deze ruimte een waarde van 0.30 aan te bevelen, maar zo'n plafond gaat het budget van de hedendaagse universiteit verre te boven.

De figuur wordt hier vooral gebruikt om een ander, positief effect te illustreren. De waarde van G op 1 m afstand daalt nauwelijks. Dat spreekt vanzelf: het niveau wordt daar hoofdzakelijk veroorzaakt door het directe geluid. De waarde van G op wat grotere afstand¹⁶ daalt met ca. 3 dB, dus overeenkomstig de stijging van α . De grote winst wordt echter geboekt op de grootste afstanden. Zeven dB winst is daar mogelijk. Dat volgt ook uit de eerder genoemde methode van Barron en dit effect is eigenlijk de redding van de geluidhinderbestrijder. Als de theorie van het diffuse geluidveld onverkort geldig zou zijn, zou de winst ook op grote afstand slechts 3 dB zijn.

3.4 Een tegenvoorbeeld uit de computer

Indien Barrons theorie wordt toegepast, vinden we in de figuren 4 en 5 voorbeelden waarin metingen en berekeningen zeer aardig overeenkomen. Het blijkt echter wel degelijk mogelijk om met de PC een voorbeeld te genereren waarin een voorspelling met Barrons theorie ernstig faalt. In figuur 6 staan de uitkomsten van een berekening voor de eerder genoemde gymzaal. De verdeling van de absorptie over de gymzaal is asymmetrisch: het grootste deel van de absorptie bevindt zich op het plafond¹⁷ (zie figuuronder-schrift).



¹⁶ Aangetoond kan worden dat de gemiddelde vrije weglengte hierin een zeer belangrijke rol speelt, maar dat voert te ver voor dit artikel.

¹⁷ De asymmetrie wordt nog eens versterkt doordat de afstand loodrecht op het absorberende oppervlak (de hoogte van de zaal dus) het kortste is. Maatgevend is ongeveer de grootte αL die per richting x , y of z kan worden becijferd. In een homogene kubus zijn die drie maten gelijk; juist bij veel plafondabsorptie is de afwijking het grootst.

Figuur 6: Een G-RT-diagram berekend in de computer voor een gymzaal van $21 \times 12 \times 5.5$. Alle wanden en vloer hebben een absorptiecoëfficiënt van 10%. Het plafond heeft 62%; de gemiddelde waarde over de gehele ruimte is daardoor 25%. De bovenste serie uitkomsten heeft spiegelende wanden; de middelste serie is bij 20% verstrooiing; de onderste bij 99%¹⁸.

Bij metingen aan bestaande zalen is de gemiddelde absorptie nog niet bekend, maar bij computerberekeningen weten we uiteraard precies wat het model ingaat. Hier is dat 0.25, resulterend in een nagalmtijd volgens Sabine van 1.04 s ¹⁹. Met name de berekening van de nagalmtijd in het spiegelende geval is veel te hoog. Het rekenmodel levert 2.6 s.

Het opvoeren van de verstrooiing van de wanden verbetert de overeenkomsten met de voorspellingen volgens formules (3a) en (5b), maar eigenlijk moeten onrealistische diffusiecoëfficiënten worden ingevoerd om het ray-tracing-model te laten kloppen met de Sabine-waarden.

De figuur leert ons dat de gevoeligheid van RT voor de wijzigingen veel groter is dan die van G . Dat is theoretisch ook verklaarbaar. G blijkt bij nadere bestudering vooral gevoelig voor het totale energieverlies in een ruimte die wordt vastgelegd door de totale absorptie (A) die hier constant wordt gehouden. Bij de berekening van RT zien we, in een schoendooszaal, het verschijnsel dat de nagalmtijd kan worden ontbonden in de nagalmtijden langs de drie assen. De reflecties langs de lengteas van de zaal (in dit geval met weinig absorptie op de kopse kanten) zorgen voor een verlenging van de totale nagalmtijd²⁰.

