



# BOUWFYSICA

## **BOUWFYSICA**

*Kwartaalblad van de  
Nederlands Vlaamse Bouwfysica Vereniging*

### **HET OPTIMALISEREN VAN DE RUIMTEAKOESTIEK**

**REFLECTERENDE FOLIES OVER- OF  
ONDERGEWAARDEERD?**

**EEN AFWERKPLEK VOOR ASOCIAAL GEDRAG?**

*17e jaargang nummer 3 november 2006*

# HET OPTIMALISEREN VAN DE RUIMTEAKOESTIEK



VOOR DE LES- EN OEFENRUIMTES VAN HET  
CONSERVATORIUM VAN AMSTERDAM

ir. M.E. (Marten) Valk en ir. P.H. (Peter) Heringa, Peutz b.v.  
Zoetermeer (info@zoetermeer.peutz.nl)  
ir. L. (Lau) Nijs, TU Delft Faculteit Bouwkunde  
(L.Nijs@bk.tudelft.nl)

*Aan de ruimteakoestiek van de les- en studieruimten van een conservatorium stellen verschillende instrumentgroepen verschillende eisen. Om deze differentiatie voor de gewenste akoestiek van de verschillende instrumentgroepen in kaart te brengen, is met docenten en studenten van het Conservatorium van Amsterdam onderzoek verricht in twee speciaal gebouwde testruimten met een volume van circa 25 m<sup>3</sup> en 100 m<sup>3</sup>. Door het aantal breedbandabsorptiepanelen in deze ruimten te variëren, is met de musici de gewenste akoestiek voor hun instrument vastgesteld. Bij het onderzoek zijn de subjectieve ervaringen van de musici gekoppeld aan de objectieve meetresultaten. De eisen aan de ruimteakoestische voorzieningen bleken voor de verschillende instrumentgroepen sterk uiteen te lopen. Modellen zijn opgesteld voor jazzblazers, koperblazers, houtblazers, fluiten, snaarinstrumenten, piano, orgel, strikers, elektrisch versterkte instrumenten, contrabas jazz, zang, niet-melodisch slagwerk, mallets, pauken, koperensemble, jazz-combo/ popband, klassiek ensemble, theorie algemeen en theorie solfège.*

*Anders dan bestaande beschrijvingen van de gewenste nagalmtijd voor muziekzalen:  $\log RT = a \log V + b$ , zoals Cremer en Müller en Nijs en de Vries deze opgesteld hebben, blijkt de invloed van de luidheid voor ruimten met een volume onder de 400 m<sup>3</sup> sterk van invloed te zijn. Voor dergelijke ruimten is daarom een ander model opgesteld:  $RT = p \log V + q$ . De gemiddelde waarden voor  $p$  en  $q$  zijn respectievelijk 0.45 en 0.36.*

## INTRODUCTIE

In verband met de nieuwbouw van het Conservatorium van Amsterdam is onderzoek verricht naar de gewenste akoestiek van leslokalen (ca. 100 m<sup>3</sup>) en van oefenruimtes (ca. 25 m<sup>3</sup>) voor studenten. Als akoestisch adviseur is bureau Peutz bij de nieuwbouw betrokken. Het onderzoek is uitgevoerd als afstudeeropdracht voor de faculteit Bouwkunde van de TU Delft. Uniek is dat daadwerkelijk twee testruimten zijn gebouwd waarin de akoestische absorptie kan worden gevarieerd. De subjectieve ervaring van docenten en studenten is gekoppeld aan objectieve meetgegevens en aan de hand van de verzamelde data is een indeling gemaakt in instrumentgroepen en een richtlijn opgesteld om de gewenste akoestiek voor deze groepen te beschrijven. Hierbij is ook de invloed van de inrichting op de nagalmtijd meegenomen.

Voor het bespelen van verschillende instrumenten worden verschillende eisen gesteld aan de akoestiek. Koperblazers zullen vanwege de luidheid in kleinere ruimtes meer absorptie vragen dan houtblazers. Een fluit vraagt om meer support van de ruimte waardoor er minder absorptie in de ruimte aanwezig mag zijn om comfortabel te kunnen spelen. In diezelfde ruimte zou een drummer gek worden van het te luide drumgeluid, de harde reflecties van de grond en het ondefinieerbare geluid.

