

MASTER

De grote zaal in het auditorium van de Technische Universiteit Eindhoven : een analyse van de akoestiek

Hak, J.P.M.; Hak, C.C.J.M.

Award date:
1987

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM VAN
DE TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN
— een analyse van de akoestiek —

november 1987

Eindrapport van het afstudeerwerk door:

J.P.M. Hak, fac. E

C.C.J.M. Hak, fac. B

Onder begeleiding van:

prof.dr.ir. W.M.G. van Bokhoven

ir. S.H. de Koning

prof.ir. P.A. de Lange

dr.ir. H.J. Martin

In de periode van:

januari 1987 t/m november 1987

SAMENVATTING

Naar aanleiding van klachten over de spraakverstaanbaarheid in de Grote Zaal van het Auditorium van de Technische Universiteit te Eindhoven, is een onderzoek ingesteld. Dit bestond enerzijds uit metingen ter karakterisering van de zaalakoestiek, en anderzijds uit literatuurstudies. De aandacht is hierbij vooral uitgegaan naar spraakverstaanbaarheid, terwijl tevens de mogelijkheid is bekeken om de zaal geschikt te maken voor kamermuziek.

Het is gebleken dat op plaatsen in het midden van de zaal, de spraakverstaanbaarheid verslechtert bij het inschakelen van de toespreekinstallatie. Dit is verklaard uit het daar overheersende galmveld. Voor de verbetering van de spraakverstaanbaarheid moet de luidspreker-configuratie worden aangepast. Voorts is gebleken dat door de zaalvorm, onder bepaalde condities, zodanige reflecties kunnen ontstaan, dat ook hierdoor de spraakverstaanbaarheid negatief kan worden beïnvloed. Hierbij moet worden gedacht aan de luidsprekerconfiguratie in combinatie met de absorptie c.q. verstrooiing van de wanden.

Voor kamermuziek is het achtergrond-geluiddrukkniveau in de zaal te hoog en de nagalmtijd te laag. Aanpassingen om de zaal geschikt te maken voor kamermuziek zijn nauwelijks uitvoerbaar.

Veel grootheden met betrekking tot de akoestiek van een ruimte kunnen worden afgeleid uit een set ruimte-impulsresponsies. Dit is mogelijk een uitgangspunt voor de ontwikkeling van universele en handzame meetapparatuur voor metingen in het veld.

SUMMARY

In consequence of complaints about the speech intelligibility in the hall, called "Grote Zaal" (transl.: Large Hall) of the Eindhoven University of Technology, an investigation has been made, that consisted on the one hand of measurements to characterise the hall acoustics and on the other hand of studies of literature. Most attention has been paid to speech intelligibility, while the possibility to make the hall suitable for chamber music has been investigated too.

It has been shown that on certain spots in the middle of the hall, the speech intelligibility deteriorates when the electronic reinforcement equipment is put into operation. This can be explained from the dominating reverberation field there. The loudspeaker configuration has to be adapted, so as to improve the speech intelligibility. Furthermore it has been proved that because of the shape of the hall, under certain circumstances speech intelligibility deteriorating reflections can be generated. Those circumstances are concerned with the loudspeaker configuration in combination with the wall absorption c.q. scattering.

For chamber music the background soundpressure level in the hall is too high, while the reverberation time is too short. Adaptations to make the hall suitable for chamber music will hardly be realizable.

Many measures in relation to the acoustics of a room can be deduced from a set of room impulse responses. This may be a starting-point for the development of universal and handy measuring equipment for measurements in the field.

VOORWOORD

Dit afstudeerproject heeft een boeiend en prettig verloop gehad dankzij de medewerking van een groot aantal personen. Op de eerste plaats denken we hierbij aan onze begeleiders, prof.dr.ir. W.M.G. van Bokhoven (vakgroep EEB, faculteit E), prof.ir. F.A. de Lange (vakgroep FAGO, faculteit B), ir. S.H. de Koning (elektro-akoestiek, Philips, Breda) en dr.ir. H.J. Martin (Laboratorium voor Akoestiek, faculteit B).

Niet alleen op het technische, maar ook op het organisatorische vlak is het project zeer leerzaam geweest (evaluaties, tussenrapporten, oriënterende gesprekken m.b.t. de Grote Zaal, samenwerking met de BTD). In dit verband willen we onze waardering uitspreken voor de inzet van het personeel van het auditorium: dhr. J.C. v.d. Boomen (technische dienst), die tevens de aanzet heeft gegeven tot dit project, dhr. J.M. Janssen (bedrijfsleiding), dhr. F. Seegers (technische dienst), en anderen. De goede samenwerking met de BTD kon tot stand komen dankzij de medewerking van dhr. A. Piso (bouwkundige revisie), dhr. H.A.P. Rooijmans (luchtbehandeling), dhr. J.C.C. v. Rooij (werkplaats), dhr. F. v. Hijnsbergen (werkplaats), dhr. G.C.M. v.d. Nieuwenhof (tekeningen), en anderen.

INHOUD

Hfdst.	Titel	Blz.
1	INLEIDING	1
2	ZAALAKOESTISCHE GROOTHEDEN	2
3	DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM	5
3.1	Omschrijving	5
3.2	Spraakverstaanbaarheid (RASTI)	8
3.3	Oorzaken RASTI-verlaging	8
3.3.1	Echo's	9
3.3.2	Achtergrondgeluid	11
3.3.3	Nagalm	14
3.4	Aanpassing voor kamermuziek	18
3.5	Conclusies en suggesties	19
4	IMPULSRESPONSIE EN AKOESTIEK	20
4.1	Inleiding	20
4.2	Ruimte-impulsresponsies	20
4.3	Toepassingen van impulsresponsies	21
4.4	Bepaling van impulsresponsies	25
4.5	Conclusies	27
5	REFERENTIES	31
	BIJLAGEN: INFORMATIE TUSSENRAPPORT 1	B1
	INFORMATIE TUSSENRAPPORT 2	B2
	INFORMATIE TUSSENRAPPORT 3	B3
	INFORMATIE TUSSENRAPPORT 4	B4
	INFORMATIE TUSSENRAPPORT 5	B5

1. INLEIDING

In het auditorium van de Technische Universiteit (TU) te Eindhoven is een aantal zalen ondergebracht, in de eerste plaats bestemd voor het geven van colleges. In enkele van deze zalen, in het bijzonder de 'Grote Zaal', vinden regelmatig activiteiten plaats op technisch, wetenschappelijk en cultureel gebied, waarbij ook belangstellenden van buiten de TU-gemeenschap vrije toegang hebben. Zo is deze zaal voor velen de eerste kennismaking met de TU ("visitekaartje").

De Grote Zaal wordt overwegend gebruikt voor spraakdoeleinden, zoals lezingen en colleges, waarbij 2 zaalconfiguraties worden toegepast. Reeds lange tijd bestaan er echter klachten over een slechte spraakverstaanbaarheid. Daarom is eertijds een nieuwe toespreekinstallatie aangebracht. Met deze elektro-akoestische installatie, in het vervolg aangeduid met ELA, kon echter de gewenste verbetering niet worden bereikt. Booy et al. (1982) vonden inderdaad, dat de spraakverstaanbaarheid gemiddeld niet toenam bij het inschakelen van de ELA. Of dit lag aan het slecht functioneren van de ELA was volgens hen een punt dat nader onderzoek verdiende. Hierop zal in dit verslag dan ook nader worden ingegaan.

In de Grote Zaal vinden ook wel muziekuitvoeringen plaats, zij het in relatief geringe mate. Er is nagegaan in hoeverre de zaal geschikt is voor kamermuziek, en wat theoretisch de mogelijkheden zijn om de zaal eventueel hiervoor geschikt te maken. Ook hierop zal nader worden ingegaan.

Met de ervaringen, opgedaan tijdens het onderzoek in de Grote Zaal, en een aanvullende literatuurstudie, is nagegaan wat de praktische waarde is van de ruimte-impulsresponsie als uitgangspunt voor de bepaling van de akoestiek in een ruimte. Hiervan zullen de belangrijkste bevindingen worden behandeld.

Het totale afstudeerwerk ligt gedetailleerd vast in een vijftal tussenrapporten. Dit eindverslag bestaat uit een samenvatting hiervan. Voor nadere informatie zal dan ook regelmatig naar bovengenoemde rapporten worden verwezen. In de bijlagen is aangegeven op welke plaatsen binnen de TU, exemplaren ervan aanwezig zijn.

2. ZAALAKOESTISCHE GROOTHEDEN

Teneinde een zaal objectief te kunnen beoordelen op de kwaliteit van de akoestiek, zijn in het verleden veel onderzoeken gedaan naar fysische parameters die verband hebben met psychofysische grootheden.

Een belangrijke parameter is b.v. de nagalmtijd, die samenhangt met de waargenomen nagalm in een ruimte. Nagalm ontstaat door zeer veel reflecties tegen wanden en objecten in de ruimte, en is sterk afhankelijk van de absorberende eigenschappen hiervan, en van het volume van de ruimte. Daar de absorberende eigenschappen van materialen in het algemeen frequentie-afhankelijk zijn, geldt dit ook voor de nagalmtijd. Deze kan bijvoorbeeld worden gemeten door een ruisbron in de ruimte in en uit te schakelen, terwijl hiervan elders in de ruimte een bandopname wordt gemaakt. Dit wordt herhaald op meerdere meetposities (om later over de resultaten te middelen). De zo geregistreeerde uitstervende ruissignalen kunnen vervolgens in het laboratorium worden geanalyseerd, waarbij wordt gelet op het verloop van het intensiteitsniveau van het opgenomen signaal. De nagalmtijd T_{60} is nu gedefinieerd als de tijd tussen 0 dB en 60 dB niveaudaling ten opzichte van het niveau vlak voor het uitschakelen van de bron. Daar een dynamisch bereik van 60 dB in de praktijk meestal moeilijk of niet haalbaar is bij een nagalmmeting, wordt T_{60} vaak benaderd met 2 maal de tijd tussen 5 dB en 35 dB niveaudaling. Een andere waardevol gebleken grootheid, die nauw met de nagalmwaarneming samenhangt, is de zg. Early Decay Time EDT. Deze is gedefinieerd als 6 maal de tijd tussen 0 dB en 10 dB niveaudaling. In het geval van de Grote Zaal met een inhoud van ca 2800 m² is voor spraak een nagalmtijd (T_{60}) tussen 0.8 s en 1.2 s gewenst; voor kamermuziek tussen 1.2 s en 1.4 s.

Het verband tussen de nagalmtijd, de absorptie-coëfficiënten van de aanwezige materialen en het volume van de ruimte, zoals dit door Sabine (1922) in een benaderende formule is vastgelegd, kan ook worden gebruikt om de absorptie van bepaalde materialen te bepalen. Hiervoor wordt het te onderzoeken object in een ruimte gebracht met akoestisch zeer harde wanden (galkamer). Uit de nagalmtijden met en zonder het object kan dan de absorptie hiervan worden berekend volgens:

$$\alpha A \approx 0.16 V (1/T_1 - 1/T_2) ,$$

waarin αA de absorptie [m² O.R.] van het object voorstelt, A de oppervlakte [m²] van het object, V het volume [m³] van de galkamer en T_1 en T_2 de nagalmtijd [s] met resp. zonder aanwezigheid van het object. De absorptiecoëfficiënt α is gedefinieerd als de absorptie per oppervlakte-eenheid.

Worden reflecties op het gehoor onderscheidbaar van elkaar, dan wordt gesproken van echo's. Tussen 2 parallelle wanden kunnen zg. flutterecho's ontstaan, die elkaar zeer regelmatig in de tijd opvolgen.

Een andere belangrijke grootte is het geluiddrukkniveau ter plaatse van een luisteraar, en afkomstig van de geluidbron. Deze grootte hangt samen met de waargenomen luidheid en kan b.v. worden gemeten met een speciaal voor dit doel bestemde geluiddrukkniveaumeter. Daar het geluiddrukkniveau naast frequentie- ook plaatsafhankelijk is, wordt deze meting meestal op een groot aantal posities in de ruimte uitgevoerd, om een indruk te krijgen van de geluidverdeling.

In een zaal zal behalve het gewenste geluid ook een achtergrondgeluid aanwezig zijn, b.v. afkomstig van een luchtbehandelingsinstallatie of het publiek. Het niveau ervan kan weer met een geluiddrukkniveaumeter worden gemeten.