Er is echter iets merkwaardigs. Sinds dit soort resultaten uit onze computer rolden zijn wij naarstig op zoek naar zalen waar dit effect ook kan worden gemeten. Tot nu toe is het ons nooit gelukt om een voorbeeld te vinden. Nagalmtijdcurven hangen vaak wel degelijk een beetje door (waardoor RT -waarden oplopen), maar nooit in een mate dat het beeld uit figuur 6 kan worden gevonden. Waarschijnlijk wrekt zich hier (o.a.) de toepassing van geluidstralen in ray-tracing-modellen, die geen rekening houden met de eindige afmetingen van de vlakken. Voorlopig vertrouwen we de meetuitkomsten meer dan de computerresultaten.

¹⁸ De berekeningen zijn uitgevoerd met CATT-Acoustic. Toepassing van een ander rekenprogramma kan leiden tot soortgelijke uitkomsten, maar bij andere waarden voor de diffusiecoëfficiënten [Nijs et al. 2003]

¹⁹ Er wordt verder geen rekening gehouden met de absorptie van lucht, die, met name bij 4000 en 8000 Hz de nagalmtijd flink kan verkorten.

²⁰ Zie nogmaals noot 4. Men zou overigens kunnen verwachten dat de “early decay time” het in dit opzicht beter doet. Dat is echter slechts zeer ten dele het geval. Bovendien worden dan weer nieuwe problemen geïntroduceerd. Er gaat naar onze mening voorlopig niets boven de nagalmtijd tussen -5 en -20 of -25 dB.

4. Een poging tot normstelling

4.1 Normvoorstel plus alternatief

In december 2002 zijn nieuwe aanbevelingen verschenen voor de maximale nagalmtijden in sportaccommodaties [Normcommissie Akoestiek in sporthallen, 2002]. De nieuwe norm²¹ legt de nagalmtijd vast, waarbij drie categorieën worden onderscheiden in oplopende grootte met een oplopende nagalmtijd. De waarden staan (o.a.) in tabel 3. De grootte van een hal speelt dus een rol, maar wij zijn van mening dat de invloed van het volume in de hal nog onvoldoende is.

Tabel 3: Akoestische grootheden in drie typen sportzalen. De nagalmtijd in de derde kolom is ontleend aan het normvoorstel; de vierde en vijfde kolom geven berekeningen volgens formule (3a) voor twee waarden van de gemiddelde absorptiecoëfficiënt. De meest rechtse kolom geeft de afstand waarop de S/N-verhouding uit formule (6) de waarde 0 bereikt voor één (!) omni-directionele bron²², echter alleen berekend met $\alpha = 0.25$.

Type Zaal	afmetingen [m]	Nagalmtijd [s]			afstand waar
		Normvoorstel	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.30$	$S/N = 0$ [m]
Gymnastieklokaal	21 × 12 × 5.5	1.2	1.0	0.9	2.4
	28 × 16 × 7		1.3	1.1	3.2
Sportzaal	28 × 22 × 7	1.5	1.4	1.2	3.6
	32 × 28 × 7		1.5	1.3	4.2
Sporthal	44 × 24 × 7	1.8	1.6	1.3	4.5
	70 × 28 × 9		2.0	1.7	6.1
	80 × 35 × 10		2.3	1.9	7.2

Er zijn in de tabel twee probleemgebieden:

1. De meest rechtse kolom illustreert (opnieuw) dat de problemen in een gymnastiekzaal minstens zo groot zijn als in grotere zalen. De voorgestelde norm (1.2 s) voor een gymnastieklokaal van $21 \times 12 \times 5.5 \text{ m}^3$ is dus (naar onze mening) niet streng genoeg. Als er les wordt gegeven is 1.0 s echt de absolute bovengrens; een lagere waarde is aan te bevelen²³.
2. De voorgestelde norm houdt onvoldoende rekening met zeer grote hallen. De maat $70 \times 28 \times 9 \text{ m}^3$ komt uit genoemd rapport. Die geeft dus waarschijnlijk al problemen, maar hoe moet dit als in de toekomst nog grotere hallen worden gebouwd? Hallen van

²¹ Die is gebaseerd op een bestaande norm waarvan niemand meer de oorsprong schijnt te kunnen vinden.