## UITGANGSPUNTEN

Muziek is totaal iets anders dan spraak. Aan ruimtes voor muziek worden dan ook andere eisen gesteld. Over het algemeen zullen musici een voorkeur hebben voor het spelen in een grote ruimte. Het geluid kan zich dan beter in de ruimte ontwikkelen en het geluidsniveau van luide instrumenten zal acceptabeler zijn. Bovendien wordt minder hinder ondervonden van de eigenfrequenties van de ruimte.

Het is gebruikelijk om een gewenst akoestisch klimaat uit te drukken in een nagalmtijd. Echter, de luidheid speelt een even grote rol. Stel bijvoorbeeld een concertzaal van 20 000 m<sup>3</sup>, met een nagalmtijd van 2.0 s en een luidheid van 5.0 dB [1]. Indien de zaal wordt verkleind met een schaalfactor 1:8, wordt het volume 39 m<sup>3</sup> en de nagalmtijd 0.25 s. De luidheid stijgt in dit geval naar 23.0 dB. Indien vervolgens de absorptie in de kleine ruimte wordt verkleind kan de nagalmtijd weer oplopen tot 2.0 s, maar dan stijgt de luidheid nog eens met 9.0 dB. Meestal verandert in een kleinere zaal ook de orkestgrootte, waardoor de luidheid ten dele wordt gecompenseerd, maar voor een individuele musicus is het geluid in een concertzaal totaal anders dan in een oefenruimte. Een lange nagalmtijd in een kleine ruimte geeft een badkamereffect dat absoluut funest is voor een leslokaal of studieruimte. Eenzelfde nagalmtijd kan in een grotere ruimte aanvaardbaar zijn. Naast dit verschil in het ervaren van de hoeveelheid galm zal voor de oefensituatie, in vergelijking met de uitvoersituatie, een akoestiek met minder galm geprefereerd worden. Om te onderzoeken wat de invloed is van het verkleinen van het volume van de ruimte zijn twee testruimtes gebouwd. Een lesruimte met een volume van 106 m<sup>3</sup> en een studieruimte van 28 m<sup>3</sup>.

Naast de geometrische eigenschappen zijn de wandafwerking, de inrichting en de akoestische voorzieningen bepalend voor de ruimteakoestische kwaliteit van een ruimte. Om de akoestiek in de testruimtes te kunnen variëren wordt gebruik gemaakt van breedbandabsorptiepanelen. Voor het testen is gebruik gemaakt van panelen van 0.9 m x 1.8 m en van 0.9 m x 0.9 m, beiden met een diepte van 15 cm. Het princi-

pe van breedbandabsorptie berust op de combinatie van laagfrequent absorptie door een resonator en midden- en hoogfrequent absorptie door poreuze materialen. Door de juiste dimensionering van de verschillende lagen absorberen de panelen over het gehele spectrum zo goed als gelijk. Mede door optredende randeffecten hebben de panelen, uitgaande van het totale oppervlak, ongeveer een effectiviteit van 100% absorptie over de verschillende octaafbanden.

De panelen zijn door middel van een hakensysteem aan de wanden en het plafond te bevestigen. Door te variëren met de hoeveelheid en de plaatsing van de panelen kunnen de akoestische parameters aangepast worden. Bij toevoeging van panelen aan de testruimtes zal de nagalmtijd verkorten en de luidheid dalen. De nagalmtijd in de lesruimte (106 m<sup>3</sup>) is te variëren van 0.25 s tot 1.7 s en in de studieruimte (28 m<sup>3</sup>) van 0.20 s tot 1.1 s. De luidheid is respectievelijk tussen 16.1 – 26.0 dB en 21.0 – 30.7 dB te variëren. Door het breedbandige karakter van de absorptiepanelen zal de nagalmtijd voor de verschillende frequentiebanden nagenoeg gelijk zijn. De ruimtelijkheid zal minder worden door toevoeging van de panelen en het klankbeeld zal egalier worden. Hierbij is wel van belang dat de panelen goed over de ruimte verdeeld worden. Relatief grote reflecterende vlakken geven in kleine ruimtes duidelijk hoorbare harde reflecties, die de instrumentale klanken ongewenst kleuren. Tevens zijn de staande golfpatronen, die bij kleinere volumes meer in het hoorbare gebied liggen, duidelijker aanwezig bij weinig absorptie en een slechte verdeling. De musici spreken over het 'blikkerig' en 'hol' klinken van een ruimte. In de uiteindelijke ruimtes van het Conservatorium worden de wanden ook nog scheef geplaatst ter vermijding van sterke resonanties en flutterecho's. Dit onderwerp viel buiten de doelstellingen van het huidige onderzoek.