Voor spraak is vooral de verhouding van de geluiddrukkniveaus van geluidbron resp. achtergrondgeluid (signaal/ruis-verhouding) op de luisteraarspositie van belang. Deze moet een minimale waarde hebben van ca 10 dB (Houtgast et al., 1980). Voor kamermuziek, waarbij stiltes ook als zodanig moeten worden waargenomen, is een zo laag mogelijk absoluut achtergrond-geluiddrukkniveau gewenst. Een richtwaarde is 30 dB(A).

Voor een objectieve bepaling van de spraakverstaanbaarheid is een methode ontwikkeld, die uitgaat van de modulatietransmissie van de spreker naar een luisteraar (Houtgast et al., 1973). Hierbij wordt een stem gesimuleerd door middel van intensiteitsgemoduleerde ruisbanden. Op de luisteraarspositie worden de modulatiereducties gemeten. Een modulatiereductie kan worden veroorzaakt door nagalm, achtergrondlawaai en/of echo's. Is $r(t)$ de intensiteit-impulsresponsie (gekwadrateerde geluiddruk-impulsresponsie) en $m(F)$ de modulatie diepte als functie van de modulatiefrequentie F ($0 < m < 1$), en wordt voor de nagalm een ideale exponentiële decay-curve aangenomen, van de vorm:

$$r(t) = C e^{-13.8t/T} ,$$

waarin T de nagalmtijd (EDT) is, dan kan voor de modulatie diepte van een ruisband worden afgeleid (Houtgast et al., 1978):

$$m(F) = \left[1 + (2\pi FT/13.8)^2 \right]^{-1/2} .$$

Indien er behalve nagalm ook nog achtergrondlawaai aanwezig is, moet bovengenoemde uitdrukking voor $m(F)$ worden vermenigvuldigd met de modulatie reductie m_n als gevolg van dit lawaai:

$$m_n = \frac{I_0}{I_0 + I_{noise}} ,$$

waarin I_0 de gemiddelde intensiteit van het bronsignaal is, en I_{noise} de intensiteit van de achtergrondruis. Voor een enkelvoudige echo met dezelfde intensiteit als het originele signaal geldt voor de intensiteit-impulsresponsie:

$$r(t) = C(\delta(t) + \delta(t-\tau)) ,$$

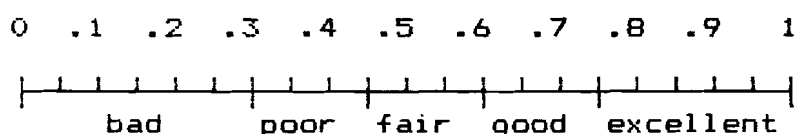
waarin $\delta(t)$ de Dirac delta-functie is, en τ de time delay van de echo t.o.v. het oorspronkelijke signaal. Voor $m(F)$ kan in dit geval worden afgeleid (Houtgast et al., 1978):

$$m(F) = \left[1/2 (1 + \cos 2\pi F\tau) \right]^{1/2} .$$

Een grootheid die uit de modulatietransmissie-functies is afgeleid, is de zg. STI (Speech Transmission Index, Houtgast et al., 1980). Hierbij worden 7 ruisbanden elk gemoduleerd met 18 verschillende frequenties. Van elke ruisband wordt voor elke modulatiefrequentie de modulatiereductie berekend. Uit de zo verkregen 126 modulatiereductie-waarden wordt de STI-waarde bepaald.

Een andere index voor de spraakverstaanbaarheid is de zg. Rapid STI (RASTI, Houtgast et al., 1984). Dit is een vereenvoudiging van de STI en de meting en berekening ervan vergen minder tijd. Voor de meting wordt gebruik gemaakt van een hiervoor ontwikkeld meetapparaat. Hierbij wordt de spreker met een kleine geluidbron gesimuleerd, door 2 100% intensiteit-gemoduleerde oktaafband-ruissignalen te produceren, nl. een band rond 500 Hz en een band rond 2 kHz. De 500 Hz band wordt gemoduleerd met 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz en 8 Hz. De 2 kHz band wordt gemoduleerd met 0.7 Hz, 1.4 Hz, 2.8 Hz, 5.6 Hz en 11.2 Hz. Het signaal van de bron wordt op verschillende plaatsen in de zaal gemeten, waarbij van beide ruisbanden de modulatie diepte per modulatiefrequentie wordt bepaald. Uit alle zo ontstane resultaten op een meetplaats wordt de RASTI berekend. Deze ligt tussen 0 en 1, waarbij een hogere waarde overeenkomt met een betere spraakverstaanbaarheid (zie tabel 1).

Tabel 1. RASTI versus mate van spraakverstaanbaarheid.



Opgemerkt dient te worden dat in het verleden is gebleken dat de beoordeling van de spraakverstaanbaarheid niet altijd eenduidig bij een zekere RASTI-waarde hoort (Booy et al., 1982). Wel is gebleken dat een verlaging resp. verhoging van de RASTI-waarde altijd gepaard gaat met een verlaging resp. verhoging van de spraakverstaanbaarheid.

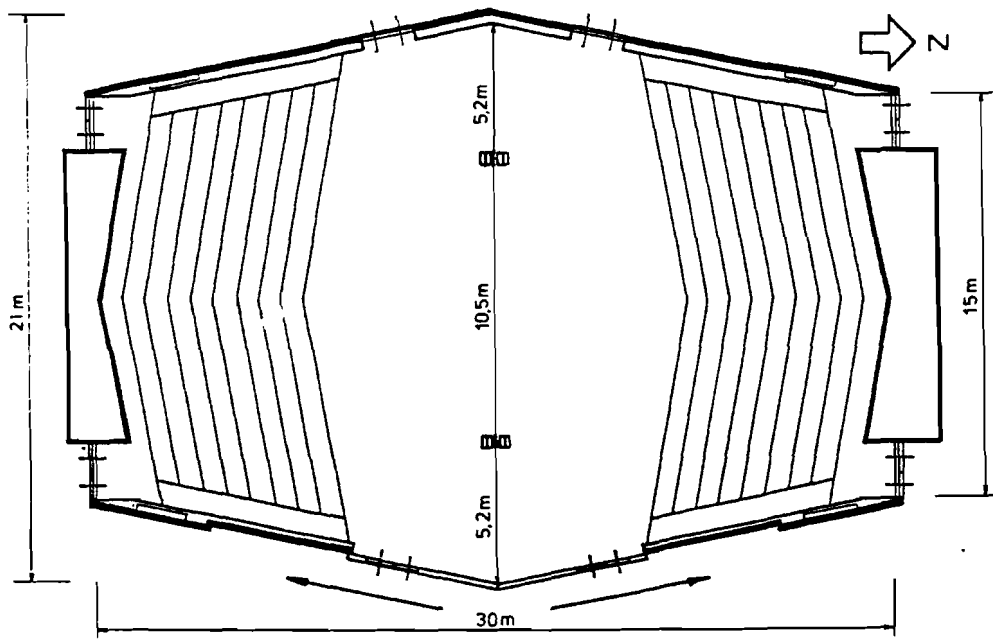
Andere zaalakoestische grootheden hebben betrekking op psychofysische grootheden als definitie, ruimtelijkheid en klankkleur, en worden nader gedefinieerd in hoofdstuk 4.

Voor details van de verschillende meetprocedures en genoemde grootheden zij verwezen naar bijlagen B2 t/m B5.

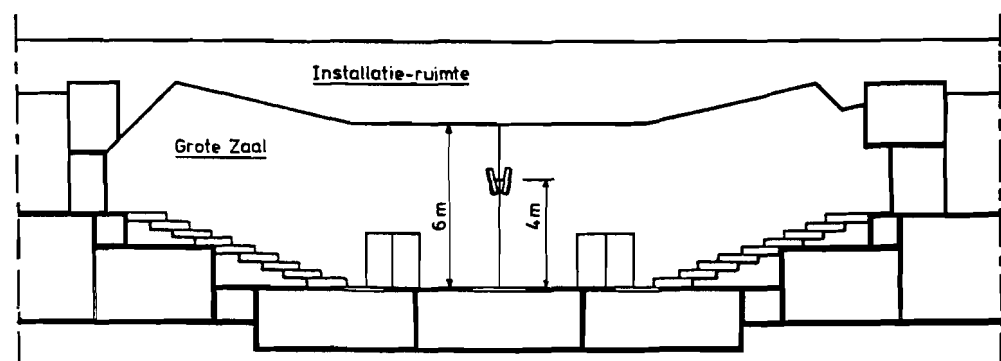
3. DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM

3.1 Omschrijving

De vorm van de Grote Zaal is afgeleid van een ruit (zie fig.1a). De zaalinhoud bedraagt ca 2800 m³. Het podium bevindt zich in het midden van de zaal en wordt aan weerszijden begrensd door oplopende stoelenrijen. Het plaatstalen plafond (stroken) bevindt zich op ca 6 m boven de vloer, en vormt de afscheiding tussen de zaal en de daarboven liggende installatieruimte. Deze ruimte, met een inhoud van ca 1000 m³, is voor het grootste gedeelte gevuld met kanalen ten behoeve van de luchtbehandeling in de Grote Zaal. De langswanden, waarvan er één voor een deel kan worden opengeschoven, zijn bekleed met geluidabsorberende panelen (nader omschreven in paragraaf 3.3.1). De dwarswanden zijn akoestisch hard. De zaal biedt plaats aan maximaal ca 675 personen. Een aantal van de gestoffeerde stoelen kan worden verplaatst of verwijderd, afhankelijk van de gekozen zaalopstelling. Alle voorkomende zaalopstellingen zijn samen te vatten in 2 hoofdconfiguraties, nl. de 'hele zaal opstelling' en de 'halve zaal opstelling', weergegeven in figuur 2. Bij de halve zaal opstelling wordt over de gehele zaalbreedte de ongebruikte zaalhelft door middel van een gordijn afgesloten. Dit gordijn is vervaardigd uit zeer lichte stof en heeft daardoor een verwaarloosbare invloed op de akoestiek. De 4 luidsprekerzuilen van de ELA hangen in het middengebied (podium) van de zaal, en zijn aangegeven in figuur 1 en 2. Hierbij zij nog opgemerkt, dat met de vervanging van de oude stoelen (juli '87), de stoelenrijen bij de halve zaal opstelling zijn uitgebreid tot onder de luidsprekerzuilen.

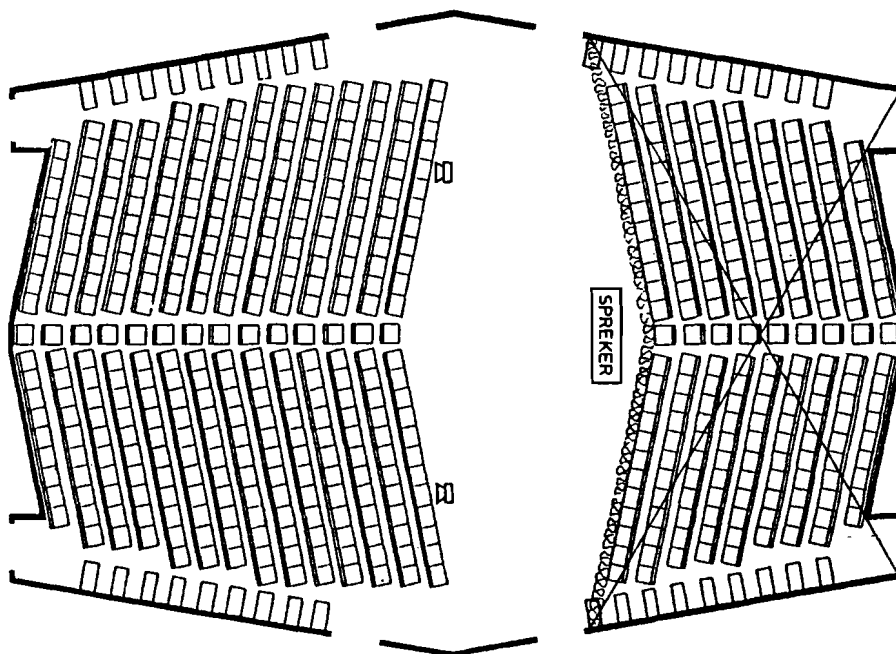


a) Horizontale doorsnede

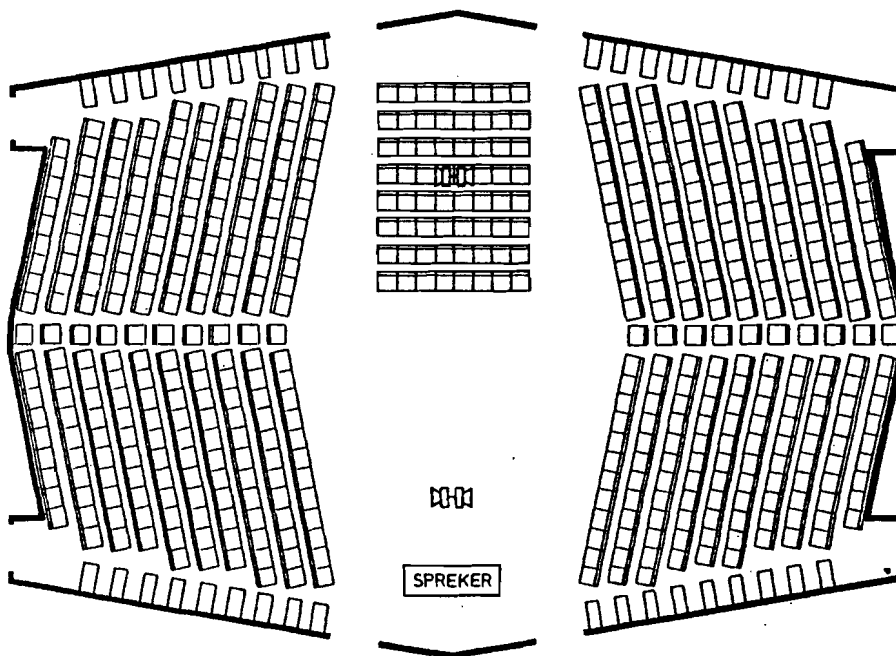


b) Langsdoorsnede

Figuur 1. Doorsneden Grote Zaal.



a) Halve zaal



b) Hele zaal

Figuur 2. Zaalconfiguraties.

