

Sound & Science: Digital Histories

Archives NAG: Publicatie No. 11 van de Geluidstichting, Boot, C. (1937), Het acoustisch vooronderzoek bij het ontwerpen van gehoorzalen, Delft: Geluidstichting, 1937

<https://acoustics.mpiwg-berlin.mpg.de/text/publicatie-no-11-van-de-geluidstichting>



Scan licensed under: [CC BY-SA 3.0 DE](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/) | Max Planck Institute for the History of Science

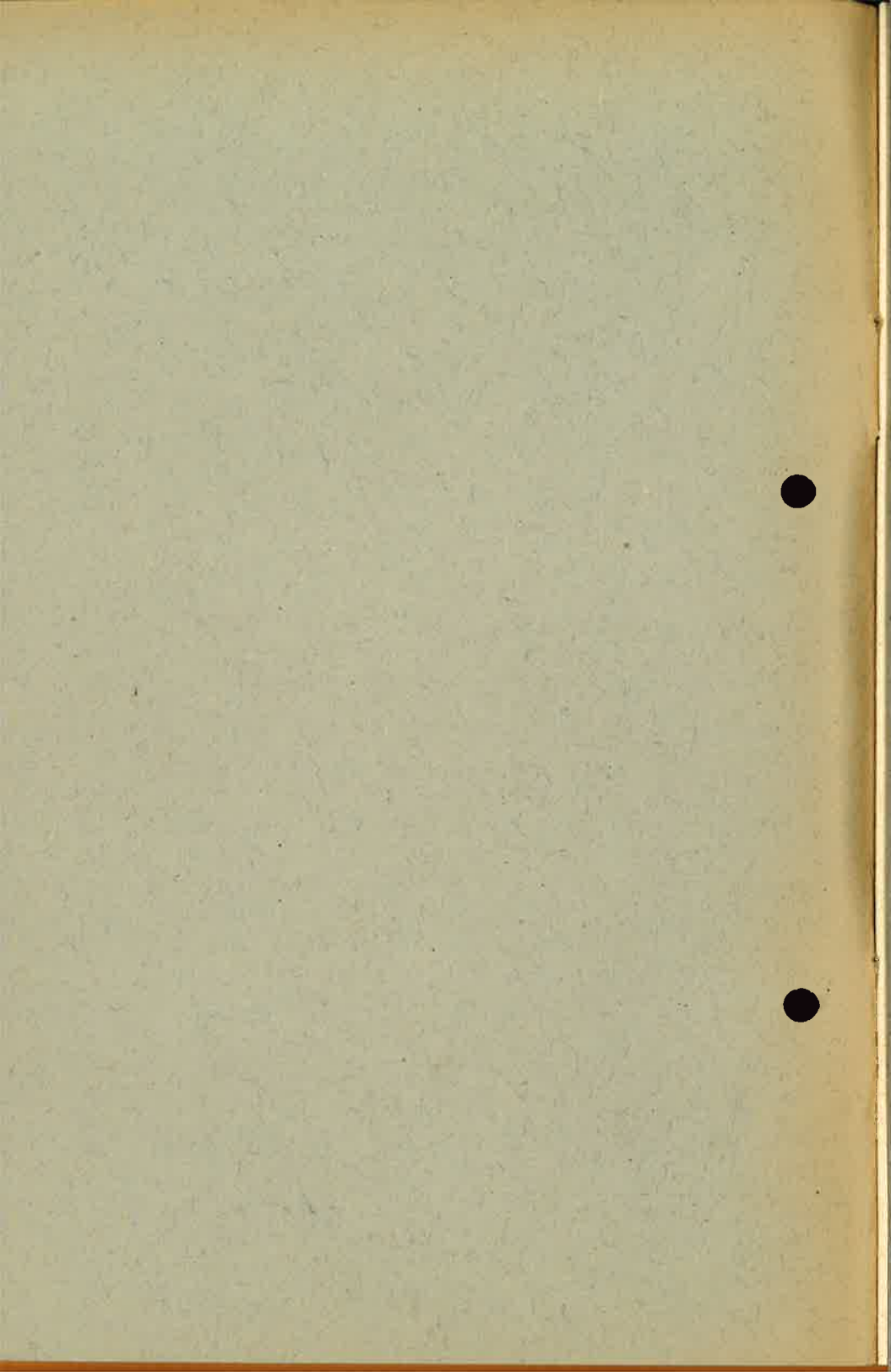


Het acoustisch vooronder- zoek bij het ontwerpen van Gehoorzalen

door

ir. C. BOOT.

PUBLICATIE No 11
— VAN DE —
GELUIDSTICHTING
DELFT — HOLLAND



Het acoustisch vooronderzoek bij het ontwerpen van Gehoorzalen

door

ir. C. BOOT.

Directeur van den Looonmeetdienst der Geluidstichting te
Delft.

SAMENVATTING (*)

De idee, welke bij het ontwerpen van gehoorzalen voorop staat, is: het geluid zoo nuttig mogelijk te gebruiken. Daarom is het gewenscht methoden, waaruit tot de geluidsverdeeling geconcludeerd kan worden, toe te passen bij het ontwerpen, zoodat verschillende fouten reeds bij het ontwerp aan den dag komen.

De thans hiervoor in aanmerking komende methoden zijn die der schaduwfotographie en die met het lichtmodel. De schaduwfotographische methode gaat uit van de idee, de geluidsgolven in een verkleind doorsnedemodel zichtbaar te maken en daarna te fotografeeren. Bij het lichtmodel wordt een parallel getrokken tusschen de gedragingen der geluidsgolven en der lichtgolven. De lichtverdeeling, die in het driedimensionale zaalmodel ontstaat, indien op de plaats waar de spreker zal komen een puntvormige lichtbron wordt aangebracht, wordt als uitgangspunt voor het geluidistributieprobleem genomen.

1. Constructie en berekening.

Bij het ontwerpen van gehoorzalen is het van belang te weten, hoe de verstaanbaarheid in verschillende punten der te ontwerpen zaal zal zijn. Het ideaal is, dat de spreker op iedere plaats door een normaal hoorende goed verstaan kan worden, zonder

(*) Lezing gehouden tijdens het IV^e VI. Techn. Congres te Gent, 1936.

dat spreker en hoorder zich behoeven in te spannen.

De geluidenergie, die voortgebracht kan worden door de menschelijke stem, is veel geringer dan die, welke de luidsprekers in een bioscoopzaal kunnen voortbrengen. Daarom zullen aan zalen, waar nage- noeg uitsluitend de menschelijke stem als geluidbron gebruikt wordt, andere eischen aangelegd moeten worden, dan aan zalen, waar de luidspreker als geluidbron fungeert. Aan concertzalen moeten weer andere eischen aangelegd worden. Het ligt niet in het kader dezer verhandeling deze eischen voor zalen met verschillende doeleinden te bespreken, daar dit te ver zou voeren. De eenige variabele is de nagalm- tijd der zaal, doch de plaatsing van het publiek is belangrijk. Bij schouwburgzalen zijn de beste plaat- sen voor in de zaal, bij bioscoopzalen achterin. Ook dit dient in overweging genomen te worden.