Naast metingen aan verschillende opstellingen van de panelen is ook de invloed van de inrichting onderzocht. Door het toevoegen van meubilair zal het geluid diffuser verdeeld worden. Tevens voegen personen, instrumenten en meubilair absorptie toe aan de ruimte. Naar aanleiding van de metingen is een model opgesteld om het absorberend vermogen van de inrichting te schatten. Hierbij is uitgegaan van de wandafwerking en inrichting van de nieuwbouw van het Conservatorium van Amsterdam. Het model is afhankelijk van het vloeroppervlak van de betreffende ruimte:

$$y = 0,3 x + 1 \quad (1)$$

met:

y = hoeveelheid absorptie [m<sup>2</sup>]

x = vloeroppervlak van de ruimte [m<sup>2</sup>]

## DE SUBJECTIEVE TESTEN

In de testruimte van de kleine studieruimte is getest met studenten die drie akoestische varianten moesten beoordelen. Hierbij is een vragenlijst ingevuld om de subjectieve ervaring te koppelen aan de meetgegevens van de ruimte. Door docenten is vier weken lesgegeven in vier verschillende

akoestische milieus van de grotere lesruimte. Daarnaast heeft met de docenten een evaluatiegesprek plaatsgevonden en hebben er voor een aantal instrumenten nog extra testen plaatsgevonden om de gewenste akoestiek vast te stellen.

ruimte	aantal panelen		gewenste RT	
	studie	les	studie	les
Jazz-blazers (J)	9	16	0,24	0,48
Koperblazers (J)	8	13	0,27	0,55
Houtblazers (K)	5	11	0,38	0,61
Fluiten (K)	4	10	0,43	0,65
Snaarinstrumenten (K)	6	12	0,33	0,58
Piano (K/J)	8	14	0,27	0,52
Orgel (K)			0,45	0,75
Strijkers (K)	7	13	0,30	0,55
Elektrisch versterkt (J)	8	16	0,27	0,48
Contrabas (J)	8	16,5	0,27	0,47
Zang (K/J)	8	13	0,27	0,55
Slagwerk niet-melodisch (K/J)	10	20	0,22	0,40
Mallets (K)	6	12	0,33	0,58
Pauken (K)	10	21	0,22	0,39
Koperensemble (K/J)	11	21	0,21	0,39
Jazzcombo/Popband (J)	10	21	0,22	0,39
Klassiek ensemble (K)	9	15	0,24	0,50
Theorie algemeen (K/J)	6,2	15,3	0,32	0,49
Theorie solfège (K/J)	5	10	0,38	0,65

J = Jazz; K = Klassiek

Tabel 1: Gewenste akoestiek, uitgedrukt in de het aantal panelen. De nagalmtijd is daaruit afgeleid. De gegevens zijn per instrumentgroep voor studieruimte (28,2 m<sup>3</sup>) en lesruimte (106,1 m<sup>3</sup>).

Tabel 1 geeft een overzicht van de gewenste hoeveelheid panelen per instrumentgroep voor de twee testruimtes. Tevens is de nagalmtijd, zowel voor de studieruimte als voor de lesruimte, bij de gewenste configuraties berekend. De mondelinge toelichting op de voorkeuren van docenten en studenten zijn meegenomen in de omschrijving van de gewenste akoestiek.

De studenten is gevraagd om naast een algemeen cijfer voor de verschillende varianten, ook een beoordeling van de hoeveelheid galm, de luidheid, de ruimtelijkheid en het klankbeeld te geven. Voor drie trompetstudenten zijn de beoordelingen vergeleken. De belangrijkste eigenschap blijkt volgens de beoordeling: een prettig luidheidniveau. Voor een gewenst galmniveau mag de ruimte wat meer galm hebben. Voor een egalier klankbeeld is er juist meer absorptie gewenst. Dit maakt de luidheid in dit geval maatgevend.