3.2 Spraakverstaanbaarheid (RASTI)

Voor zowel de hele als de halve zaal configuratie is een RASTI-meting verricht op verschillende plaatsen. Dit is gedaan met de ELA uitgeschakeld en met de ELA ingeschakeld en ingesteld op de gebruikelijke manier. De RASTI-bron was ingesteld op 72 dB(A), overeenkomend met het niveau van een ervaren spreker. De resultaten voor de hele zaal opstelling zijn in tabel 2 weergegeven. Hierin zijn voor 2 gebieden in de zaal de RASTI-waarden gemiddeld.

Tabel 2. Gemiddelde RASTI-waarden in verschillende gebieden bij een hele zaal configuratie.

ELA	amfitheater	midden zaal
uit	0.64	0.61
aan	0.64	0.56

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat de spraakverstaanbaarheid gemiddeld niet toeneemt bij het inschakelen van de ELA, hetgeen in overeenstemming is met de eerdergenoemde conclusie van Booy et al. (zie hoofdstuk 1). De waarden komen volgens de schaal in tabel 1 overeen met een redelijke tot goede spraakverstaanbaarheid. Gezien de klachten, worden voor de Grote Zaal kennelijk andere subjectieve beoordelingscriteria gehanteerd. Daarom is een verhoging van de RASTI, die zeker zal leiden tot een verbetering van de spraakverstaanbaarheid, gewenst.

Voor details van de RASTI-meting zij verwezen naar bijlage B2.

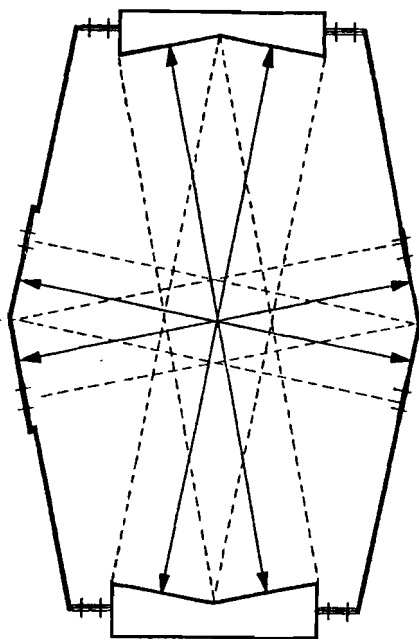
3.3 Oorzaken RASTI-verlaging

Om de spraakverstaanbaarheid te verbeteren, zullen zodanige wijzigingen in de zaal moeten worden aangebracht, dat op elke luisteraarspositie de RASTI-waarde zo hoog mogelijk is en zeker niet daalt bij het in werking stellen van de ELA. Het is dus van belang om te achterhalen welke factoren een bijdrage leveren aan een RASTI-verlaging. In hoofdstuk 2 is al aangegeven dat de RASTI kan worden verlaagd door echo's, achtergrondruis (een lage signaal/ruis-verhouding) en/of nagalm. Elk van deze verschijnselen is nader onderzocht, en de toegepaste methoden met de resultaten zullen hierna worden beschreven.

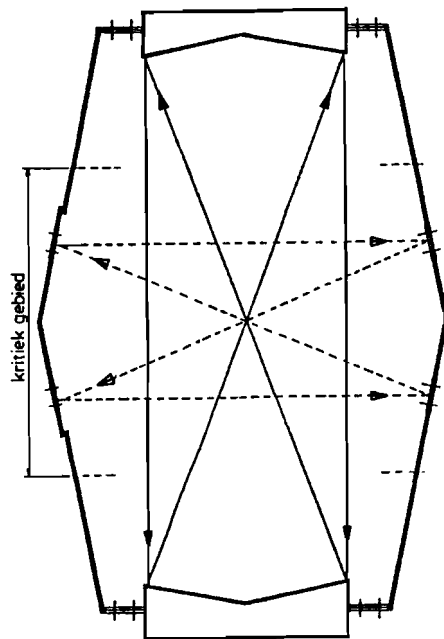
3.3.1 Echo's

In eerste instantie zijn op het gehoor echo's geconstateerd door ongeveer op de plaats van de luidsprekerzuilen in de handen te klappen. Hiermee is wel aangetoond dat (flutter-) echo's kunnen worden opgewekt, maar niet dat dit met de zuilen ook daadwerkelijk gebeurt, daar deze een heel andere richtkarakteristiek hebben dan de handen. Indien door de zuilen echter wel significante echo's worden veroorzaakt, dan zal dit zeer waarschijnlijk via de akoestisch harde achterwanden gebeuren, en zal bekleding hiervan met een absorberend materiaal, verhoging van de RASTI tot gevolg hebben. Nauwkeurige RASTI-metingen, waarbij de achterwanden al of niet waren bekleed, hebben echter aangetoond dat dit niet het geval is. In de huidige opstelling veroorzaken de luidsprekerzuilen derhalve geen significante echo's.

Dat er in een eventuele nieuwe opstelling problemen zouden kunnen ontstaan, wordt mede duidelijk gemaakt in figuur 3, waarin 2 soorten stralengangen zijn aangegeven. Deze hebben gemeenschappelijk dat geluid langs deze wegen na een minimum aantal reflecties op eenzelfde plaats terugkeert. Is het niveau van een gereflecteerde golf voldoende hoog (door geringe wandabsorptie), dan kan, als gevolg van de grote looptijdverschillen, door interferentie een significante modulatiereductie ontstaan (zie de uitdrukking voor de modulatiereductie als gevolg van een 'echo', op blz. 3). Problemen kunnen nu ontstaan, indien geluid op één van de in figuur 3 aangegeven wanddelen is gericht. Het is dus van belang dat de wanden op genoemde plaatsen weinig reflecterend zijn. Zoals eerder vermeld, is dit voor de achterwanden niet het geval. De langswanden zijn nader onderzocht.



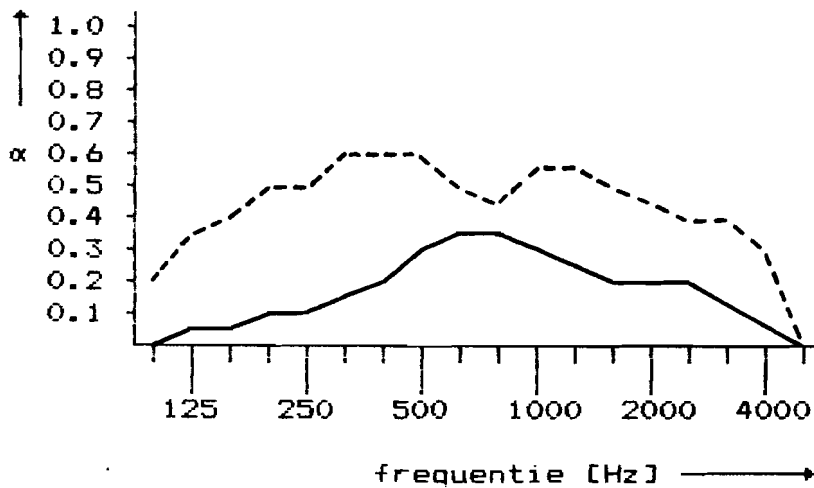
a) Parallel-reflecties.



b) Kruis-reflecties.

Figuur 3. Riskante reflecties.

De huidige langswand-afwerking bestaat uit met open jute omspannen geperforeerde triplex panelen van 1.58 m x 0.6 m. Deze hebben een dikte van 15 mm en zijn, met uitzondering van de panelen tegen de schuifwanden, aan de achterzijde voorzien van 1 cm mineraalwol (Estasillan). De afstand van de panelen tot de harde wand is niet voor elke plaats hetzelfde. Ter plaatse van de westwand is de luchtlaag nagenoeg overal ca 18 cm. De luchtlaag ter plaatse van de schuifwanden (oostzijde) is maar 1 cm dik. Mineraalwol is hier niet aangebracht. Op de plaats waar de schuifwand zich in geopende toestand bevindt, bedraagt de dikte van de luchtlaag ca 6 cm. Van de panelen zijn er 10 in een galmkamer doorgemeten op absorptie-eigenschappen. De Poriso achterwand is hierbij met behulp van zachtboard gesimuleerd. Voor 2 extreme gevallen is de absorptie als functie van de frequentie in figuur 4 weergegeven.



	afstand tot achterwand	spouwvulling	achterwand
-----	20 cm	mineraalwol	zachtboard
—————	7 cm	geen	beton

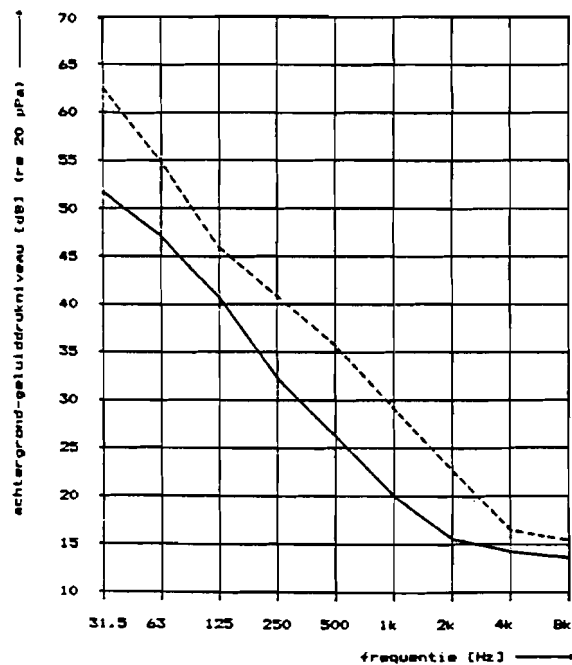
Figuur 4. Absorptiecoëfficiënt α als functie van de frequentie.

Er kan worden geconcludeerd, dat de langswand ter plaatse van de schuifdeuren (oostwand) akoestisch relatief hard is ten opzichte van de overige wanddelen, hetgeen met het oog op figuur 3 ongewenst is.

Voor details van de langswandconstructie zij verwezen naar bijlage B4 en voor details van de echo- en de wandabsorptie-metingen zij verwezen naar bijlage B5.

3.3.2 Achtergrondgeluid

Er zijn 2 belangrijke bronnen van achtergrondgeluid, nl. het publiek en de luchtbehandelinginstallatie van de zaal. Voor de verklaring van de RASTI-verlaging is het strikt genomen voldoende om de geluiddruk niveaus in de 500 Hz en de 2 kHz oktaafbanden in beschouwing te nemen, daar dit de enige frequentiebanden zijn die door de RASTI-ontvanger worden geanalyseerd. Het is echter gebleken dat er door de luchtbehandelinginstallatie geluiden worden opgewekt die wellicht in de genoemde frequentiebanden nauwelijks energie hebben, maar die de luisteraar mogelijk onbewust irriteren en afleiden. Gedoeld wordt op een rammelende lamel van een inblaasrooster, en een zeer laagfrequent geluid, dat meer als een druk op de oren dan als geluid wordt ervaren. Uit metingen van het geluiddruk niveau voor lage frequenties is opgemaakt, dat het waarschijnlijk gaat om constructietrillingen, geëxciteerd door de luchtbehandelinginstallatie, en dat deze trillingen liggen in het frequentiegebied van 10 tot 40 Hz. Het geluiddruk niveau, veroorzaakt door het publiek, is niet gemeten, maar er is een waarde uit de literatuur voor aangenomen van ca 45 dB(A). Voor de luchtbehandelinginstallatie is een geluiddruk niveau-curve gemeten als getekend in figuur 5. In het bijzonder voor de 500 Hz- en de 2 kHz-band gelden resp. geluiddruk niveaus van 36 en 23 dB.