Een algemeene eisch is, de ontwikkelde geluid- energie zoo nuttig mogelijk te gebruiken. Daarom wordt thans eerst nagegaan welk geluid het publiek bereikt op een punt in het midden der zaal.

In fig. 1 is afgebeeld de eenvoudigste verticaal doorsnede van een gehoorzaal, n.l. een rechthoek. De spreker is aangebracht op een afstand a van de voor- zijde der zaal en op een afstand b van den bodem. Uitgaande van de premisse, dat het geluid zich recht- lijnig voortplant en dat de invalshoek gelijk is aan de hoek van reflectie, zijn de geluidstralen getee- kend, welke den hoorder T in de zaal bereiken. Dit zijn (zie fig. 1):

1° het geluid, dat direct van den spreker S naar den hoorder T gaat (1° uitgaande golf);

2° het geluid, dat via de voorzijde tot den hoorder komt (2° uitgaande golf);

3° het geluid, dat door de zoldering teruggekaatst wordt (1° gereflecteerde);

4° het geluid, dat via de voorzijde en zoldering tot den hoorder komt (2° gereflecteerd);

5° het geluid, dat via den bodem, de voorzijde en zoldering, den hoorder bereikt (3° gereflecteerde).

De stralen, welke den hoorder bereiken, kunnen op de volgende wijze geconstrueerd worden:

Aangenomen is, dat het geluid zich rechtlijnig voortplant en dat de invalshoek gelijk is aan de hoek van terugkaatsing. Het geluid, dat via de voorzijde

tot den toehoorder T' komt, zal dus schijnbaar komen uit het punt S₂. Dit punt S₂ is verkregen door het punt S te spiegelen ten opzichte van de voorzijde. Het geluid dat den hoorder via de zoldering bereikt, schijnt te komen van de virtueele bron S₃, die gevonden wordt door het punt S te spiegelen met de zoldering der zaal. Op dezelfde wijze kan men de geluidstralen bepalen die via een andere weg naar T' komen. Het geluid dat via de voorzijde en zoldering T' bereikt, schijnt te komen uit de virtueele geluidsbron S₄. S₄ wordt gevonden door het punt S te spiegelen met de voorzijde der zaal S₁' en dit punt S₄' nogmaals te spiegelen met de zoldering. Het punt S₄' is dus hetzelfde als het punt S₂.

De 5^e geluidstraal, welke het publiek bereikt, heeft als virtueele geluidsbron het punt S₅, dat op overeenkomstige wijze geconstrueerd wordt als het punt S₄.

De indexnummering der virtueele geluidsbronnen is zoo gekozen, dat de indices de chronologische volgorde van het aankomen der stralen aangeven. Het directe geluid wordt daarom ook aangegeven als komende van de bron S₁. S₁ valt dus samen met S.

Twee geluidimpulsen die het oor bereiken met een onderling tijdsverschil van ten hoogste 1/15 seconde, worden door den hoorder als één geluid waargenomen. Derhalve zullen de gekaatste golven den hoorder bereikt moeten hebben binnen 1/15 seconde na aankomst van het geluid uit S₁. De voortplantingsnelheid van het geluid is 330 m/sec. Om te voldoen aan de tijdsvoorwaarde moet dus:

$$S_n T' - S_1 T' < 330 \times 1/15 < 22 \text{ m.} \quad (1)$$

Indien een willekeurig punt voor de punten S₁, S₂, S₃, S₄ of S₅ bedoeld wordt, wordt dit aangegeven door gebruikmaking van S_n.

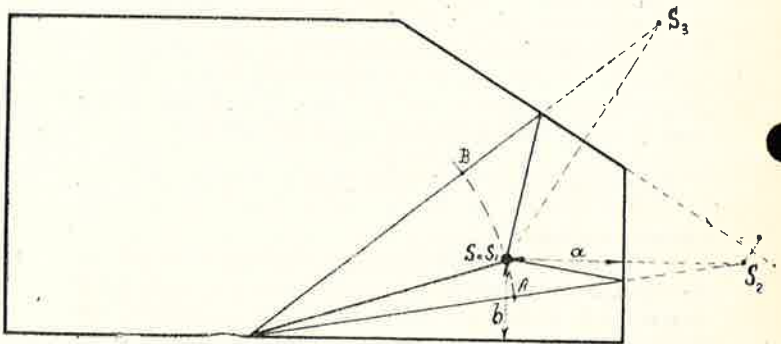
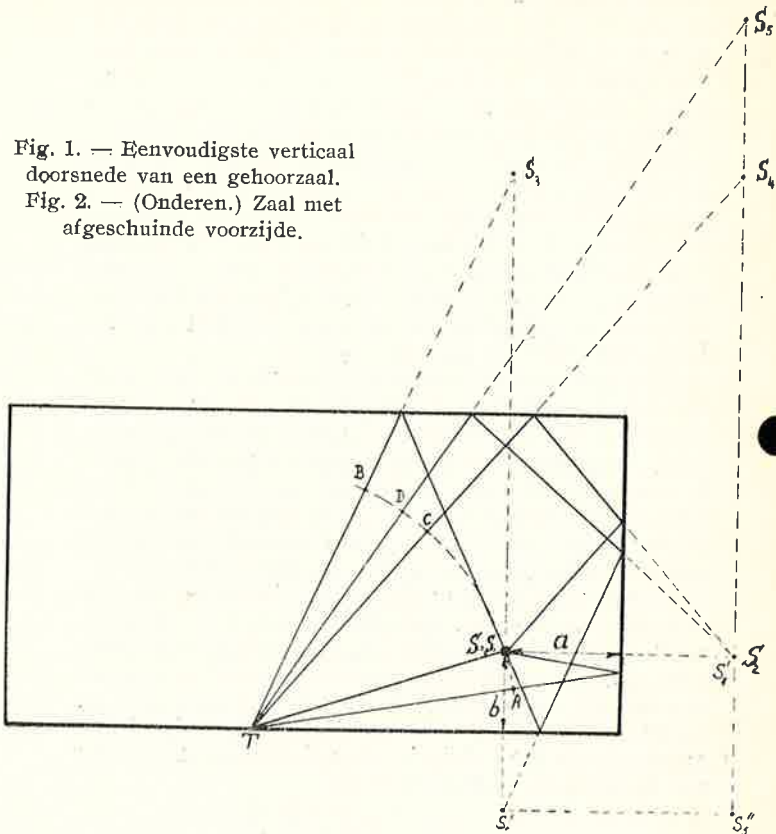
Het ongunstigste geval treedt dus op wanneer de toehoorder T' zich op te verwaarloozen kleine afstand van S bevindt, d.w.z. dat S₁T' = 0. T' valt dus samen met S en de betrekking (1) gaat dus over in:

$$S_n S = 22. (*)$$

Deze betrekking geldt algemeen indien de afmetin-

(*) Daar de toehoorder zich nooit op dezelfde hoogte als de spreker zal bevinden, is het juist om als ongunstigste plaats voor T' aan te geven de centrale projectie van S op het vlak waar de toehoorder zich bevindt met als

Fig. 1. — Eenvoudigste verticaal doorsnede van een gehoorzaal.
 Fig. 2. — (Onderen.) Zaal met afgeschuinde voorzijde.



gen van de reflecterende vlakken toelaten dat een straal tot den spreker terugkeert. Geschiedt dit niet, dan zal men de kritische afmetingen met (1) moeten controleren. Voor de rechthoekige vorm wordt dus:

$$S_1 S = 0.$$

$$S_2 S = 2 a.$$

$$S_3 S = 2 (h - b), \text{ waarin } h \text{ de hoogte van de zaal voorstelt.}$$

$$S_4 S = \sqrt{[2(h - b)]^2 + (2a)^2} = 2 \sqrt{(h - b)^2 + a^2}.$$

$$S_5 S = 2 \sqrt{h^2 + a^2}.$$

Indien de afstanden a en b bekend zijn, is derhalve de maximale hoogte der zaal te bepalen.