De waarden uit tabel 1 pretenderen niet de ideale akoestiek te beschrijven, maar geven een indicatie voor de gewenste akoestiek, hier teruggerekend naar de nagalmtijd, voor verschillende instrumenten. Om de modellen voor de instrumentgroepen te optimaliseren, is er een grotere steekproef nodig. Testen moeten dan met meer participanten per instrumentgroep en bij meer verschillende volumes worden uitgevoerd.

## LOGARITMISCH MODEL

Voor concertzalen bestaan algoritmen om de gewenste nagalmtijd ( $RT$ ) voor een bepaald volume te beschrijven. Voor kamermuziekzalen beschreven Cremer en Müller de ideale nagalmtijd als volgt [2]:

$$\log RT = 0,138 \log V - 0,306 \quad (2)$$

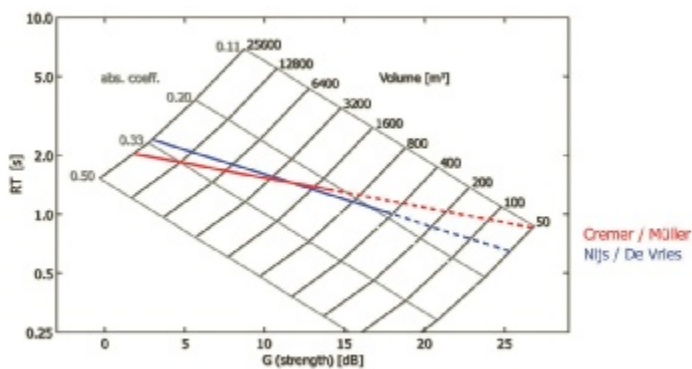
Het minimale volume van zalen waarop Cremer en Müller hun model baseren ligt op circa  $1000 \text{ m}^3$ . Nijs en De Vries ontwikkelden een hulpmiddel voor studenten bij het ontwerpen van concertzalen met volumes boven de  $400 \text{ m}^3$ . In *The young architect's guide to room acoustics* pasten zij de curve van Cremer en Müller aan [3]:

$$\log RT = 0,21 \log V - 0,55 \quad (3)$$

De aanpassing maakten zij om twee redenen. Ten eerste loopt de curve van Cremer en Müller niet door de rechthoek van Beranek. Deze rechthoek wordt gevormd door de grenzen voor de ideale concertzaalakoestiek die Beranek heeft gedefinieerd voor symfonieorkesten: een nagalmtijd ( $RT$ ) tussen 2.0 en 2.3 seconde en een luidheid ( $G$ ) tussen 4.0 en 5.5 dB.

Ten tweede wordt de gewenste absorptiecoëfficiënt bij extrapolatie naar kleinere zalen bij Cremer en Müller dermate laag, dat er slechts een klein publiek tot de concerten toegelaten zou kunnen worden.

Beide curven staan getekend in het  $G$ - $RT$ -diagram van figuur 1. Daarin staat horizontaal de luidheid gegeven en verticaal de nagalmtijd. De parameters zijn het volume en de gemiddelde absorptiecoëfficiënt van de ruimte. Het diagram illustreert ook dat de luidheid zeer hoog wordt bij kleine volumes.



Figuur 1: Beschrijving gewenste nagalmtijd voor zalen door Cremer en Müller en Nijs en de Vries in een  $G$ - $RT$ -diagram. De horizontale as geeft de luidheid, aangeduid met de Engelse term  $G$  (strength).

Over de precieze ligging van de ideale akoestiekcurve bij de kleine volumes van les- en oefenruimtes kan gediscussieerd worden. Indien het uitgangspunt voor het beschrijven van de gewenste akoestiek wordt gegeven door:

$$\log RT = a \log V + b \quad (4)$$

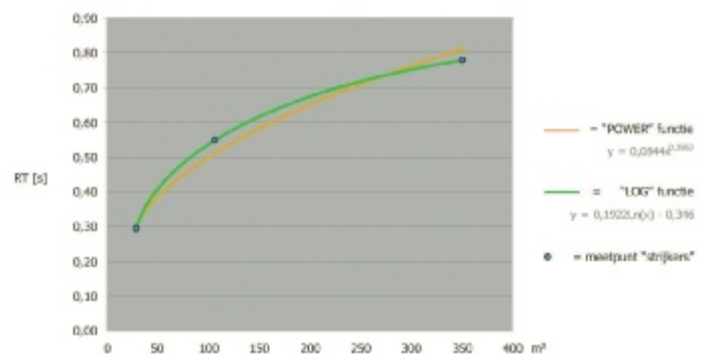
bepalen de constanten  $a$  en  $b$  verschillende muziekstijlen en randvoorwaarden. In het geval van het model voor de les- en oefenruimtes kunnen  $a$  en  $b$  de gewenste akoestiek voor de verschillende instrumentgroepen beschrijven. Met de data uit de testen op het conservatorium kunnen  $a$  en  $b$  voor de verschillende instrumentgroepen geschat worden.