- luchtbehandelinginstallatie uit (NR-23, 30 dB(A))
- luchtbehandelinginstallatie aan (NR-31, 38 dB(A))

Figuur 5. Achtergrond-geluiddruk niveaus.

Uit de figuur blijkt dat het achtergrondgeluiddrukkniveau uitsluitend met uitgeschakelde luchtbehandelinginstallatie nog net voldoet aan de in hoofdstuk 2 gestelde richtlijn van 30 dB(A).

Omdat de RASTI-waarde afhangt van de signaal/ruis-verhouding, is bovendien een geluidverdelingmeting uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van een luide spreker (ruisbron met een geluiddrukkniveau van 68 dB in elke frequentieband, overeenkomend met de geluidsterkte waarop het RASTI-apparaat bij de RASTI-meting was ingesteld). Voor de hele zaal configuratie zijn de resultaten in tabel 3 samengevat, waarbij de zaal weer is opgedeeld in 2 gebieden, en de gemeten geluiddrukkniveaus zijn gemiddeld over de verschillende luisteraarsposities, voor de oktaafbanden van 500 Hz en 2 kHz.

Tabel 3. Gemiddelde geluiddrukkniveaus [dB], met ervaren spreker ontvangen op luisteraarsposities bij hele zaal configuratie.

ELA	amfitheater		midden zaal	
	500Hz	2kHz	500Hz	2kHz
uit	51	47	57	54
aan	63	58	66	61

Bij de RASTI-meting was geen publiek aanwezig, zodat voor de signaal/ruis-verhoudingen, ontvangen door het RASTI-apparaat, de waarden gelden als gegeven in tabel 4.

Tabel 4. Gemiddelde signaal/ruis-verhoudingen [dB], met ervaren spreker ontvangen op luisteraarsposities bij hele zaal configuratie en zonder publiek.

ELA	amfitheater		midden zaal	
	500Hz	2kHz	500Hz	2kHz
uit	15	24	21	31
aan	27	35	30	38

Opgemerkt dient te worden dat tabellen 2 en 3 slechts een ruwe indicatie van de situatie geven. Er kan, met de uitdrukking voor de modulatie reductie mn op pagina 3, uit worden opgemaakt dat de signaal/ruis-verhoudingen allemaal zo groot zijn, dat ze nagenoeg geen invloed op de RASTI-waarde zullen hebben. Bovendien neemt in het midden van de zaal de signaal/ruis-verhouding toe bij het inschakelen van de ELA, terwijl de RASTI-waarde juist afneemt. Dat de ELA toch noodzakelijk is voor een voldoende grote signaal/ruis-verhouding, volgt uit het feit dat het geluiddruk-niveau dat het publiek produceert, groter is dan dat van de luchtbehandelinginstallatie (naar schatting gemiddeld ca 40 dB per oktaafband). Bovendien zijn er ook zwakke sprekers, waarvoor bij het RASTI-apparaat een sterkte van 57 dB(A) is aangenomen. In het geval van een gemiddelde spreker (65 dB(A)) worden dan signaal/ruis-verhoudingen gevonden als gegeven in tabel 5.

Tabel 5. Gemiddelde signaal/ruis-verhouding [dB], met gemiddelde spreker ontvangen op luisteraarsposities bij hele zaal configuratie en met publiek.

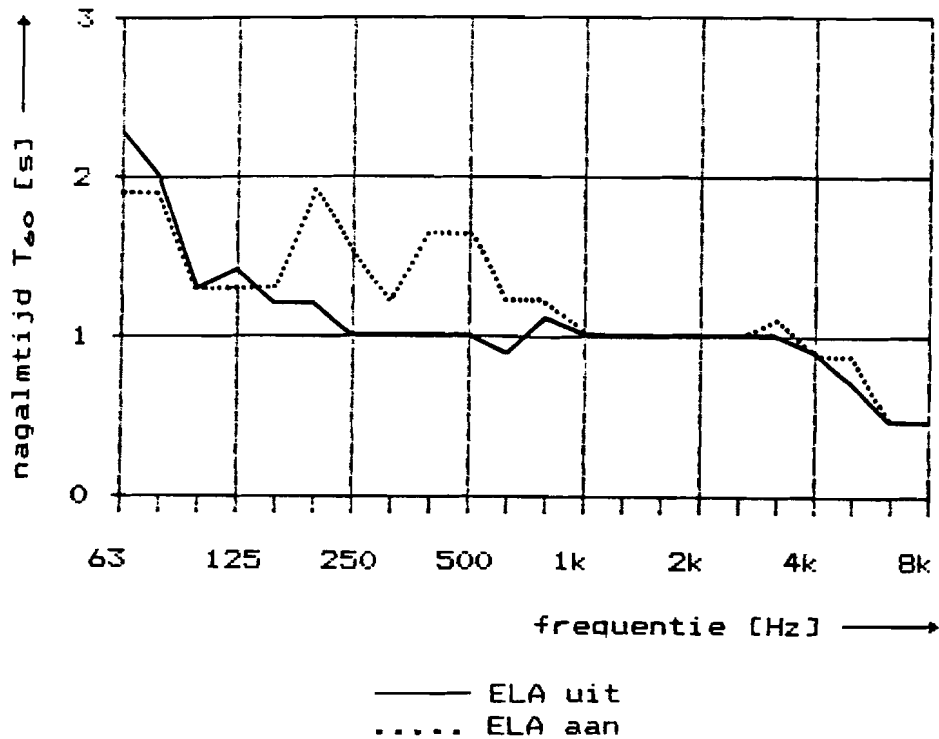
ELA	amfitheater		midden zaal	
	500Hz	2kHz	500Hz	2kHz
uit	4	0	10	7
aan	16	11	19	14

De signaal/ruis-verhoudingen zijn nu deels kleiner dan 15 dB en zullen, vooral met uitgeschakelde ELA, RASTI-verlagend zijn. Dergelijke resultaten zijn ook voor andere dan de hier genoemde frequentiebanden gevonden.

Voor details van de achtergrond-geluiddruk-niveaumetingen in het audiogebied zij verwezen naar bijlagen B2 en B3, voor details van de laagfrequent achtergrond-geluiddruk-niveaumetingen en de geluidverdelingmetingen zij verwezen naar bijlage B4.

3.3.3 Nagalm

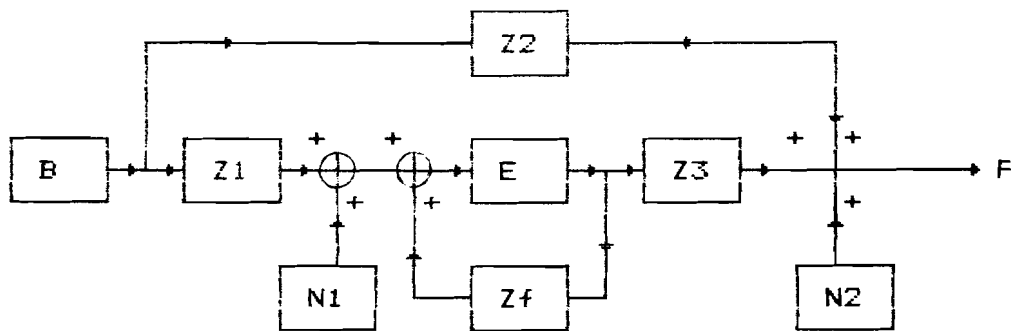
In de zaal zijn op verschillende plaatsen de nagalmtijden gemeten en gemiddeld. Voor de hele zaal opstelling is het resultaat weergegeven in figuur 6.



Figuur 6. Nagalmtijden.

In het belangrijkste frequentiegebied bedraagt de nagalmtijd met uitgeschakelde ELA dus ca 1 s, hetgeen voor spraak goed is. Opvallend is de sterke toename van de nagalmtijd bij 200 en 500 Hz, indien de ELA wordt ingeschakeld. Tijdens de meting was dit hoorbaar als uitstervende tonen na het uitschakelen van de ruisbron. De ELA, die op de gebruikelijke manier was ingesteld, was kennelijk bijna aan het oscilleren ('rondzingen'). Overigens kan nog worden opgemerkt dat de nagalmtijd tussen 250 Hz en 4 kHz in aanwezigheid van publiek ca 0.1 s lager is gebleken.

Voor een nadere beschouwing van het oscillatieverschijnsel, is in figuur 7 het systeem bestaande uit de Grote Zaal, de ELA, een bron (b.v. een spreker) en een luisteraarspositie P, schematisch weergegeven. Alle aangegeven verbindingen hierin zijn akoes-



Figuur 7. Schematische voorstelling zaalsysteem.

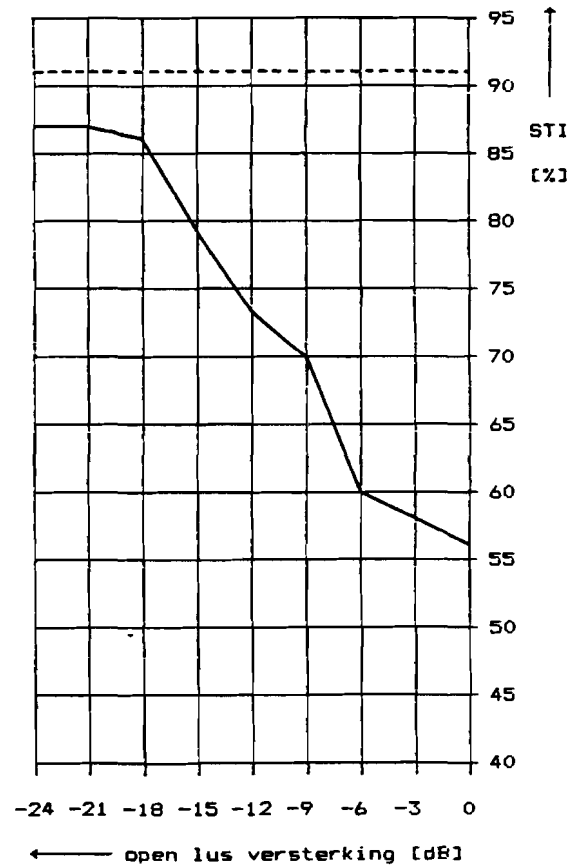
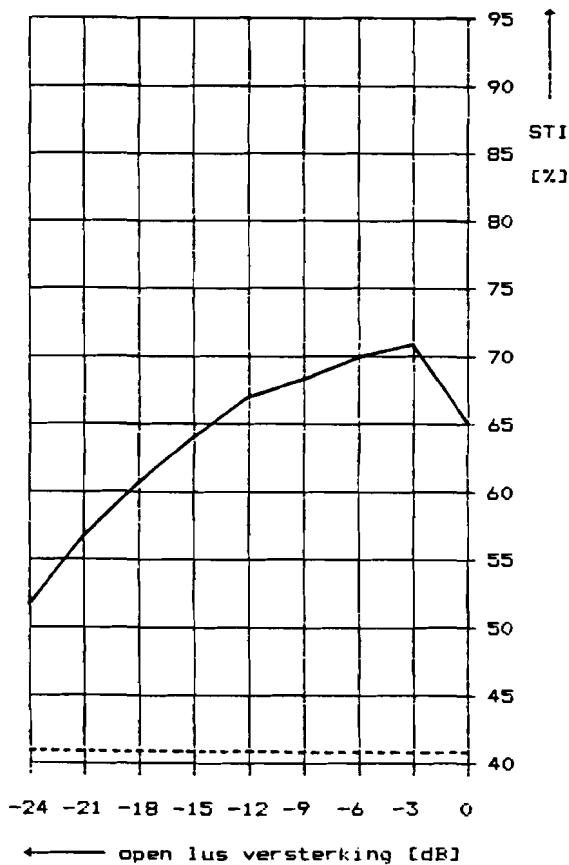
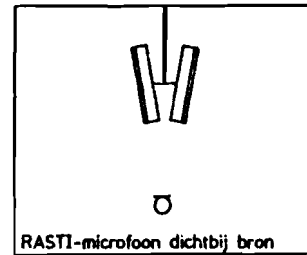
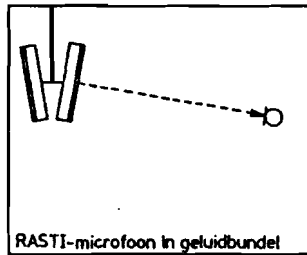
tisch. B is het door de bron geproduceerde geluid, E is de overdrachtsfunctie van de mikrofoon naar de luidsprekerzuilen en N is het achtergrondgeluid. Z staat voor een akoestische overdrachtsfunctie. Zf representeert de overdrachtsfunctie van de zuilen terug naar de ELA-mikrofoon (feedback). Voor het subsysteem, bestaande uit E en Zf, kan als overdrachtsfunctie $H_e(j\omega)$ worden genoteerd:

$$H_e(j\omega) = \frac{E}{1 - EZf(j\omega)}$$

Hierin stelt EZf de zg. open lus karakteristiek voor. Wordt deze gelijk aan 1, dan zal $|H_e|$ oneindig groot worden en het genoemde subsysteem gaan oscilleren. Dit treedt dus op indien $|EZf|=1$ en $\arg(EZf)=2k\pi$, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Indien er een frequentiegebied is waarvoor $|EZf| > 1$, dan zal hierin wellicht een frequentie zijn waarvoor aan genoemde voorwaarden wordt voldaan, vanwege de grote hoeveelheid staande golven in de zaal. Het is daarom van belang om, teneinde rondzingen te voorkomen, te eisen dat $|EZf|$ voor elke frequentie kleiner is dan 0 dB. E veroorzaakt nagenoeg geen fasedraaiing en kan worden geregeld met de mengtafel. Zf is afhankelijk van de zaal en de positie van de luidsprekerzuilen hierin, en kan dus niet zonder meer worden veranderd. E moet voldoende groot zijn om de luisteraars de juiste geluidsterkte aan te kunnen bieden, maar klein genoeg om rondzingen te voorkomen. Ter controle is de amplitude-karakteristiek van de open lus $|EZf(j\omega)|$ gemeten, waarbij de ELA juist op rondzingen was ingesteld. Van de honderden pieken kwamen er slechts 2 net boven de 0 dB-grens, wat de genoemde eis ter voorkoming van rondzingen ($|EZf(j\omega)| < 0$ dB voor alle ω) ondersteunt. Beide pieken lagen in een frequentiegebied rond 500 Hz, overeenkomend met de rondzingfrequentie van de ELA (zie bijlage B4).

Het zich tijdens de nagalmmeting manifesteren van uitstervende tonen ('galmstaarten') met ingeschakelde ELA, heeft doen vermoeden dat dit verband zou hebben met de RASTI-verlaging bij het inschakelen van de ELA. De galmstaarten zouden, net als 'norma-

le' galm, een modulatiereductie teweeg kunnen brengen. Dit verschijnsel is nader onderzocht door de RASTI-meting uit te voeren voor verschillende instellingen van de open lus versterking, op verschillende posities in de zaal. Als referentiewaarde van 0 dB versterking is de 'rondzinggrens' gekozen. Voor een tweetal meetposities is het resultaat in figuur 8 weergegeven. Hierin is de stippellijn steeds de RASTI-waarde bij uitgeschakelde ELA.



Figuur 8. RASTI als functie van open lus versterking voor verschillende posities. De stippellijnen geven de RASTI bij uitgeschakelde ELA weer.

Beide curven vertonen een dalend verloop bij het naderen van de 0-dB grens, hetgeen er op duidt dat een zo groot mogelijke versterking, ingesteld op grond van het net niet rondzingen, zeker niet zal leiden tot een maximale spraakverstaanbaarheid. De zo gecreëerde kunstmatige nagalm (door de galmstaart) gaat dan kennelijk een rol spelen bij de RASTI-verlaging. Vlak voor de bron neemt de RASTI reeds bij zeer lage versterking af. Dit kan als volgt worden verklaard. Vlakbij de bron is de RASTI weliswaar zeer hoog, maar de bronsterkte is zo klein, dat reeds bij lage versterking de invloed van de ELA merkbaar wordt. Deze produceert op die plaats echter een lagere RASTI. De zwakker gemoduleerde ruisbanden afkomstig van de ELA gaan fungeren als stoorlawaai bij de sterk gemoduleerde ruisbanden afkomstig van de bron, ofwel: de lagere RASTI van de ELA gaat de hoge RASTI van de bron op die plaats overwoekeren. Dat de ELA een lagere RASTI produceert (ca 0.6 t.o.v. 0.9 van de bron alleen) is te verklaren uit de in hoofdstuk 2 gegeven uitdrukking voor de modulatie-reductie bij aanwezigheid van alleen nagalm. Wordt in deze formule de nagalmtijd van ca 1 s (geldig voor beide oktaafbanden) ingevuld, dan volgt een RASTI van ca 0.6. Omdat voor de RASTI in feite de EDT van belang is, zal deze nagalmtijd pas werkelijk optreden, indien onder de zuil een galmveld heerst. In zo'n veld geldt een EDT van 1 s, omdat een direct veld afwezig is. Kennelijk heerst onder de zuilen dus een galmveld.

Voor details van de nagalmmetingen zij verwezen naar bijlagen B2 en B3, voor details van de open lus meting zij verwezen naar bijlage B4, en voor de meting van de RASTI als functie van de open lus versterking zij verwezen naar bijlage B5.

3.4 Aanpassing voor kamermuziek

In hoofdstuk 2 zijn reeds 2 belangrijke zaalakoestische criteria voor kamermuziek genoemd, te weten:

- Het achtergrond-geluiddrukkniveau mag niet meer bedragen dan 30 dB(A).
- De nagalmtijd moet een waarde tussen 1.2 s en 1.4 s hebben.

In paragraaf 3.3.2 is een achtergrond-geluiddrukkniveau gevonden van 30 dB(A) met uitgeschakelde luchtbehandelinginstallatie, en 38 dB(A) met deze installatie ingeschakeld. Gezien de moeite die men in het verleden al heeft gedaan om dit achtergrondgeluid terug te dringen (van ca 47 dB(A) tot 38 dB(A)), is het niet waarschijnlijk dat dit zonder kostbare ingrepen verder kan worden verlaagd (zie bijlage B1 t/m B3).

In paragraaf 3.3.3 is een gemiddelde nagalmtijd (T60) van ca 1 s gemeten, die derhalve te laag is voor kamermuziek. Omdat de zaal overwegend wordt gebruikt voor spraak, is het verstandig om de nagalmtijd niet hoger te kiezen dan 1.2 s. Uit praktische overwegingen zullen voor een verhoging van de nagalmtijd uitsluitend de wanden kunnen worden aangepast. Voor de theoretische gevallen van volledig absorberende en volledig reflecterende wanden zijn nagalmtijden afgeleid, zowel voor een volledige zaalbezetting als zonder publiek (zie tabel 6). Hierbij is gemiddeld over de oktaafbanden van 500 Hz, 1 kHz en 2 kHz (zie bijlage B5).

Tabel 6. Theoretische nagalmtijden [s] voor extreme wandcondities.

absorptie coëfficiënt	volledige bezetting	zonder publiek
0	0.8	1.5
1	0.5	0.8

Uit de tabel kan worden opgemerkt dat voor een volledige zaalbezetting niet aan de gestelde eisen kan worden voldaan. Voor een geringere bezetting kan hieraan wel worden voldaan, indien alle wanden akoestisch hard worden uitgevoerd. De nagalmtijd zal dan echter wel sterk afhangen van de bezettingsgraad. Eventuele omzeiling van de reflectiewegen, zoals aangegeven in figuur 3, kan dan niet worden bewerkstelligd door middel van sterk absorberende vlakken, maar vereist het toepassen van verstrooiing.

3.4 Conclusies

De spraakverstaanbaarheid in de Grote Zaal neemt niet toe, en in het midden van de zaal zelfs af, bij het inschakelen van de ELA. Dit kan worden verklaard uit het dan overheersende gelmveld op de betreffende luisteraarsposities.

Ondanks de klachten over de spraakverstaanbaarheid, heeft de gemeten RASTI een waarde, waaraan in de literatuur een subjectieve beoordeling wordt toegekend van 'redelijk' tot 'goed'.

In de zaal zijn door de 'tweevoudige ruitvorm' reflectiewegen aanwezig, die kunnen leiden tot modulatie-interferentie en daardoor verslechtering van de spraakverstaanbaarheid.

Eén van de 2 voorwaarden waaraan moet worden voldaan om van bovengenoemde reflectiewegen hinder te ondervinden is, dat de dwarswanden en/of bepaalde delen van de langswanden sterk reflecteren. Hieraan wordt voor de dwarswanden volledig en voor de langswanden ten dele voldaan.

De andere voorwaarde voor hinder van de bovengenoemde reflectiewegen is, dat de aanwezige luidsprekerzuilen zo zijn geconfigureerd, dat het geluid deze reflectiewegen volgt. Dit is nu niet het geval.

Het achtergrond-geluiddrukkniveau, voornamelijk veroorzaakt door de luchtbehandelinginstallatie, is te hoog voor het uitvoeren van kamermuziek (zonder elektro-akoestische ondersteuning). Met ingeschakelde ELA is de bijdrage van het achtergrondgeluid tot de verslechtering van de spraakverstaanbaarheid niet significant.

De nagalmtijd (T60) bedraagt gemiddeld ca 1 s, hetgeen voor spraak goed is, maar voor kamermuziek te laag.

Met betrekking tot de RASTI is een optimale open lus versterking van de ELA te vinden. In de huidige situatie bedraagt deze ca 6 tot 9 dB onder de 'rondzinggrens'.

Met de huidige luidspreker-configuratie is het niet mogelijk om elke plaats te voorzien van een goede verhouding tussen de niveaus van direkt en diffuus geluid. Dit geldt m.n. voor het middengebied van de zaal. Met een verticale openingshoek van 16 graden (voor 2 kHz) kunnen de zuilen, zoals ze nu hangen (4 m boven de vloer), nooit voldoen.

Praktisch is het niet haalbaar om de zaal geschikt te maken voor kamermuziek-uitvoeringen.

4. IMPULSRESPONSIE EN AKOESTIEK

4.1 Inleiding

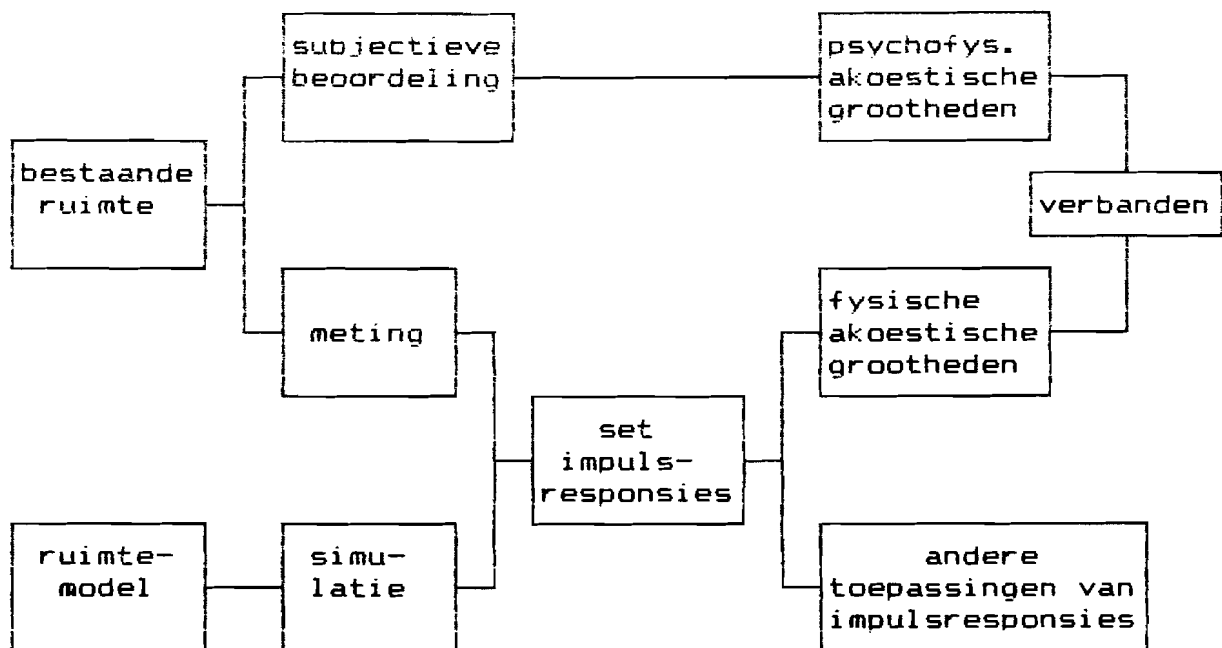
Van alle bekende grootheden die de akoestiek van een zaal beschrijven, is slechts een klein deel gemeten in de Grote Zaal. Elke meting vergt haar eigen, vaak vrij uitgebreide apparatuur, wat in het veld niet handig is. Een groot deel van de (vaak nachtelijke) meettijd wordt in beslag genomen door uit- en inpakken, opstellen en afbreken van de meetopstellingen. Het zou daarom handiger zijn, als meerdere metingen konden worden gecombineerd tot één meting, zodat minder verschillende opstellingen nodig zouden zijn. De meeste metingen worden verricht in afwezigheid van publiek, in verband met het vaak storende karakter van een meting (luide ruisbron, enz.). Toch zijn de zaaleigenschappen in aanwezigheid van publiek vaak van meer belang.