²² Het is bijzonder lastig om voor de sportzalenpraktijk rekening te houden met de richting. Automatisch richt een spreker zich vaak tot een toehoorder, maar als meerdere toehoorders zich verspreid hebben opgesteld is er weinig zinnigs meer over te zeggen. Daarom wordt $Q = 1$ genomen.

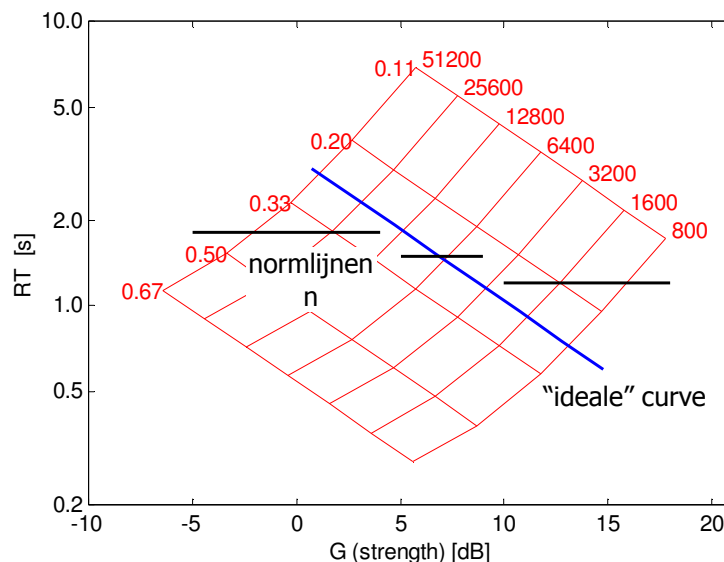
²³ Wellicht spiegelen de normbouwers zich aan de nagalmtijd van 1.0 s voor klaslokalen uit het Bouwbesluit. Dat is echter een volstrekt onacceptabele waarde. In een klaslokaal liggen waarden rond 0.6 s veel meer voor de hand. We hopen daar in een volgend artikel op terug te komen.

$80 \times 35 \times 10 \text{ m}^3$ bestaan al en er worden in de toekomst wellicht nog grotere gebouwd. Om dan aan de norm te voldoen moeten onrealistische absorptiecoëfficiënten worden gehaald.

In het rapport van de normcommissie wordt ook aanbevolen om G te betrekken in nader onderzoek. Dat is buitengewoon interessant. Wij doen nl. binnen onze onderzoeksgroep pogingen om in het G - RT -diagram, zoals gegeven in figuur 2, een “ideale” lijn te trekken voor de wenselijke akoestiek in (concert)zalen van verschillende grootte. Die methode (niet de getalswaarden) kan naar onze mening ook werken voor sportaccommodaties.

Figuur 7 geeft het onderliggende diagram²⁴. In de figuur staan drie horizontale lijnen. Zij representeren de waarden 1.8, 1.5 en 1.2 s, zoals die in het normvoorstel zijn genoemd. Daarmee wordt nogmaals duidelijk waarom die norm, naar onze mening, niet zo handig is. Voor kleine zalen (gymzalen) loopt de waarde van G veel te veel op. Voor zeer grote zalen moeten onrealistische waarden van de absorptiecoëfficiënt worden gekozen.

Ons idee van de ideale norm staat ook in de figuur getekend. We hopen in het voorgaande te hebben aangetoond dat een constante waarde van de gemiddelde absorptiecoëfficiënt simpel en doeltreffend kan zijn. We opteren dan voor een curve met $\alpha = 0.25$. Die waarde wordt gehanteerd omdat we aannemen dat in een zaal van ca. 6400 m^3 een nagalmtijd mag heersen van 1.5 s. Dat is weer gebaseerd op het rapport van de normcommissie zelf. Met enquêtes wordt in het rapport aangetoond dat er in dat soort zalen akoestisch eigenlijk weinig of niets mis is. Wij delen die mening: het wemelt in ons land van sporthallen (van een gemiddelde grootte) met een goed akoestisch klimaat; onze onvrede richt zich op de beide uiteinden van het spectrum. Ons voorstel voor een “ideale” curve in figuur 7 is dus veel toleranter voor grote zalen en voor gymzalen vinden wij de voorgestelde norm veel te slap. Sterker nog: onze “ideale” lijn is gebaseerd op een constante hoeveelheid lawaai per vloeroppervlak. In de praktijk zal de curve in figuur 7 eerder nog steiler moeten lopen.