In figuur 2 zijn voor de instrumentgroep strijkers drie meetpunten in grafiek gezet. De twee meetpunten aan de linkerkant corresponderen met de twee testruimtes. Het derde meetpunt is een referentiepunt voor een ruimte van  $350 \text{ m}^3$  in het huidige gebouw van het Conservatorium van Amsterdam. De akoestiek van deze ruimte is door een altviool-docente beschreven als een prettige lesakoestiek.

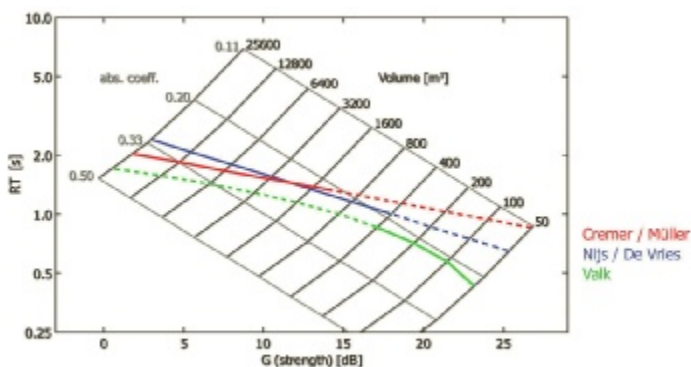
Het gebruikte model (4) is te omschrijven als een machtsfunctie (POWER) naast een enkelvoudige functie (LOG) getekend. De logaritmische curve beschrijft dan een nauwkeuriger curve door de drie meetpunten. De enkelvoudige log-functie kan dus als volgt worden geschreven:

$$RT = p \log V + q \quad (5)$$

Ook voor andere instrumentgroepen geeft een enkelvoudige logaritmische functie een betere beschrijving. Blijkbaar is de beschrijving van de gewenste akoestiek voor kleine ruimtes (tot  $400 \text{ m}^3$ ) anders dan voor grotere zalen. Om de verschillende modellen te vergelijken zijn in figuur 3 de modellen van Cremer en Müller, Nijs en De Vries en van dit onderzoek naast elkaar gezet. De curve van dit onderzoek beschrijft een gemiddelde van alle instrumentgroepen.



Figuur 2: Trendlijnen door drie meetpunten.



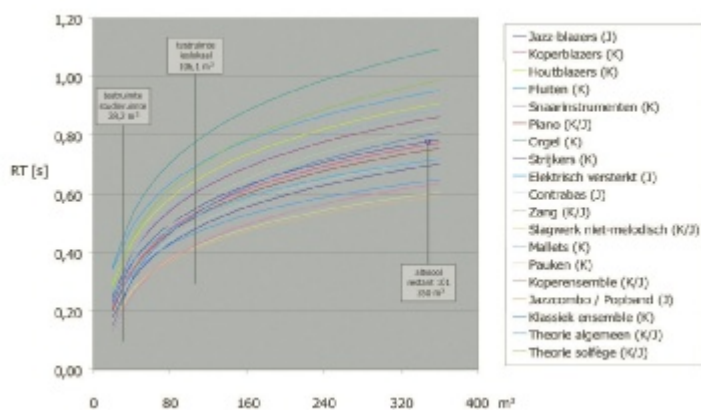
Figuur 3: Vergelijking verschillende modellen voor beschrijving van gewenste akoestiek in een G-RT-diagram.

Waar het voor de curves van Cremer en Müller en Nijs en de Vries de vraag is of deze geëxtrapoleerd mogen worden voor kleinere volumes, is het voor de curve van dit onderzoek de vraag of deze geëxtrapoleerd mag worden naar grotere volumes.

De curves van Cremer en Müller (2) en Nijs en de Vries (3) geven rechte lijnen. Doordat bij de curve van dit onderzoek niet  $\log RT$  maar  $RT$  wordt berekend uit  $a \log V + b$  is deze gekromd.