Naar aanleiding van het bovengenoemde is een literatuurstudie gedaan naar ruimte-impulsresponsies. Hierbij is gelet op de mogelijke toepassingen en de bepaling van zulke impulsresponsies.

4.2 Ruimte-impulsresponsies

Wordt in een ruimte door een bron een geluiddruk-impuls gegenereerd, dan is de gemeten responsie op een ontvangerspositie, elders in de ruimte, karakteristiek voor de overdracht van de bron naar de ontvanger in die ruimte. Dit gegeven doet vermoeden dat het mogelijk moet zijn om een ruimte, m.b.t. de akoestiek, met een set van impulsresponsies grotendeels te beschrijven. Een dergelijke set kan dan worden opgevat als een compacte tussenform van akoestische informatie: uit de beschrijving van de ruimte kan een set impulsresponsies worden afgeleid door metingen in een bestaande ruimte of door simulatie m.b.v. een model hiervan, waarna akoestisch relevante fysische grootheden uit deze set kunnen worden afgeleid. Een fysische grootheid wordt in dit verband akoestisch relevant genoemd, indien deze voldoende nauw samenhangt met één of meer psychofysische grootheden, die een rol spelen in de subjectieve beoordeling van de akoestiek.

Om de plaats van de impulsresponsie binnen het totale studiegebied van de akoestiek te verduidelijken, is in figuur 9 een overzicht gegeven van de verschillende studies. Uit subjectieve beoordelingen van bestaande ruimten kunnen psychofysische grootheden worden afgeleid. Uit metingen in deze ruimten kunnen fysische grootheden worden afgeleid die min of meer samenhangen met de psychofysische grootheden. De uit de metingen verkregen akoestische informatie kan b.v. bestaan uit een set van impulsresponsies. Deze kan ook worden verkregen uit simulaties van ruimtemodellen. Tenslotte kunnen impulsresponsies ook voor andere toepassingen worden gebruikt, zoals die, waarbij de fijnstructuur van een impulsresponsie van belang is.



Figuur 9. Verbanden tussen studiegebieden akoestiek.

4.3 Toepassingen van impulsresponsies

Wordt een impulsresponsie b.v. op een scherm zichtbaar gemaakt (reflectogram), dan kan deze visueel worden beoordeeld op b.v. aankomsttijden van vroege reflecties (eerste 40 à 200 ms). Pogingen om subjectieve karakteristieken te relateren aan de visuele impulsresponsie zijn in het verleden echter grotendeels mislukt (Barron, 1984). Een fundamenteel probleem hierbij is dat de visuele natuur van de impulsresponsie sterk afhankelijk is van de bron-ontvanger afstand. In het algemeen is deze afhankelijkheid niet gerelateerd aan een subjectieve responsie, wat de bruikbaarheid van de impulsresponsie als indicator beperkt.

Wel waardevol gebleken objectieve grootheden zijn gerelateerd aan geïntegreerde energie. Hiervan is in tabel 7 een overzicht gegeven. Hierin geldt:

$$\epsilon(t) = \int_0^t p^2(\tau) d\tau \qquad e(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau$$

waarin $p(\tau)$ de instantane impulsresponsie-geluiddruk op tijdstip τ voorstelt (Nishi, 1986; Bradley, 1986).

Tabel 7. Uit impulsresponsie afgeleide akoestische grootheden.

GROOTHEID	DEFINITIE	CORR. PSYCHOL. FACTOR
Reverberation Time	$RT = 2(t_2 - t_1)$ <p>met:</p> $e(t_1)/e(0) = -5 \text{ dB}$ $e(t_2)/e(0) = -35 \text{ dB}$	Reverberance
Early Decay Time (Atal et al., 1965)	$EDT = 6 \times t_3$ <p>met:</p> $e(t_3)/e(0) = -10 \text{ dB}$	Reverberance
Early/Late Sound Ratio (Reichardt et al., 1981; Lochner et al., 1964)	$D = \frac{\epsilon(t_0)}{e(t_0)}$ <p>met: $t_0 = 35 \text{ ms}$ of: $t_0 = 50 \text{ ms}$ of: $t_0 = 80 \text{ ms}$</p>	Definition, Clarity Clearness, Speech Intelligibility
Center Time (Schwerpunktzeit) (Strøm, 1982)	$TS = \frac{1}{e(0)} \times \int_0^{\infty} \tau p^2(\tau) d\tau$	Definition, etc.
Sound Transmission Index	<p>Af te leiden van de Modulation Transfer Function $m(\omega) = m(2\pi F)$ (Schroeder, 1981)</p> $m(\omega) = \frac{\int_0^{\infty} p^2(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau}{e(0)}$	Speech Intelligibility

vervolg: zie volgende pagina

Tabel 7. Uit impulsresponsie afgeleide akoestische grootheden (vervolg).

GROOTHEID	DEFINITIE	CORR. PSYCHOL. FACTOR
Stationary Energy	ENG = e(0)	Loudness
Lateral Component of Early Energy	$LC = \int_0^{2\pi} \epsilon(\tau, \psi) \cos\psi d\psi$ <p>met:</p> <p>ψ = hoek tussen meet-richting en verbindingslijn van oren luisteraar.</p> <p>$\epsilon(\tau, \psi)$ = $\epsilon(\tau)$ m.b.t. richting ψ</p>	Spaciousness, Room Impression
Front/Back Early Energy Ratio	$FB = \frac{\int_{\text{front}} \epsilon(\tau, \psi) \sin\psi d\psi}{\int_{\text{back}} \epsilon(\tau, \psi) \sin\psi d\psi}$ <p>ψ = hoek tussen meet-richting en verbindingslijn van oren luisteraar.</p> <p>$\epsilon(\tau, \psi)$ = $\epsilon(\tau)$ m.b.t. richting ψ</p>	Localizations to the Front

vervolg: zie volgende pagina

Tabel 7. Uit impulsresponsie afgeleide akoestische grootheden (vervolg).

GROOTHEID	DEFINITIE	CORR. PSYCHOL. FACTOR
Low/Mid Frequency Stationary Energy Ratio	$L = \frac{e(O,LF)}{e(O,MF)}$ $M = \frac{e(O,MF)}{e(O,MF)}$ <p>$e(O,LF) = e(O)$ m.b.t. lage freq.</p> <p>$e(O,MF) = e(O)$ m.b.t. middenfreq.</p>	Tonal Color
High/Mid Frequency Stationary Energy Ratio	$H = \frac{e(O,HF)}{e(O,MF)}$ $M = \frac{e(O,MF)}{e(O,MF)}$ <p>$e(O,HF) = e(O)$ m.b.t. hoge freq.</p> <p>$e(O,MF) = e(O)$ m.b.t. middenfreq.</p>	Tonal Color

De fysische grootheden vertonen onderling een sterke correlatie, evenals de psychofysische grootheden (Nishi, 1986).

Wordt onder een zekere conditie een ruimte-impulsresponsie van een bron naar een ontvangerspositie gemeten, dan kan hiermee de invloed van de ruimte op de overdracht van bron naar ontvanger worden geëlimineerd. Dit kan worden bewerkstelligd door de inverse van de impulsresponsie te convolueren met het ontvangen signaal, dat bestaat uit een willekeurig bron-sigitaal, 'beïnvloed' door de ruimte. Indien dit onder dezelfde als de eerdergenoemde conditie gebeurt, zal het resultaat van deze convolutie het oorspronkelijke bron-sigitaal zijn (Mourjopoulos, 1985). In het algemeen blijkt de impulsresponsie van een ruimte te veranderen met b.v. het wijzigen van de positie van bron, ontvanger of andere aanwezige voorwerpen, of met het openen van deuren of ramen. Hiermee dient bij dergelijke toepassingen, waarin de fijnstructuur van de impulsresponsie van belang is, rekening te worden gehouden. Opgemerkt dient te worden dat vergelijkbare veranderingen in de impulsresponsie gewoonlijk niet worden waargenomen in de akoestische kwaliteit van een ruimte.

4.4 Bepaling van impulsresponsies

Er zijn diverse methoden om een ruimte-impulsresponsie te bepalen. Eerder is al een onderverdeling gemaakt in enerzijds meting in een bestaande ruimte en anderzijds simulatie van een ruimte m.b.v. een model (zie figuur 9).

Bij het meten van een impulsresponsie zijn positie, oriëntatie en eigenschappen van bron en ontvanger van belang voor de interpretatie van het resultaat. Wordt voor de eenvoud en de snelheid van de meting een omnidirectionele bron gekozen, dan is het belangrijk dat dit geldig is voor alle relevante frequenties (althans in een zekere mate), daar correctie voor een richtgevoelige bron achteraf niet mogelijk is. De meest directe methode om een impulsresponsie $h(t)$ te meten, is het genereren van een impuls $\delta(t)$ en het meten van de responsie $y(t)$ elders in de ruimte. Hiervoor geldt:

$$y(t) = \delta(t) * h(t) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-\tau)h(\tau)d\tau = h(t) ,$$

waarin $*$ de convolutie-operator voorstelt. De impuls $\delta(t)$ is de Dirac delta funktie, waarvoor geldt:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & , t = 0 \\ 0 & , \text{anders} \end{cases} \quad \text{en} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1 .$$

De impuls duurt dus oneindig kort en heeft een oneindig hoge waarde voor $t=0$, en moet derhalve worden benaderd. Gebeurt dit met de funktie $\delta^*(t)$, dan geldt voor de dan gemeten responsie $y^*(t)$:

$$y^*(t) = \delta^*(t) * h(t) .$$

Het is nu mogelijk om uit te gaan van $\delta^*(t)$ als ingangssignaal, $y^*(t)$ te meten, en $h(t)$ te berekenen door $y^*(t)$ te deconvolueren met $\delta^*(t)$. Minder nauwkeurig, maar eenvoudiger is het, om de deconvolutie achterwege te laten, en $h(t)$ te benaderen volgens:

$$h(t) \approx y^*(t) .$$

De hierin gemaakte fout is des te kleiner naarmate $\delta^*(t)$ beter op een impuls lijkt. De verschillende technieken om een pulsief signaal op te wekken hebben ieder hun voor- en nadelen. Een vonkbrug is omnidirectioneel, maar niet goed reproduceerbaar.

Dit laatste geldt ook voor een pistoolschot en een exploderende ballon. Met gebruik van een luidspreker is wel een goede reproduceerbaarheid te verkrijgen, maar de luidspreker is niet omnidirectioneel. Een algemeen probleem bij het opwekken van pulsieve signalen is het bereiken van een voldoende groot dynamisch bereik voor alle frequenties, i.v.m. de achtergrondruis. In de praktijk komt dit o.a. neer op het genereren van oorverdovende knallen, en het toepassen van grote luidsprekers en vermogensversterkers die ongemakkelijk zijn voor metingen in het veld. Een ander algemeen probleem betreft de energieverdeling over de verschillende frequenties. Zo produceert een vonkbrug voor lage frequenties relatief weinig energie.