Figuur 7: Het G - RT -diagram berekend voor sportzalen van verschillend volume. Ingetekend zijn de curven uit het normvoorstel en onze “ideale curve” die is gebaseerd op een constante absorptiewaarde

²⁴ De verhouding lengte : breedte : hoogte is 7 : 3 : 1, hoewel dat nauwelijks invloed heeft.

4.2 De praktijk

Ons voorstel voor een constante gemiddelde absorptiecoëfficiënt voor alle zaalvolumes heeft de charme van de eenvoud. Over de waarde kan eventueel nog eens worden nagedacht. Goede akoestiek begint bij 0.25; onze voorkeur ligt nog wat hoger: bij 0.30. Maar stel dat 0.25 wordt gekozen voor een norm, dan zal in de praktijk de ontwerper gedwongen zijn om enige marge in te bouwen, zodat 0.28 waarschijnlijk een geschikt uitgangspunt is. Daar valt mee te leven.

Zo'n waarde is ook helemaal geen zware opgave. Als we aannemen dat de vloer een paar procent absorbeert en dat het plafond wordt ontworpen op 60%, dan zullen de wanden 25 à 30 procent moeten absorberen. In veel hallen wordt absorptie aangebracht op het boven-deel van de wanden, zodat die waarden makkelijk bereikt worden. Ook het uitzoeken van een beetje slimme baksteen (zoals in zwembaden, bijvoorbeeld) kan helpen.

4.3 “Gedeelde zalen”

Tot nu toe hebben we ons alleen bezig gehouden met stoorbronnen die in sterkte min of meer gelijk zijn aan de “gewenste” bron. In de praktijk worden echter veel klachten geuit door gymnastiekleerkrachten die gymonderwijs geven in sportzalen die ook door anderen worden gebruikt. Dan ontstaan uiteraard problemen als een leerkracht een verhaal probeert te vertellen terwijl 15 m verder een klas al joelend een partijtje voetbal speelt.

In de praktijk probeert men dit op te lossen door vouwwanden te gebruiken, maar ook dan zijn er nogal eens klachten. De akoestische isolatie van vouwwanden willen we hier graag buiten deze discussie houden, maar één aspect is wel van belang. Indien een grote zaal is opgedeeld in kleinere zalen moeten, na sluiting van de vouwwand, de normen (voor α , voor G , of eventueel voor RT) worden toegepast zoals die gelden voor kleinere zalen.

5. Conclusie: Is de nagalmtijd een goede voorspeller voor akoestische kwaliteit?

NEEN, bij berekeningen in de planfase zijn er betere waarden

Naar onze mening moet de akoestische kwaliteit in een sportzaal vooral worden beschouwd als een lawaaiprobleem. De gemiddelde absorptiecoëfficiënt en de luidheid G zijn daarvoor betere indicatoren dan de nagalmtijd.

NEEN, volgens ray-tracing-modellen

Zoals geïllustreerd in figuur 6 voorspellen ray-tracing-modellen flinke afwijkingen van de nagalmtijd met Sabine's berekening.

JA, volgens onze metingen

Uit de figuren 4 en 5 kan worden afgeleid dat de nagalmtijd inderdaad een heel geschikte grootte is om de akoestische kwaliteit te karakteriseren. De spreiding door de ruimte is gering, zodat meting niet al te moeilijk is. Daarnaast geeft de nagalmtijd een heel aardige beschrijving van de “modale” waarde van G .