Boven de  $1600 \text{ m}^3$  ligt de lijn ongeveer evenwijdig aan de lijn van Cremer en Müller. Dat de lijn daar een iets kortere nagalmtijd voorschrijft, is te verklaren doordat de les- en oefenakoestiek wat confronterender, en dus droger, mag zijn dan een uitvoeringsakoestiek in zalen. Bij uitvoeringen in concertzalen is de ruimtelijkheid, het gevoel omspoeld te worden door de muziek, van een groter belang.

Hoe kleiner het volume van een ruimte wordt, hoe sterker de curve van dit onderzoek afbuigt. Dit is te verklaren door de invloed van de luidheid, die met een volumeafname een steeds sterkere rol gaat spelen. Het is kennelijk onaangenaam in een ruimte te musiceren waar het geluidniveau te hoog is. Er zal ten koste van de hoeveelheid galm meer geabsorbeerd moeten worden om de gewenste akoestiek te verkrijgen. Hierdoor zal de nagalmtijd relatief korter worden.



Figuur 4: De gewenste akoestiek, uitgedrukt in de nagalmtijd, voor verschillende instrumentgroepen.

Met de gegevens uit het onderzoek kan per instrumentgroep de curve getekend worden die de gewenste akoestiek omschrijft. Dat is gedaan in figuur 4. Op de horizontale as is het volume van een ruimte geplaatst en op de verticale as is de gewenste akoestiek uitgedrukt in de nagalmtijd.

Ondanks dat bovenstaande waarden en curves heel precies pretenderen te zijn, moet een aantal zaken niet uit het oog worden verloren. Zo is voor een volledig wetenschappelijke benadering van de curves meer onderzoek nodig. Ten eerste moeten meerdere musici bij het onderzoek betrokken worden om beter grip te krijgen op de verschillende instrumentgroepen. Bij een grotere steekproef kan de bandbreedte van de smaak tevens vastgesteld worden. Ten tweede heeft het de voorkeur te testen bij meerdere volumes. Dit levert meer meetpunten op om de curves mee te beschrijven. Ook zou naar de invloed van diffusie en de rol van een egaal klankbeeld gekeken kunnen worden.

Desalniettemin is er nog niet eerder een dergelijke differentiatie aangebracht voor verschillende instrumentgroepen en de opgestelde modellen leveren meer kennis dan voorheen op om de gewenste akoestiek voor te schrijven. De hiermee te bepalen akoestische milieus liggen ruimschoots in het comfortabele gebied en de differentiatie voor verschillende soorten instrumenten zorgt dat de ruimtes beter zullen voldoen aan de eisen van de gebruikers.

## LES- EN OEFENRUIMTES IN DE PRAKTIJK

Voor het Conservatorium van Amsterdam is er onderscheid gemaakt tussen de akoestische voorzieningen van de les- en oefenruimtes. Bij de lesruimtes zijn de verschillende lokalen gekoppeld aan verschillende instrumentgroepen, zoals deze uit het onderzoek naar voren zijn gekomen. Voor de studieruimtes is uit oogpunt van flexibiliteit een kleinere differentiatie aangebracht. Hier is naar aanleiding van het onderzoek geadviseerd drie akoestische milieus te creëren. Zowel voor de les- als de oefenruimtes bestaat de mogelijkheid na een semester aanpassingen te maken in de configuratie van de panelen. Bijvoorbeeld als er een ander instrument in een bepaalde lesruimte wordt geroosterd.

In veel conservatoria en muziekscholen is er niet de luxe om de akoestiek van lokalen aan bepaalde instrumentgroepen te koppelen. Ten koste van de wensen van de gebruikers, docenten en studenten van verschillende instrumentgroepen, zal er voor een ruimteakoestisch compromis gekozen moeten worden. Immers, zowel de harpdocent als de trombonedocent moet les kunnen geven in de ruimte. Om beiden tevreden te stellen kan hier het beste gebruik gemaakt worden van variabele akoestiek. Echter, met het oog op de kleine volumes van de lesruimtes komt eigenlijk alleen het variëren van de akoestiek door middel van het aanpassen van de hoeveelheid absorptie in aanmerking. Het veranderen van het volume en het variëren met behulp van elektro-akoestiek zijn niet geschikt in dergelijke kleine ruimtes. Systemen waar aan gedacht kan worden, zijn gordijnen, scharnierende panelen, draaibare elementen en schuifsystemen. Als het toepassen van variabele akoestiek niet haalbaar blijkt, is de enige overgebleven mogelijkheid te kiezen voor een gemiddelde