Ondanks het voordeel dat de methoden met de benaderende impuls eenvoudig zijn en in principe met weinig apparatuur kunnen worden toegepast, hebben genoemde nadelen geleid tot onderzoek naar andere methoden. De grondgedachte hierbij is dat de vereiste akoestische energie over een langere tijd moet worden 'uitgesmeerd', zodat het benodigde vermogen beperkt kan blijven. De zuivere impulsresponsie moet dan worden berekend uit de hieruit gemeten responsie. Deze methode is niet wezenlijk anders dan de bovengenoemde deconvolutiemethode, maar het uitgangspunt is nu niet meer een pulsief ingangssignaal. Zo kan een sweeptoon als ingangssignaal worden gebruikt. Ook kunnen stochastische signalen worden toegepast. Wordt in de ruimte een ruisbron geplaatst met bronsignaal $n(t)$, dan kan voor het elders in de ruimte gemeten signaal $y(t)$ worden genoteerd:

$$\psi_{ny}(t) = \psi_{nn}(t) * h(t) .$$

Hierin is ψ_{ny} de kruiscorrelatiefunctie van n en y :

$$\psi_{ny}(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} n(\tau) y(\tau-t) d\tau$$

en ψ_{nn} de autocorrelatiefunctie van n :

$$\psi_{nn}(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} n(\tau) n(\tau-t) d\tau .$$

In de praktijk moeten de correlaties uiteraard worden benaderd. Voor een ruimte-impulsresponsie zal de limiet moeten worden vervangen door vaste integraalgrenzen, met T in de grootteorde van enkele seconden. Het is nu mogelijk om voor n een willekeurig ruissignaal te kiezen, waarin elke gewenste frequentie voldoende sterk vertegenwoordigd is, en $h(t)$ door deconvolutie te berekenen.

Indien echter n zodanig wordt gekozen dat geldt:

$$\psi_{nn}(t) = \delta(t) ,$$

waarin $\delta(t)$ de Dirac deltafunctie voorstelt, dan kan de uitdrukking voor $\psi_{ny}(t)$ worden vereenvoudigd volgens:

$$\psi_{ny}(t) = \delta(t) * h(t) = h(t) .$$

Ten behoeve van de veel toegepaste tijddiskrete signaalverwerking is het geschikt om de parameter t te vervangen door k , met $k = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$:

$$h(k) = \psi_{ny}(k) .$$

Een voorbeeld van een signaal dat aan het gestelde criterium voldoet, is witte ruis. In tegenstelling tot het amplitudespectrum van een pulsief signaal als benadering voor de impuls, kan dat van witte ruis wel goed onder controle worden gehouden, en is dit spectrum hetzelfde als dat van een zuivere impuls (constante amplitude als functie van de frequentie). Omdat de excitatie langer duurt, komt er tevens meer energie in het systeem, waardoor bij gelijk ingangsvermogen en gelijke meettijd de dynamiek een faktor \sqrt{N} verbetert, waarin N de lengte van het ruissignaal (eigenlijk: de ruissequence) is, ofwel $k = 0 \dots N$. In de praktijk zal N een waarde hebben in de grootteorde van 10.000 tot 100.000.

In plaats van witte ruis kan ook 'pseudo random noise' worden toegepast, met als autocorrelatiefunctie weer een deltafunctie. Een dergelijk signaal is echter volledig deterministisch. Wordt nu over M gemeten responsies gemiddeld, alle verkregen onder gelijke condities en met hetzelfde pseudo random noise inputsignaal, dan zullen de bijdragen van de ruimte-impulsresponsie coherent optellen, maar de bijdragen van het achtergrondgeluid incoherent, wat weer leidt tot een verbetering van de signaal/ruis verhouding met een faktor \sqrt{M} . Op deze wijze is het mogelijk om de impulsresponsie in een ruimte te meten, zonder dat aanwezig iets van de meting merken, door met een zeer laag inputvermogen (laag bronniveau) de meting vele malen te herhalen. Hierbij mogen de akoestische eigenschappen van de ruimte niet te veel in de tijd veranderen, b.v. door weglopende personen.

Een methode waarbij de impulsresponsie wordt verkregen uit de simulatie van een ingevoerd model van een ruimte, is de zg. Finite Sound Ray Integration methode. Deze is gebaseerd op de geometrische akoestiek.

4.5 Conclusies en suggesties

- De ruimte-impulsresponsie als uitgangspunt voor de beschrijving van de akoestiek vormt een voorlopig theoretische, maar brede basis met veel toepassingsmogelijkheden.

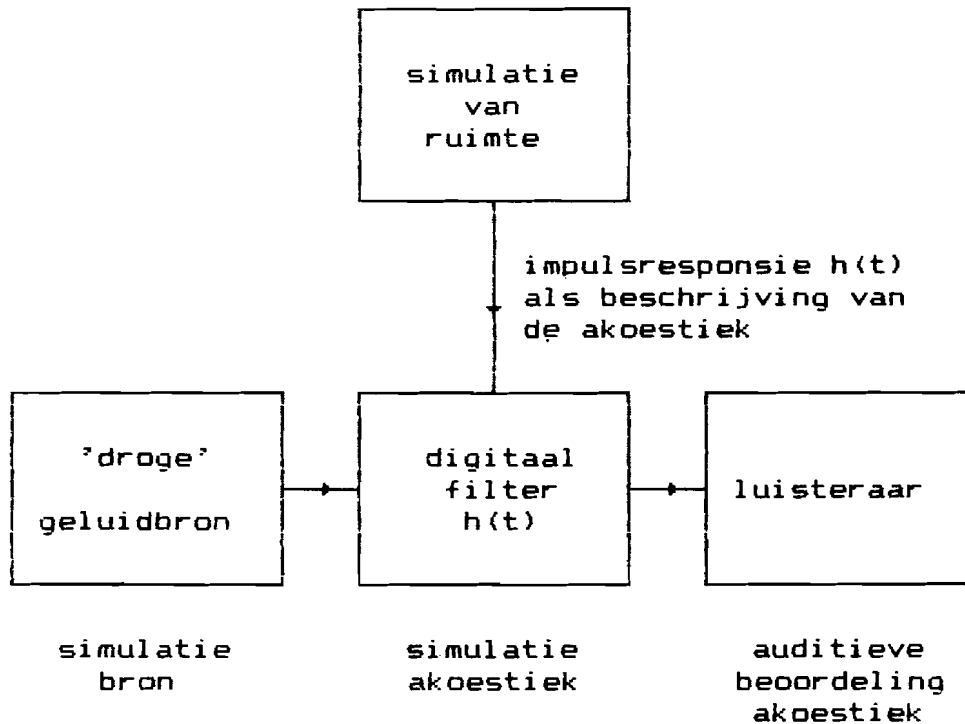
- De tot nu toe (i.e. oktober 1987) meestbelovende techniek om een impulsresponsie te meten lijkt de methode, waarbij een enkele pseudorandom sequence met een 'wit' spectrum wordt toegepast, in combinatie met een kruiscorrelatie-berekening.
- Uit de impulsresponsie kunnen fysische akoestisch relevante parameters worden afgeleid (d.w.z. samenhangend met psychologische parameters).
- Er is, betreffende de akoestiek, nog veel te ontwikkelen op het gebied van ruimte-simulatie.
- Argumenten voor of tegen bepaalde methoden kunnen door de ontwikkeling van de techniek later ongeldig worden. Rekeningtijden worden korter, geheugens worden goedkoper en meetapparatuur wordt steeds minder omvangrijk.

Ofschoon kruiscorrelatiemetingen met de huidige technieken goed uit te voeren zijn met b.v. personal computers, geïnstalleerd op de werktafel, is het waarschijnlijk toch belangrijk om te streven naar een directe berekening tijdens meting in het veld. Voor de metende persoon levert dit dan een directe terugmelding op over de meting. De persoon in kwestie kan min of meer zien of de meting is gelukt en onmiddellijk conclusies aan de resultaten verbinden, b.v. omtrent het nut van de gekozen meetpositie of de volgende te kiezen zinvolle positie. Dit kan wellicht een verbetering opleveren van de efficiëntie waarmee de kostbare meettijd in het veld wordt gebruikt. De resultaten kunnen in het veld worden zichtbaar gemaakt in de vorm van nagalmtijden en andere uit de impulsresponsie afgeleide, direct interpreteerbare, grootheden (al of niet tegen de frequentie uitgezet in de vorm van een curve). De opslag van de resultaten kan echter geschieden in de vorm van impulsresponsies (evt. na compressie), om later in het laboratorium verder en nauwkeuriger te worden uitgewerkt.

Eén en ander is uiteraard slechts zinvol, indien de berekening van de genoemde resultaten voldoende snel kan geschieden, daar anders het effect van een directe terugmelding verloren gaat. Aangezien de impulsresponsie van een gemiddelde zaal ca 1.5 s duurt, en het belangrijkste deel van het te meten audiogebied beneden de ca 10 KHz ligt (de samplefrequentie is dan minimaal ca 20 KHz), bedraagt het aantal datapunten van de te berekenen impulsresponsie in de orde van 20.000 tot 40.000. Dit zal voor het genoemde doel op dit ogenblik wellicht te veel rekentijd kosten, indien gebruik zou worden gemaakt van een machine die niet veel te groot en/of kostbaar is.

Bij gebruik van een pulsief inputsignaal is wel onmiddellijk een (benadering van de) impulsresponsie voorhanden, en zijn bovengenoemde suggesties over de terugmelding beter uitvoerbaar, zij het met de nadelen van een ongecontroleerde energieverdeling, een minder grote dynamiek, etc. (zie paragraaf 4.4).

De impulsresponsie kan wellicht ook worden gebruikt voor de koppeling tussen twee simulatiesystemen. Zo kan in één systeem een ruimte worden gesimuleerd, teneinde voor een luisteraarspositie de impulsresponsie te verkrijgen. Het andere systeem kan dan bestaan uit een audiofilter, dat de berekende impulsresponsie zelf aanneemt, en zodoende de akoestiek voor de betreffende positie simuleert (zie figuur 10).



Figuur 10. Auditieve beoordeling gesimuleerde akoestiek.

Wordt nu een 'droog' bronsignaal op de filteringang aangelegd, dan is op de filteruitgang het geluid te horen, zoals dit op de betreffende luisteraarspositie in de zaal hoorbaar zou zijn. Het model kan nu b.v. naar believen worden veranderd, totdat het gewenste resultaat is bereikt. Op deze wijze zou een ruimte, qua akoestiek, reeds tijdens de simulatieprocedure kunnen worden beoordeeld op een wijze, waarop deze na de realisering van de ruimte uiteindelijk door de gebruikers zal worden beoordeeld. Er dient echter wel het volgende te worden opgemerkt:

- het is verre van eenvoudig is om een ruimte als een bruikbaar model in een computer in te voeren (complex en tijdrovend). In het algemeen zal dit leiden tot verandering van de fijnstructuur van de, uit de simulatie verkregen, impulsresponsie. Hetzelfde kan worden opgemerkt voor de simulatie met akoestische schaalmodellen. Daar de meeste subjectieve grootheden gerelateerd zijn aan geïntegreerde energieën, waarbij de fijnstructuur minder belangrijk is, zal dit voor de bepaling van deze grootheden weinig problemen opleveren.

- het "naar believen wijzigen" van het model zal veel bouwakoestisch inzicht en ervaring vereisen, omdat het onmogelijk is om alle mogelijkheden 'uit te proberen'.
- Het beluisteren van een gesimuleerde ruimte d.m.v. een koptelefoon in het laboratorium is zeker niet hetzelfde als het beluisteren van dezelfde ruimte, doch gezeten op een stoel in die ruimte en met de ogen op het podium gericht. Het staat echter dichter bij de uiteindelijke praktijk dan het bekijken van een tabel en zal wellicht sprekender zijn.

Ook kan deze methode van belang zijn voor het onderzoek m.b.t. de psychologische akoestische parameters. Voor meerdere bronnen op verschillende posities in de zaal (orkestopstellingen, etc.) zijn uiteraard meer impulsresponsies vereist, en evenredig meer audiofilters.

Voor een uitgebreidere uiteenzetting van de bovengenoemde bevindingen met literatuurverwijzingen in de tekst zij verwezen naar bijlage B5.

5. REFERENTIES

(RA)STI

T. Houtgast and H.J.M. Steeneken, The modulation transfer function in room acoustics as a predictor for speech intelligibility, *Acustica*, 28 (1973), 67-73.

T. Houtgast and H.J.M. Steeneken, Applications of the modulation transfer function in room acoustics, Institute for perception TNO, report nr. IZF 1978-20.

T. Houtgast, H.J.M. Steeneken, and R. Plomp, Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. I. General room acoustics, *Acustica*, 46 (1980), 60-72.

R. Plomp, H.J.M. Steeneken, and T. Houtgast, Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. II. Mirror image computer model applied to rectangular rooms, *Acustica*, 46 (1980), 73-81.

H.J.M. Steeneken and T. Houtgast, A physical method for measuring speech-transmission quality, *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, (1980), 318-326.