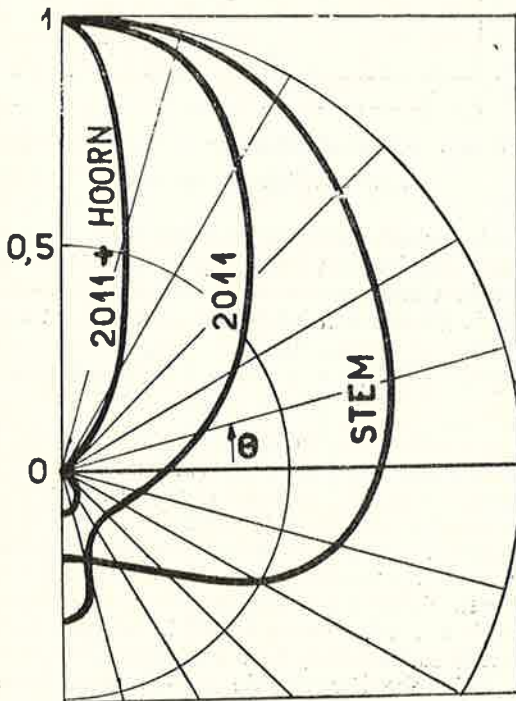


Fig. 3. — Richteffect van de menselijke stem en van een luidspreker.

oogpunt S_n , $S_1 T$ wordt dan weliswaar niet nul, maar $S_n T = S_n S_1 + S_1 T$, zoodat de betrekking toch overgaat in $S_n S = 22$.

Voor het ongunstigste geval, d.w.z. voor S_5 , blijkt de kritische afstand $S_n S$ onafhankelijk te zijn van b , d.w.z. onafhankelijk van de hoogte van den spreker. De maximale waarde van h wanneer $a = 4,5$ m. gesteld wordt, is dan 10 m.

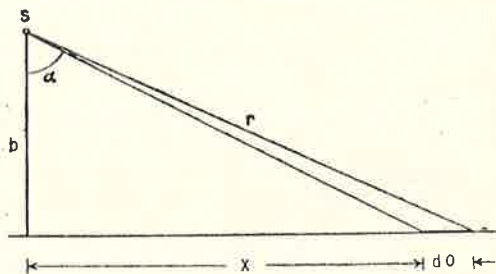


Fig. 4. — Diagram dienende voor de berekening van de sterkte van het geluid.

Hieronder zal nagegaan worden welk aandeel een virtueele geluidsbron heeft, op de geluiddistributie. Indien de virtueele bron S_5 te verwaarloozen is, dan wordt de grootte van h bepaald door $S_4 S$, of wel:

$$(h - b)^2 + a^2 = 121.$$

Voor $a^2 = 21$ (d.w.z. $a = \pm 4,5$ m) wordt dus:

$$h - b = 10.$$

In een gehoorzaal zal de spreker zich normaal 1 à 2 m boven den hoorder bevinden. De maximale hoogte wordt dan 11 à 12 meter. Voor bioscoopzalen, waar de luidspreker ongeveer in het midden van het doek is aangebracht, wordt de maximale hoogte gunstiger. Voor $b = 4$ à 5 meter wordt de $h_m = 14$ à 15 meter. Voor menselijke sprekers is men in de keuze van b niet vrij; evenmin is men dit bij bioscopen, daar zooals wordt aangetoond, de b van groote beteekenis is voor de berekening van de geluidintensiteitsverdeling in de zaal.

In fig. 2 is de constructie uitgevoerd voor een afgeschuinde voorzijde van de zaal. Men ziet dat T nu slechts drie geluidstralen ontvangt van de virtueele geluidsbronnen S_1 , S_2 en S_3 .

Indien de afmetingen ook hier gegeven zijn, zijn de maximale waarden van de hoogte weer te bepalen. Men ziet echter dat dit, naarmate de vorm van de

zaal ingewikkelder wordt, steeds meer moeilijkheden met zich brengt. Daarom zal het voor groote zalen noodzakelijk zijn, en voor kleinere zeer gewenscht, om een andere methode te vinden, die een zuivere controle levert op de tijdverschillen welke optreden tusschen de aankomst der verschillende stralen. Een dergelijke methode is die der z.g. schaduwfotografie.

Indien men de schets der zaal zuiver op schaal teekent, kan men door omcirkeling van den afstand T.S, de tijdverschillen grafisch bepalen. Het geluid uit de virtueele bron S_2 legt een afstand AS_2 meer af dan het directe geluid, evenzoo het geluid dat uit de virtueele bron S_3 komt legt een afstand BS_3 meer af. Indien de schaal bekend is, dan kan men met behulp van de geluidsnelheid (330 m/sec.) deze afstanden direct in tijdverschillen omrekenen. Uit de figuren blijkt dat bij een afgeschuinde voorzijde minder geluidstralen in het midden der zaal komen, doch dat de onderlinge tijdverschillen gunstiger zijn.

De hoek waaronder een bepaald oppervlak van de zaal gezien wordt door de virtueele geluidsbron (S_n) is niet gelijk aan die waaronder de spreker S dit oppervlak ziet. Daar echter de geluidsbron over het algemeen een richteffect heeft, dient men hiermede rekening te houden en een correctieterm in te voeren. In fig. 3 is het richteffect aangegeven voor de menschelijke stem en den Philipsluidspreker 2011 met en zonder hoorn. De menschelijke stem, welke voor hoorzalen van veel belang kan zijn, vertoont slechts een betrekkelijk gering verschil in geluidsterkte tusschen de richting waarin gesproken wordt en de virtueele richting.

Nemen we weer aan, dat het geluid zich volgens dezelfde wetten gedraagt als het licht, dan kunnen we voor de sterkte van het geluid in het midden der zaal de volgende berekening opzetten.