akoestiek. Deze over de verschillende instrumentengroepen gemiddelde akoestiek wordt het beste beschreven door:

$$RT_{muziekruijme} = 0,45 \log V - 0,36 \quad (6)$$

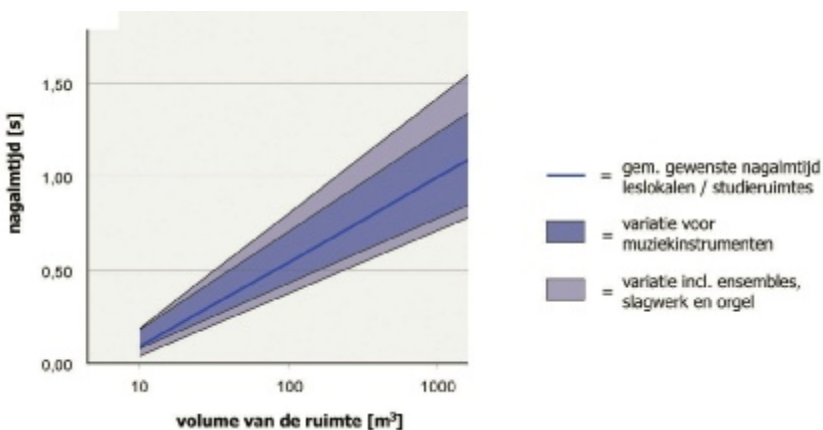
In figuur 5 is de nagalmtijd logaritmisch uitgezet tegen  $V$ . Tevens is het gebied aangegeven waarbinnen de nagalmtijd in ieder geval dient te liggen. Hier is onderscheid gemaakt tussen twee gebieden. Het binnenste gebied behelst de standaard muziekinstrumenten, terwijl in het ruimere gebied ook rekening is gehouden met de extremere akoestische milieus voor niet-melodisch slagwerk, orgel en ensembles. Vaak worden voor deze groepen namelijk wel afzonderlijke akoestische voorzieningen getroffen in conservatoria en muziekscholen. De grenzen van de gebieden zijn opgesteld aan de hand van de instrumentgroepen binnen het gebied. Voor de volumes wordt ervan uitgegaan dat de ruimtelijke verhoudingen tussen lengte, breedte en hoogte niet extreem worden gekozen.

De grenzen van de gebieden kunnen ook als goede basis gezien worden voor variabele akoestiek. Dat betekent dat voor een standaard leslokaal met een volume van  $100 \text{ m}^3$ , gevarieerd zou moeten kunnen worden tussen 0.43 en 0.71 seconde. Als er geen variabele akoestiek toegepast wordt, kan

het beste een ontwerp nagalmtijd van 0.54 seconde aangehouden worden. Echter, een jazzblazer zal deze akoestiek luid vinden en een fluitdocent zal de ruimte droog vinden. De vraag is hoe ver je moet gaan bij het afstemmen van de akoestische kwaliteit voor leslokalen op instrumenten. Het is niet zo dat de fluitdocent geen les kan geven in het standaard lokaal, maar ideaal is anders. Voor het nastreven van een hoge kwaliteit van de ruimteakoestiek is het dus aan te bevelen om instrumentgroepen te koppelen aan bepaalde lokalen of variabele akoestiek toe te passen. Een tussenoplossing kan nog zijn om minder differentiatie aan te brengen in de instrumentgroepen. Een aantal instrumentgroepen uit tabel 1 kan bijvoorbeeld samengevoegd worden. Zo kan er globaal aan de eisen van de verschillende docenten voldaan worden en is er toch meer flexibiliteit wat betreft de roostering mogelijk.

## REFERENTIES

- [1] L. Beranek, Concert and opera halls: how they sound (Acoustical Society of America, Woodbury, 1996)
- [2] L. Cremer en H. Müller, Principles and Applications of Room Acoustics (Applied Science, London, 1982)
- [3] L. Nijs en D. de Vries, The young architect's guide to room acoustics (Acoust. Sci. & Tech. 26, 2 (2005))



Figuur 5: Model voor gewenste akoestiek van algemene lesruimtes.