Onze mening is gebaseerd op een redelijke serie metingen (niet alleen in sportzalen en niet alleen door ons²⁵), maar een uitputtend onderzoek mag dit niet worden genoemd. We hebben wel hypothesen waarom we voorlopig de voorkeur geven aan metingen in de praktijk boven berekeningen in een ray-tracing-model, maar het echte bewijs ontbreekt nog.

JA, want voor metingen is er op dit moment niets beters

Ook indien het pleidooi voor een gemiddelde absorptiecoëfficiënt zou worden gevolgd blijft het noodzakelijk die waarde na te meten. Daartoe is de omgekeerde versie van formule (3a) het meest geschikt. Er zijn vele alternatieve nagalmtijdformules, maar keer op keer blijkt dat Sabine's formule de "minst slechte" is.

JA, maar alleen als het volume veel sterker meetelt

Als Sabine's nagalmtijd wordt gebruikt voor normstelling, maakt het uiteraard nauwelijks uit of de nagestreefde norm in α dan wel in RT wordt uitgedrukt. Voorwaarde is dan dat ook V en S worden meegerekend. In het huidige normvoorstel wordt met het volume onvoldoende rekening gehouden.

²⁵ Zie bijvoorbeeld ook de meetuitkomsten van de TU/e [Nesselaar, 2001] die bij het normvoorstel zijn gevoegd.

Literatuur

- Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural design*, 1993, London, E&FN Spon.
- Beranek, L.L., *How they sound, concert and opera halls*, 1996, New York, Acoustical Society of America.
- Bradley, J.S., *Predictors of speech intelligibility in rooms*, J. Acoust. Soc. Am, 1986, **80**, pp. 837-845.
- Bradley, J.S., *Speech intelligibility studies in classrooms*, J. Acoust. Soc. Am, 1986, **80**, 846-854.
- Ducourneau, J. & V. Planeau, *The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption*, Applied Acoustics, 2003, **64**, 845-862.
- Houtgast, T., H.J.M. Steeneken, R. Plomp, *Predicting speech intelligibility in rooms from the MTF, I General room acoustics*, Acustica, 1980, **46**, pp. 60-72.
- ISO 3382, *Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustic parameters*, 1997, Genève, 1997 - 06 – 15, second edition.
- Lawaai beheersing, Handboek voor Milieubeheer*, 1984-2001, Alphen aan den Rijn.
- Luxemburg, L.C.J. van & H.J. Martin, in: A. van Tol, *Jellema, Bouwkunde 7A*, z.j., Delft, Waltman.
- Nijs, L., G. Jansens, G. Vermeir, M. van der Voorden, *Absorbing surfaces in ray-tracing programs for coupled spaces*, 2002, Applied Acoustics 63, pp. 611-626.
- Nijs, L., Jansens, G. Vermeir, *Reply to comments on “Absorbing surfaces in ray-tracing programs for couple spaces”*, Applied Acoustics, 2003, pp. 833-844.
- Nesselaar, E.K., *Akoestiek in sporthallen, richtlijnen, meetmethode en voorspellingsmethode*, 2001, Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, FAGO.
- Normcommissie Akoestiek in Sporthallen, *Eindrapportage akoestiek in sporthallen*, 2002, Arnhem.
- Plomp, R., H.J.M. Steeneken, T. Houtgast, *Predicting speech intelligibility in rooms from the MTF, II Mirror image computer model applied to rectangular rooms*, Acustica, 1980, **46**, pp. 74-81.
- Plomp, R. & A.J. Duquesnoy, *Room acoustics for the aged*, J. Acoust. Soc. Am. 1980, **68**, pp. 1616-1621.
- Pols, L.C.W., *Effect van omgevingslawaai op het ongestoord spreken en verstaan*, 1981, Den Haag, Ministerie van VROM, Interdepartementale Commissie Geluidhinder, Rapport VL-HR-18-05
- Ruiter, Evert Ph. J. de, *Apartment buildings in nuisance zones along main roads; noise control with and within “glass houses”*, 2001, ICSV Honkong
- Schroeder, M.R., *A new method of measuring the reverberation time*, J. Acoust. Soc. Am, 1965, **37**, p. 409.