De photometrische grondwet luidt: $E = I \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2}$ waarin E de verlichtingsterkte en I de intensiteit. Dit omgerekend in de diverse afstanden levert, zie fig. 4.

$$E = I \frac{b}{r^3}$$

Beschouwen wij het oppervlak dO midden in de zaal en berekenen daarvoor volgens de verlichtings-

wetten de sterkte van het geluid dan vinden we voor het directe geluid :

$$E_1 = I. \frac{b}{(h^2 + x^2)^{3/2}}$$

Voor de eerste gereflecteerde (S_3) vinden we :

$$E_3 = \alpha I. \frac{[(2h - b)^2 + x^2]^{3/2}}{2h - b}$$

Hierin is $\alpha = (1 - \alpha_1) \cdot \alpha_2$, waarin α_1 absorptie coëff. voorstelt van het plafond (in dit getal is eventueel de geluidsabsorptie door de langere luchtweg begrepen), terwijl α_2 de verhouding aangeeft van de intensiteit van den spreker in de plafondrichting en de intensiteit van den spreker in de richting van het directe geluid.

Voor de menselijke stem en een gepleisterd plafond kan aangenomen worden :

$$0,6 < \alpha < 0,7$$

Nu kan nagegaan worden voor welke afstand van x de $E_1 = E_3$.

Dan is :

$$I. \frac{b}{(h^2 + x^2)^{3/2}} = \alpha I. \frac{2h - b}{[(2h - b)^2 + x^2]^{3/2}}$$

Stel $2h - b = y$

dan wordt :

$$\frac{b}{(h^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{\alpha y}{(y^2 + x^2)^{3/2}}$$

Hiervoor x opgelost, geeft :

$$x = \sqrt{\frac{y^2 - p b^2}{p - 1}}$$

waarin $p = \frac{\alpha y^{3/2}}{b}$ voorstelt.

Indien de zaal een hoogte heeft van 10 meter en de spreker op 2 meter van den bodem staat en voor α genomen wordt 0,7, dan wordt :

$$\text{voor } b = 2 \quad x = 11 \text{ meter.}$$

$$b = 4 \quad x = 15,5 \text{ »}$$

Stelt men $\alpha = 1$ dan wordt voor :

$$b = 2 \quad x = 9,6 \text{ meter.}$$

$$b = 4 \quad x = 11 \text{ »}$$

Uit het bovenstaande volgt, dat reeds dicht bij den spreker de invloed van het gereflecteerde geluid sterker is dan de invloed van het directe geluid. Het is derhalve niet slechts ongewenscht de zoldering met absorberend materiaal te bedekken, maar het is een

eisch, dat het plafond goed reflecteerd is. In veel zalen is tegen deze regel gezondigd en is de zolder bedekt met een of ander absorptie middel. Het gevolg is, dat de geluidintensiteit in de zaal sterker afneemt, indien men van voor naar achter gaat, dan het geval zou zijn indien de zoldering reflecteerd gemaakt zou zijn. Voor bioscoopzalen wordt deze sterke afname gecompenseerd door opvoering van de sterkte van het geluid dat de luidsprekers voortbrengen. Dit is slechts een hulpmiddel en is oorzaak, dat het geluid voorin de zaal onnatuurlijk sterk wordt, terwijl het achter in de zaal te zwak of juist op sterkte is.

2. Schaduwphotografische methode voor het onderzoeken van zaalmodellen.

Het onderzoeken van zaalmodellen kan op tweeterlei wijze geschieden :

- a) met de rippletank methode ;
- b) met schaduwphotographie.

De rippletank bestaat uit een bak, welke de vorm heeft van de zaaldoorsnede, welke men wil onderzoeken en is gevuld met een vloeistof, b.v. kwik of water.

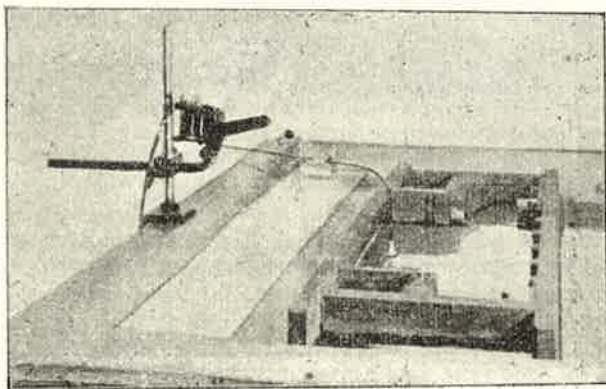


Fig. 5. — De rippletank.

Op de plaats, waar in de zaal de spreker zich zal bevinden wordt het vloeistofoppervlak verstoord (zie fig. 5). De golven, welke daardoor ontstaan, planten zich (op het oppervlak) voort als transversale golven, die door de wanden van de bak teruggekaatst worden.

Daar deze golven zich naar alle zijden voortplanten, vertoonen deze golfbewegingen veel overeenkomst met de in werkelijkheid optredende geluidsgolven. Het bezwaar is echter, dat het verstoorde vloeistoppervlak niet direct tot zijn evenwichtstand terugkeert, doch een gedempte trilling uitvoert, ten gevolge waarvan meerdere golven achter elkaar uitgaan.

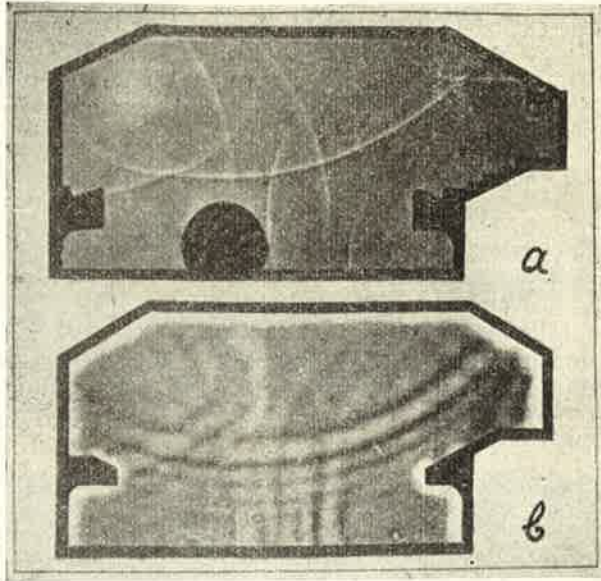


Fig. 6. — Resultaten van : a) de schaduwfotografie, b) de rippeltank.

De door de wand teruggekaatste golven zullen met de nakomende interfereeren, ten gevolge waarvan een staande golfbeweging ontstaat, die het trekken van conclusie's zeer bemoeilijkt, temeer daar het geluid zelf een sterk gedempte trilling is, zoodat bij de rippeltank zeer veel golven gezien worden, die bij het geluid niet voorkomen. De langs schaduwphotografische weg verkregen resultaten geven een veel overzichtelijker afbeelding van de geluidsgolven.

In fig. 6 zijn afgebeeld de resultaten van beide methoden, toegepast op dezelfde zaaldoorsnede en waargenomen op hetzelfde tijdstip. Duidelijk ziet men hieruit de veel scherpere afteekening bij de bovenste afbeelding.

Voor het maken van schaduwfotographieën vervaardigt men een houten model van de te onderzoeken doorsnede (zie fig. 7). Op de plaats, waar in de zaal zich de spreker bevindt, wordt in het model een vonkbrug geplaatst. De vorm der elektroden is zoo gekozen, dat de vonk veel geluid, doch weinig licht

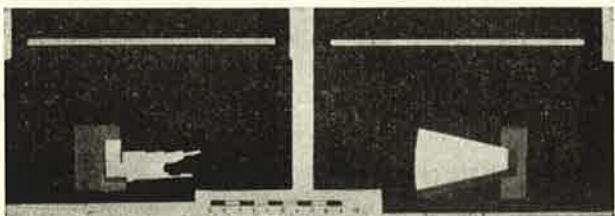


Fig. 7. — Houten model van de te onderzoeken doorsnede.