M.R. Schroeder, Modulation transfer functions: definition and measurement, *Acustica*, 49 (1981), 179-182.

T. Houtgast and H.J.M. Steeneken, A multi-language evaluation of the RASTI-method for estimating speech intelligibility in auditoria, *Acustica*, 54 (1984), 185-199.

T. Houtgast and H.J.M. Steeneken, A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria, *Journal of the Acoustical Society of America*, 77 (1985), 1069-1077.

Ruimte-impulsresponsie

C.F. Eyring, Reverberation time in "dead" rooms, *Journal of the Acoustical Society*, jan. 1930, 217-241.

H. Haas, Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache, *Acustica*, 1 (1951).

R. Thiele, Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räume, *Acustica*, 3 (1953), 291-302.

- R.K. Cook, R.V. Waterhouse, R.D. Berendt, S. Edelman, and M.C. Thompson, Measurement of correlation coefficients in reverberant sound fields, *Journal of the Acoustical Society of America*, 27 (1955), 1072-1077.
- E. Meyer and R. Thiele, Raumakustische Untersuchungen in zahlreichen Konzertsalen und Rundfunkstudios unter Anwendung neuerer Messverfahren, *Acustica*, 6 (1956), 425-444.
- E. Meyer and W. Burgtorf, Über die Zeitabhängigkeit der Schallrichtungsverteilung in Räumen bei impulsartiger Anregung, *Acustica*, 7 (1957), 313-324.
- E.G. Richardson and E. Meyer, Technical aspects of sound, Volume III, Elsevier Publishing Company, New York, 1962.
- J.P.S. Lochner and J.F. Burger, The influence of reflections on auditorium acoustics, *Journal of Sound and Vibration*, 1 (4) (1964), 426-454.
- B.S. Atal, M.R. Schroeder, and G.M. Sessler, Subjective reverberation time and its relation to sound decay, *Proceedings of the 5th ICA*, Liege, Paper G32 (1965).
- M.R. Schroeder, New method of measuring reverberation time, *Journal of the Acoustical Society of America*, 37 (1965), 409-412.
- L.B. Preizer, Statistics of high level reflections in auditoriums, *Soviet Physics Acoustics*, 11 (1966), 407-411.
- E.D. Nelson and M.L. Fredman, Hadamard spectroscopy, *Journal of the Optical Society of America*, 60 (1970), 1664-1669.
- A.J. Berkhout, Least-squares inverse filtering and wavelet deconvolution, *Geophysics*, 42 (1977), 1369-1383.
- M. Barron, The Gulbenkian Great Hall, Lisbon, II: an acoustic study of a concert hall with variable stage, *Journal of Sound and Vibration*, 59 (1978), 481-502.
- M. Harwit and N.J.A. Sloane, Hadamard transform optics, Academic Press, New York, 1979.
- M.R. Schroeder, Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses, *Journal of the Acoustical Society of America*, 66 (2) (1979), 497-500.
- A.J. Berkhout, D. de Vries and M.M. Boone, A new method to acquire impulse responses in concert halls, *Journal of the Acoustical Society of America*, 68 (1980), 179-183.

- J. Fasbender and D. Gungel, Ein Messsystem für rechnergestützte Impulsmessungen in der Akustik, *Acustica*, 45 (1980), 151-165.
- W. Reichardt and W. Ahnert, Grundlagen der Beschallungstechnik, S. Hirzel, Stuttgart (1981).
- W. Reichardt and U. Lehman, Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen durch Auswertung von Impulsschalltests, *Acustica*, 48 (1981), 174-185.
- N Aoshima, Frequency and reverberation response of a pipe resonator, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 3, 4 (1982), 225-230.
- W. Keller, Akustik-planung, *Funkschau*, 12 (1982), 57-58.
- A. Kulowski, Relationship between impulse response and other types of room acoustical responses, *Applied Acoustics*, 15 (1982), 3-10.
- S. Strøm, Concert hall acoustics, University of Trondheim, Norway, ELAB Report STF44, A82006 (1982).
- J. Borish and J.B. Angell, An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise, *Journal of the Audio Engineering Society*, 31 (7) 1983.
- P. Eriksson, Measurement of reverberation decay function and modulation transfer function using M-sequences and FFT, *Proc. Inter-Noise*, 11 (1983), 1091-1094.
- M.R. Schroeder, Modulation transfer functions: definition and measurement, *Acustica*, 49 (3) (1983), 45-50.
- M. Barron, Impulse testing techniques for auditoria, *Applied Acoustics*, 17 (1984), 165-181.
- W.T. Chu, Architectural acoustic measurements using periodic pseudorandom sequences and FFT, *Journal of the Acoustical Soc. of America*, 76 (2) (1984), 475-478.
- H. Date, K. Fukudome, M. Oda, and S. Tokuriki, Observation of impulse response by two relatively prime pseudorandom sequences, *ICASSP*, 1985, 580-583.
- J. Mourjopoulos, On the variation and invertibility of room impulse response functions, *Journal of Sound and Vibration*, 102 (2) (1985), 217-228.
- K. Sekiguchi, S. Kimura, and T. Sugiyama, Approximation of impulse response through computer simulation based on finite sound ray integration, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 6, 2 (1985), 103-115.

J.P. Walsh. On limitations of minimum mean-square error deconvolution in deriving impulse responses of rooms, *Journal of the Acoustical Society of America*, 77 (2) (1985), 547-556.

M.Abe, C. Kim, and K.Kido, Investigation on the effect of a time window on the accuracy of an estimated impulse response, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 7, 5 (1986), 269-277.

A.A.R. Aljudi and M.A.H. Abdul-Karim, Evaluating acoustic properties of enclosures by real time digital signal processing, *Applied Acoustics*, 19 (1986), 433-437.

J.S. Bradley, Auditorium acoustics measures from pistol shots, *Journal of the Acoustical Society of America*, 80 (1) (1986).

K. Imai, K. Kuno, and K. Ikegaya, Measure of complexity of wave motions and cross correlation coefficient in reverberant fields, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 7, 3 (1986), 149-154.

C. Kim, M.Abe, and K. Kido, Investigations on the method for the estimation of impulse response using a rectangular pulse, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 7, 5 (1986).

T. Nishi, Extraction of fundamental physical parameters in the sound field by multidimensional analysis, *ICASSP 86*, Tokyo.

H. Date and K Fukudome, Observation of the envelope of reverberation curves by using two relatively prime pseudorandom sequences, *Acustica*, 62 (1987), 291-299.

Algemeen

W.C. Sabine, *Collected papers on acoustics*, Dover Publ., 1922.

H. Kuttruff, *Room acoustics*, Applied Science Publishers ltd, London, 1973.

INFORMATIE TUSSENRAPPORT 1

DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM

Inventarisatie en oriëntatie inzake
bouw- en elektro-akoestische aspecten.

januari 1987

Hfdst.	Titel	Blz.
1.	INLEIDING	1
2.	BOUWKUNDIGE ASPECTEN	2
2.1	Zaalomschrijving	2
2.2	Toegepaste materialen	4
2.3	Zaalruimte-begrenzing	4
3	GELUIDAPPARATUUR	6
4	ZAALGEBRUIK	10
5	EERDERE METINGEN GROTE ZAAL	12
6	TOEKOMSTPLANNEN	13
7	CONCLUSIES	14
	BIJLAGE	B1

Het rapport is aanwezig op de volgende plaatsen:

- Auditorium, bedrijfsleiding/technische dienst
- E-Hoog, vakgroep EEB
- Lab. v. Akoestiek
- BTD
- CTD, instrumentele service

INFORMATIE TUSSENRAPPORT 2

DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM

Metingen inzake bouw- en elektro-akoestische aspecten.

februari 1987

Hfdst.	Titel	Blz.
1	INLEIDING	1
2	ZAALAKOESTIEK	2
2.1	Nagalmtijden	2
2.2	Achtergrondniveau	5
2.3	Spraakverstaanbaarheid	7
2.4	Geluidverdeling	10
3	ELEKTROAKOESTISCHE INSTALLATIE (ELA)	12
4	VERGELIJKING EERDERE MEETRESULTATEN	15
5	CONCLUSIES	16
	BIJLAGEN:	
	NAGALMMETING	B1
	ACHTERGRONDGELUID	B2
	RASTI-METING	B3

Het rapport is aanwezig op de volgende plaatsen:

- Auditorium, bedrijfsleiding/technische dienst
- E-Hoog, vakgroep EEB
- Lab. v. Akoestiek
- BTD
- CTD, instrumentele service

INFORMATIE TUSSENRAPPORT 3

DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM

Metingen, inzake bouw- en elektro-akoestische aspecten.

(vervolg)

maart/april 1987

Hfdst.	Titel	Blz.
1	INLEIDING	1
2	ZAALAKOESTIEK	2
2.1	Nagalmtijden in bezette toestand	2
2.2	Achtergrondgeluid	4
2.3	Geluidverdeling	9
3	ELEKTROAKOESTISCHE INSTALLATIE (ELA)	10
3.1	Fasen luidsprekerzuilen	10
3.2	Open lus karakteristieken	10
3.3	Mengtafel karakteristiek	13
3.4	Positie luidsprekerzuilen	13
3.5	Bespreking	15
4	CONCLUSIES	17
	BIJLAGEN:	
	NAGALMMETING BEZETTE ZAAL	B1
	ACHTERGRONDNIVEAU	B2
	GELUIDVERDELING	B3
	OPEN LUS METING	B4

Het rapport is aanwezig op de volgende plaatsen:

- Auditorium, bedrijfsleiding/technische dienst
- E-Hoog, vakgroep EEB
- Lab. v. Akoestiek
- BTD
- CTD, instrumentele service

INFORMATIE TUSSENRAPPORT 4

DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM

Metingen inzake bouw- en elektro-akoestische aspecten.

(vervolg)

april/mei/juni 1987

Hfdst.	Titel	Blz.
1	INLEIDING	1
2	ZAALAKOESTIEK	2
2.1	Langswanden	2
2.2	Achtergrondgeluid (laagfrequent)	6
3	ELEKTROAKOESTISCHE INSTALLATIE	10
3.1	Open lus karakteristieken (vervolg)	10
4	GEDETAILLEERDE GELUIDVERDELING	12
4.1	Inleiding	12
4.2	Meetprocedure en resultaten	13
4.3	Normering	15
4.4	Signaal/ruis-verhoudingen	22
4.5	Bespreking	22
5	REVISIE GROTE ZAAL ALGEMEEN	23
6	CONCLUSIES	24
	BIJLAGEN:	
	ACHTERGRONDGELUIDDRUKNIVEAU (laagfrequent)	B1
	OPEN LUS KARAKTERISTIEK	B2
	GELUIDVERDELING	B4
	Gemeten verdeling	B4
	Genormeerde verdeling	B13
	Grafische weergave genormeerde verdeling	B20

Het rapport is aanwezig op de volgende plaatsen:

- Auditorium, bedrijfsleiding/technische dienst
- E-Hoog, vakgroep EEB
- Lab. v. Akoestiek
- BTD
- CTD, instrumentele service

INFORMATIE TUSSENRAPPORT 5

DE GROTE ZAAL IN HET AUDITORIUM

bouw- en elektro-akoestische aspecten.

metingen (vervolg) en suggesties
ter verbetering van de akoestiek

juli/augustus/september 1987

Hfdst.	Titel	Blz.
1	INLEIDING	1
2	ABSORPTIE LANGSWANDEN EN MEUBILAIR	2
2.1	Panelen langswanden	2
2.2	Meubilair	7
2.3	Bespreking	10
3	SPRAAKVERSTAANBAARHEID	13
3.1	Theorie (RA)STI	13
3.2	Invloed van ELA-instelling	16
3.3	Reflecties	18
3.4	Referenties	25
4	SUGGESTIES VERBETERING AKOESTIEK	26
5	RUIMTE-IMPULSRESPONSIE EN AKOESTIEK	27
5.1	Inleiding	27
5.2	Toepassingen van impulsresponsies	28
5.3	Bepaling van impulsresponsies	35
5.4	Conclusies en suggesties	40
5.5	Referenties	42
6	CONCLUSIES	46
	BIJLAGEN	
	DIN 52212	B1
	NAGALMMETING GALMKAMER	B4
	NAGALMMETING GROTE ZAAL	B16
	RASTI-METING	B19

Het rapport is aanwezig op de volgende plaatsen:

- Auditorium, bedrijfsleiding/technische dienst
- E-Hoog, vakgroep EEB
- Lab. v. Akoestiek
- BTD
- CTD, instrumentele service