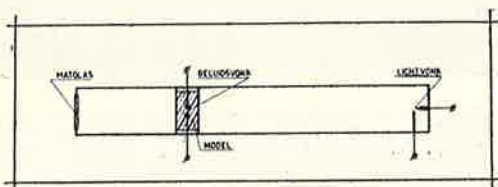


Fig. 8. — Plaatsing van model en vonkbrug.

geeft. Bij het overslaan van den vonk treedt een korte knal op en de hierdoor opgewekte geluidsgolven planten zich voort door het model en worden daarin gereflecteerd op dezelfde wijze als het geluid in de zaal zelf gereflecteerd zal worden. Model en vonkbrug worden geplaatst in een lange zwarte houten kist (zie fig. 8). Aan het ééne uiteinde van deze kist bevindt zich de z.g. lichtvonk. 1/1000 à 1/1500 sec. nadat de geluidvonk is overgesprongen en de geluidsgolven zich dus in het model bevinden, springt de lichtvonk over. De lichtstralen vallen door het model heen en worden gebroken door de luchtverdichtingen en verdunningen en vallen daarna op een matglazen of een gevoelige plaat. Deze gebroken lichtstralen geven dan een beeld van de geluidsgolven, zooals in fig. 6 a te zien is. Door het tijdsverschil tusschen het overslaan van de geluidvonk en de lichtvonk te regelen, worden opnamen gemaakt van de verschil-



Fig. 9. — Apparatuur van het Laboratorium voor Technische Physica te Delft (Holland).

lende fasen van de geluidsvoortplanting. Uit een dergelijke serie kunnen dan de conclusies getrokken worden, daar de golfbewegingen van het ontstaan tot liet uitsterven geheel zijn na te gaan.

De apparatuur, zooals deze in het Laboratorium voor Technische Physica, te Delft, Holland, voor deze proef in gebruik is, is afgebeeld in fig. 9.

Als voorbeeld worden hier besproken de fotografieën van een bepaalde in aanbouw zijnde zaal. In fig. 7 zijn de zaalmodellen, die voor het onderzoek gebruikt werden, afgebeeld. De foto's van fig. 10 (a—e) toonen de verschillende fasen van de geluidsvoortplanting. In fig. 10 a ziet men de uitgaande golf in een toestand, waarin deze aan de voorzijde van het plafond juist wordt gereflecteerd. Tevens zien wij de golf, welke door den grond en de voorzijde wordt gereflecteerd.

In fig. 10 b heeft de uitgaande golf zich over een zekeren afstand in de zaal verplaatst. De door de zolder gereflecteerde golf toont een cirkelvorm. Het

middelpunt van deze cirkel komt overeen met het punt S_2 van fig. 1.

De tweede uitgaande golf, welke ontstaat door reflectie van voorzijde en bodem, wordt eveneens gereflecteerd door de zolder.

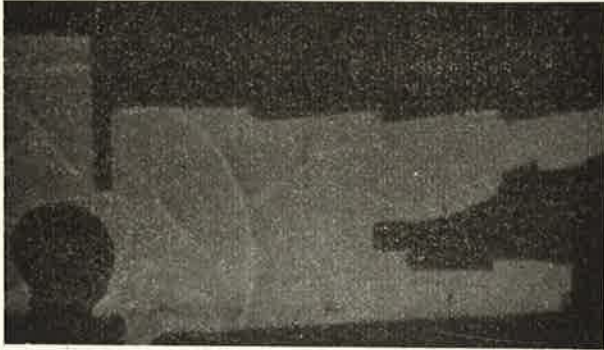


Fig. 10 a. — Uitgaande golf wordt aan de voorzijde van het plafond gereflecteerd.

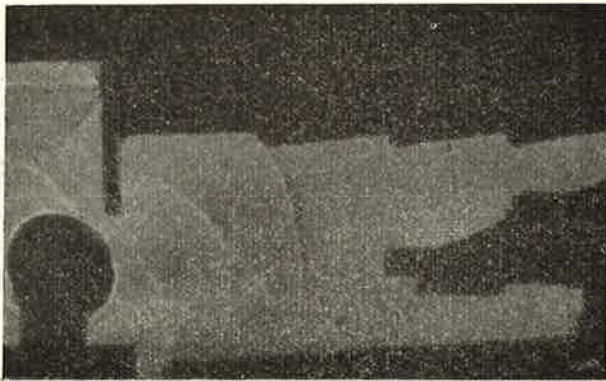


Fig. 10 b. — Uitgaande golf heeft zich over een zekeren afstand in de zaal verplaatst.

Fig. 10 c geeft het stadium aan waarbij de eerste uitgaande golf de voorzijde van het balkon gepasseerd is. De eerste gereflecteerde heeft het publiek nog niet bereikt. Aan de bovenzijde is de 2^{de} gereflecteerde zichtbaar. In fig. 10 d heeft de eerste gereflecteerde

aan de voorzijde der zaal het publiek bereikt en strijkt juist over het punt van het balkon. Het afstandverschil tusschen de eerste uitgaande en de eerste gereflecteerde golf bedraagt, volgens de berekende schaal, juist 20 meter. Bovendien valt op, dat het balkonfront geen belangrijke reflecties geeft.

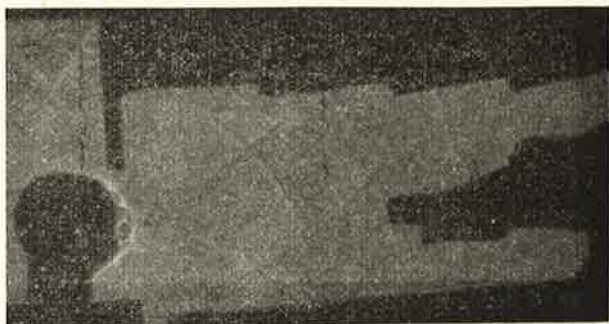


Fig. 10 c. — De eerste uitgaande golf is de voorzijde van het balkon gepasseerd.

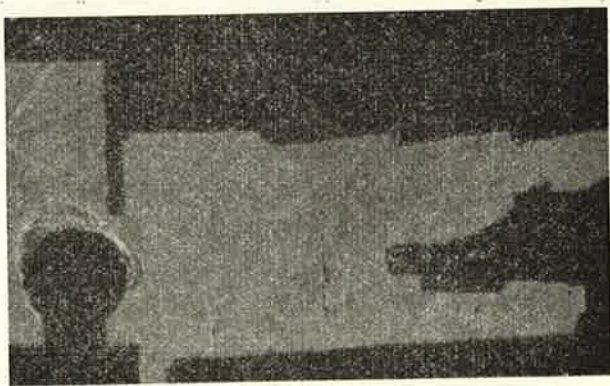


Fig. 10 d. — De eerste gereflecteerde golf heeft aan de voorzijde der zaal het publiek bereikt.

Fig. 10c geeft het laatste stadium van de uitgaande geluidsgolven. Volgens meting blijkt het tijdsverschil tusschen de eerste uitgaande en de gereflecteerde $1/12$ sec. te zijn. Deze tijd is dus te lang, vooral aan de voorzijde zal dit voor het publiek hinderlijk zijn.

Deze reflectie komt via de voorzijde en de zolder tot het publiek. Wil men dit gebrek verhelpen, zonder de zaalvorm te wijzigen, dan dient men op één der beide plaatsen het geluid weg te nemen. Beide plaatsen werken eveneens mede aan de nuttige reflectie, zoodat het aanbrengen van absorptie-middelen bezwaarlijk is. Er is echter nog een tweede principiële moeilijkheid.

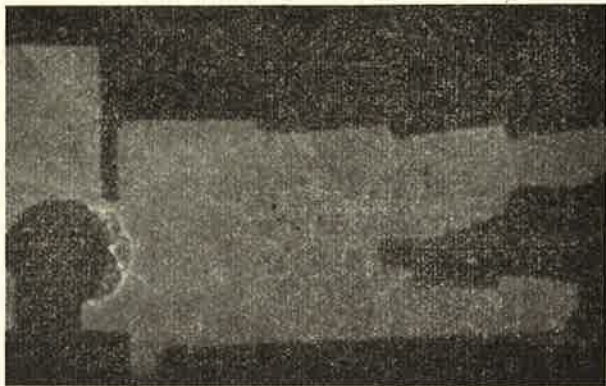


Fig. 10 e. — Het laatste stadium van de uitgaande geluidsgolven.

In fig. 10 d en e ziet men dat de eerste gereflecteerde door het balkon in tweeën wordt gesplitst. De bovenste helft versterkt het geluid van het balkon, terwijl de onderste helft dient door te dringen tot het publiek achter in de zaal. Doordat het balkon echter zoo ver uitsteekt, zal de geluidsgolf niet het achterste deel der zaal bereiken en het geluid blijft daar dus zwak. Dit beteekent dat het gedeelte van het plafond, welker reflectie onder het balkon moet doordringen, onjuist geconstrueerd is; daar het deze taak niet volbrengt. Deze beide fouten zijn voldoende reden het plafond aan de voorzijde van de zaal van vorm te veranderen, daar deze fouten niet te corrigeeren zijn met behulp van absorptiemiddelen. Een ander middel, dat tot verbetering van dit model kan leiden, is een verandering aan te brengen in den vorm van het balkon en daardoor de intrede-öpening van het achterste gedeelte der zaal te vergrooten.

De overgang van de onderzijde balkon met de ach-

terwand kan men een dusdanigen vorm geven, dat het geluid dat van den spreker over de hoofden der toeschouwers tegen den achterwand zou vallen, door de juist gekozen vorm gereflecteerd wordt naar dat gedeelte van het publiek, dat het minste geluid ontvangt, in dit geval dus de achterste 5 meter. De achterwand zal dan over het algemeen overhellen naar voren. Een zelfde soort begrenzing is te ontwerpen voor de overgang zoldering-achterzijde balkon, opdat ook daar het geluid gekaatst wordt naar dat gedeelte van het balkon, dat het het meeste noodig heeft.

Uit de schaduwfotographiën van fig. 10 ziet men dat de premisse welke in de aanvang van dit artikel is gedaan, n.l. dat het geluid zich rechtlijnig voortplant en dat de invalshoek gelijk is aan de hoek van reflectie voor het practische zaalonderzoek voldoende juist is. De middelpunten der gereflecteerde golven bevinden zich ongeveer op dezelfde plaats als door de constructieve methode wordt aangegeven.

Indien men een vergelijking treft tusschen lichtgolven en geluidsgolven, constateert men schijnbaar groote verschillen. Lichtgolven even schein begrensd de schaduwen en worden spiegelend gereflecteerd, hetgeen onnervlakkig beschouwd, voor geluid niet waar is. Het verschil in gedrag wordt veroorzaakt door het verschil in golflengte. De golflengte van het zichtbare licht ongeveer 0,6 micron, terwijl de golflengte voor een toon van 1000 perioden 30 cm bedraagt.

Indien de afmetingen van een vlak, dat dient voor geluidreflectie groot is ten opzichte van de golflengte, dan zal het geluid over het algemeen spiegelend gereflecteerd worden. In absolute maat zullen de oneffenheden van een dergelijk vlak, waarbij voor geluid nog wel spiegelende reflectie wordt verkregen, veel grooter zijn dan voor lichtgolven.

Oneffenheden van enkele cm hoog, zullen nog geen diffuseerende werking hebben. Pas wanneer een relief wordt aangebracht van 20 — 50 cm hoogte, zal het geluid merkbaar gediffuseerd worden. Daar ruw gepleisterde wanden oneffenheden vertoonen, die te verwaarloozen zijn, ten opzichte van de golflengte van het geluid kan men aannemen dat deze wanden het geluid spiegelend reflecteeren. Voor geluiden van lage frequentie, waarvan de golflengte 5 meter kan bedragen, mag men niet aannemen, dat de vlakken

groot zijn ten opzichte van de golflengte, doch de verstaanbaarheid van het gesproken woord, wordt voor het grootste deel bepaald door de z.g. karakteristieke frequenties. Deze frequenties liggen ongeveer bij 1000 perioden per sec. (golflengte ± 30 cm.).

Voor deze frequenties mag men derhalve de analogie tusschen het gedrag van de geluidsgolven en de lichtgolven aannemen.

3. Het lichtmodel.

Teneinde een beeld te krijgen van de geluidsverdeling in zalen, vervaardigt men een aluminium model, waarvan de grootste lengt $3/4 - 1$ meter draagt. Op de plaats, waar de spreker zich zal bevinden, brengt men een puntvormige lichtbron aan. Het licht, dat naar alle zijden wordt uitgestraald, wordt door de wanden en de zoldering gereflecteerd en vormt tezamen de verlichting van de vloer en het balkon der zaal, d.w.z. de plaats waar het publiek zich bevindt. Op deze plaats brengt men een melkglazen of matglazen plaat aan. De verlichting van deze plaat kan men volgens het bovenstaande aannemen als een maat voor de geluidsverdeling. Door de lichtbron te verplaatsen, kan men den meest gunstigen stand voor den spreker vinden, d.w.z. de plaats waarbij de verlichting van de glazen plaat zoo egaal mogelijk is. In fig. 11 en 12 zijn afbeeldingen gegeven van het aluminium model van dezelfde zaal, waarvan ook de schaduwfotographiën zijn gemaakt.

Fig. 11 geeft een binnenaanzicht van het model, gezien vanaf den grond naar den zolder. Fig. 12 geeft een zijaanzicht van het model waarbij de glazen platen zichtbaar zijn. Aan de linkerzijde is een beweeglijke lichtbron aangebracht. Dit is verkregen door de doorvoering in een balhoofd te vatten. Dat het model van aluminium gekozen is, berust op de volgende gronden. De ruwe aluminium plaat heeft een absorptie-coëfficiënt voor licht, welke ligt tusschen de 0,5 en 0,7 en deze waarde benadert ongeveer de absorptie, welke het geluid ondervindt bij reflectie tegen het zolderoppervlak, indien dit niet zoo weinig mogelijk absorbeërend is gemaakt en de absorptie van 't geluid in de lucht. In plaats van de matglazen platen wordt lichtgevoelig papier aangebracht en na belichting zal de zwarting van dit papier een maat zijn voor de

licht-intensiteitsverdeling in het model. De zwarting van dit papier kan onderling vergeleken worden met behulp van de densygraph, waardoor de intensiteitsverhouding van verschillende plaatsen der zaal uitgedrukt kan worden in decibels.

De fig. 13 a en b geven de opnamen van de zaal en het balkon van het hier beschreven model. De licht-intensiteiten zijn uitgerekend voor de punten welke aangegeven worden door de lijnen A, B, C en de lijnen 1 — 5. Het punt met de slechtste verlichting is het punt A 1. De intensiteit hiervan is gesteld 0 en de intensiteit van de andere punten zijn hier derhalve mede vergeleken.

De zwarting is het sterkst op het punt B3, dit heeft ten opzichte van het punt A.1. een intensiteitsverschil van 13,2 decibel. Voor B3 is het directe licht het sterkste. Het intensiteitsverschil tusschen B2 en B3 bedraagt ongeveer 4 decibel, echter tusschen B2 en B1 8 decibel. Oorzaak hiervan is de afscherpende werking van het balkon.

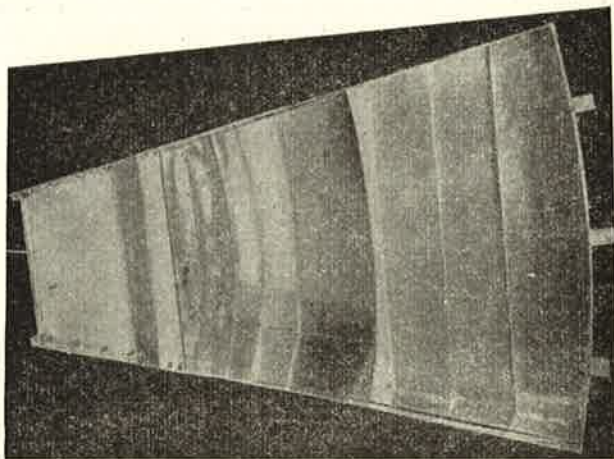


Fig. 11. — Binnenaanzicht van het aluminium model.

De intensiteit van het balkon zelf bedraagt aan de voorzijde van het punt B5 10,5, dat wil zeggen ongeveer dezelfde intensiteit als in het midden der zaal, n.l. het punt B2. Aan den achterzijde van het

balkon, punt B4, heerscht een intensiteit van 4,5. Dat de intensiteit hiervan veel geringer is, vindt zijn

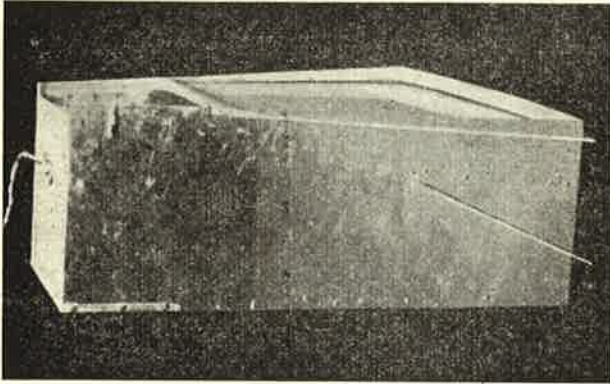


Fig. 12. — Zijaanzicht van het aluminium model.

oorzaak in het feit, dat het balkon aan de achterzijde nagenoeg geen directe straling ontvangt, doch geheel verlicht moet worden door het door de zolder gereflecteerde. Uit de beschouwing van deze getallen volgt, dat het grootste intensiteitsverschil bedraagt 13,2 decibel. Dit is vrij veel, doch de plaats A1 is zeer ongunstig, zooals ook reeds uit de schaduwfotographie is gebleken. Het verschil tusschen het punt B4 en B3 bedraagt 8,7 decibel. Dit is al aanzienlijk minder en men mag aannemen dat dit verschil niet te groot is.

Dat inderdaad het plafond een zeer belangrijk deel van de geluidintensiteit reflecteert; is met het lichtmodel zeer gemakkelijk na te gaan. Indien men n.l. bij een lagen stand van de lichtbron de zoldering afdekt met zwart papier, waardoor van de zoldering geen reflectie meer uitgaat, ziet men dat het achterste gedeelte der zaal aanzienlijk aan intensiteit verliest. Indien men de geluidsbron hoog plaatst, zal het intensiteitsverlies veel verder naar voren merkbaar zijn.

De studie, welke op deze wijze gemaakt wordt van de lichtverdeling en dit direct als equivalent aan de geluidsverdeling beschouwd wordt, kan getoetst worden aan de schaduwfotographische methode. Bij

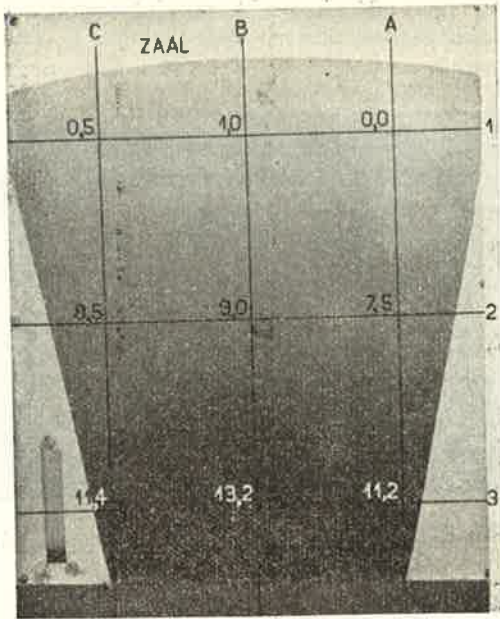


Fig. 13 a. — Opname van de lichtintensiteitsverdeling
in de zaal,

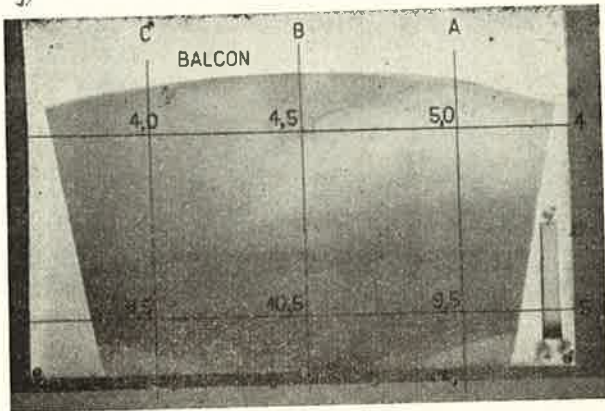


Fig. 13 b. — Opname van de lichtintensiteitsverdeling
op het balkon.

het lichtmodel zijn wij van de premisse uitgegaan dat het geluid zich lineair zal voortplanten evenals dit bij licht geschiedt en spiegelend wordt gereflecteerd. Bij de eerste beschouwing van dit artikel hebben wij ingevoerd de virtueele geluidsbron S_n . Hierbij zijn we van dezelfde premisse uitgegaan. Indien wij de vorm van de geluidsgolven uit de schaduwfotographiën beziën, kunnen wij aannemen, dat deze nagenoeg cirkelvormig zijn, d.w.z. dat deze golven zich gedragen alsof ze van een virtueele geluidsbron afkomstig zijn. Constructie van dit punt geeft ongeveer hetzelfde punt dat wij volgens de theorie uit het eerste gedeelte hadden gevonden. Al is dit geen bewijs, dan is het toch een sterk argument dat het gebruik van licht- in plaats van geluidsgolven binnen de grenzen die aangenomen zijn, is toegestaan,

Concludeerende meen ik te mogen vaststellen, dat het bij het ontwerpen van een gehoorzaal gewenscht is, reeds vroegtijdig de ontwerpen aan een acoustisch vooronderzoek te onderwerpen, zoodat de fouten, welke aan het licht komen, zonder veel kosten veranderd kunnen worden. De hiervoor in aanmerking komende methoden zijn die der schaduwfotographie en de methode met het lichtmodel.

Met de schaduwfotographie kan gecontroleerd worden, of de gereflecteerde geluidsgolven binnen $1/15$ sec. na het directe geluid den hoorder bereiken, terwijl tevens beziën wordt welke gedeelten van de zaal niet door de gereflecteerde golven bereikt worden. Bovendien kan men de plaats aangeven waar reflectie plaats vindt van te laat aankomende golven, of ontoelaatbare geluidsconcentratie, of doode hoeken ontstaan. Het is gewenscht meer dan 1 modeldoorsnede te maken voor een volledig onderzoek. In ieder geval minstens 1 verticale en 1 horizontale doorsnede.

Behalve de controle op de tijdsverschillen, waarmee de verschillende golven aankomen, hetgeen hoofdzakelijk uit de verticale doorsnede wordt bepaald, volgt tevens uit de combinatie van horizontale en verticale doorsnede, welke deelen van de wanden en zoldering deelnemen aan de nuttige reflectie, d.w.z. welke vlakken de golven zoodanig kaatsen, dat de gekaatste golven met een tijdsverschil van ten hoogste $1/15$ sec. met het directe geluid bij den hoorder aankomen. De vlakken welke niet aan de nuttige

reflectie deelnemen, kunnen dan met absorptiemiddelen geprepareerd worden, zoodat de galn van de zaal de juiste waarde verkrijgt.

Met behulp van het lichtmodel kan de gunstigste plaats voor de luidspreker of voor het sprekersgestoelte vastgesteld worden, terwijl door omrekening van de zwarting van het gevoelige papier de intensiteitsverschillen van het geluid in de zaal kunnen worden nagegaan. Dit kan aanleiding geven tot wijzigingen van plaats en grootte van balkons en de aan de nuttige reflectie deelnemende wanden, teneinde de geluidsverdeling meer egaal te maken.

4. Aanhangsel.

Is de vorm van de zaal op de in dit artikel beschreven wijze vastgelegd, dan zijn tevens bekend de vlakken, welke aan de nuttige geluidsreflectie deelnemen.

Met de formule van Sabine ($t = \frac{V}{6 A}$) kan dan het totale absorbeerend vermogen van de zaal, uitgedrukt in m^2 open raam, berekend worden, daar het volume bekend is en de nagalmtijd gekozen wordt in verband met het doel der zaal. Over het algemeen zal men de nagalmtijd van bioscoopzalen korter kiezen dan van schouwburgzalen, terwijl voor concertzalen de nagalmtijd weer langer kan zijn. Wenscht men de zalen voor meerdere doeleinden te gebruiken, dan zal men een middenweg moeten kiezen, of wel een constructie toepassen, waarmee de nagalmtijd van de zaal veranderd kan worden, b.v. door draaibare paneelen aan de achterzijde der zaal of/en aan de wandzijde aan te brengen, die aan de eene zijde een hooge absorptie-coëfficiënt bezitten en aan de andere zijde een zeer lage.

Het totaal aantal m^2 open raam uit de formule van Sabine berekend, moet verminderd worden met de absorptie van de aankleding welke de zaal zal krijgen. Daarna resteert het aantal m^2 open raam, dat men met absorptiemiddelen aanbrengt, terwijl tevens de plaatsen, waar dit materiaal moet aangebracht worden, zijn vastgelegd daar dit niet aangebracht mag worden op de wand, welke aan de nuttige reflectie deelneemt.

Onder de aankleding der zaal dient men niet alleen de loopers, kleeden, gordijnen e.d. te verstaan,

doch eveneens de stoelen en het aanwezige publiek. Het is daarom gewenscht de theaterstoelen dusdanig te kiezen, dat de onbezette stoel ongeveer de zelfde absorptie heeft als de bezette stoel.

De nagalmtijd is dan voor de slecht bezette zaal geheel of nagenoeg geheel de zelfde als voor de volle zaal. Bij slechte bezetting klinkt de zaal dan niet hol. Het is echter te betreuren, dat nog weinig over de absorptie van theaterstoelen gepubliceerd is, terwijl de fabrikanten geen gegevens bezitten. Het zal noodzakelijk zijn, dat deze er toe overgaan hun stoelen acoustisch te laten onderzoeken.

Bedeekt men de wanden gelijkmatig, dan is direct de absorptie-coëfficiënt van de te gebruiken materialen vastgesteld. De eischen, waaraan de absorptie-materialen uit bouwkundig oogpunt moeten voldoen, dus afgescheiden van hun acoustische eigenschappen, zijn geformuleerd door architect J. W. Janszen in zijn rede op den Bouwacoustiekdag (November 1935) te Delft, waarbij hij de volgende 10 eischen aan een absorptiemiddel stelde. Van de thans in den handel zijnde acoustische pleisters zullen er weinig zijn, die aan al deze eischen voldoen, doch in verband met het doel der zaal zal het misschien mogelijk zijn verschillende hierop te laten vallen.

Een geluidabsorbeerend materiaal moet :

1. Geschikt zijn om in een bouwwerk aan te brengen.
2. Goede bevestigingsmogelijkheid bieden aan de gebruikelijke metsel- en betonconstructies.
3. Geen zichtbare werking vertoonen, ook niet bij groote oppervlakken.
4. Groote duurzaamheid bezitten.
5. Geen mogelijkheden bieden voor nesten van raten, muizen en ander ongedierte.
6. Geen schadelijke werking uitoefenen op pleister, metalen, verf of hout.
7. Niet vocht aantrekkend zijn.
8. Behoorlijk aanzien hebben.
9. Mogelijkheden bieden tot gemakkelijke reiniging zonder beschadiging van het oppervlak.
10. De mogelijkheid bieden om het oppervlak met geringe kosten te vernieuwen of te verfrissen, zonder dat de acoustische eigenschappen daarmede verminderen.

