

# GELUIDCONCENTRATIE VEROORZAAKT DOOR GEKROMDE OPPERVLAKKEN

In de zaalakoestiek is focussing, veroorzaakt door geluidreflecties tegen concaaf gekromde vlakken, een bekend probleem. Ofschoon gekromde vlakken in de hele geschiedenis van het bouwen gevonden kunnen worden, komen ze in de moderne architectuur steeds meer voor, dankzij hedendaagse ontwerp-, materiaal- en fabricagetechnieken. Focussing kan plaatselijk leiden tot onder meer zeer hoge geluidniveaus, kleuring door verschillende versterking van verschillende frequenties of een echo ten gevolge van het looptijdverschil tussen het direct geluid en de sterke reflectie. Alhoewel binnen de zaalakoestiek het fenomeen geluidconcentratie bekend is, is dit niet het geval voor de mate van versterking in het focuseringspunt en het geluidveld rondom het focuseringspunt. In dit artikel wordt ingegaan op deze focussing, met name ten aanzien van de vraag hoe hoog de geluiddruk is in het brandpunt en wat de omvang is van het gebied waar deze focussing optreedt. Het artikel is een samenvatting van een recent afgerond promotieonderzoek [1].



dr. ir. M.L.S. (Martijn)  
Vercammen, Peutz bv,  
Mook

## GEOMETRISCHE AKOESTIEK

In het geval een geluidbron zich in het middelpunt van een bol bevindt zal het door de bol gereflecteerde geluidveld zich weer concentreren in dit middelpunt. Op basis van geometrische akoestiek zal de geluidenergie zich in één punt concentreren met een oneindig klein oppervlak, hetgeen in beginsel leidt tot een oneindige geluiddruk. In werkelijkheid zal deze geluiddruk eindig zijn. Dit geval illustreert één van de beperkingen van geometrische methoden. Een andere, meer praktische, beperking is dat computerprogramma's die werken met spiegelbronnen of met stralenmodellen, over het algemeen niet in staat zijn met gekromde vlakken te werken. Deze vlakken worden gesegmenteerd ingevoerd waardoor het resultaat afhangt van de segmentering. Een derde reden voor onjuiste resultaten binnen het concentratiegebied is het optellen van geluidenergie in plaats van geluiddruk (met amplitude en fase). Stralenmodellen zijn gebaseerd op geluidenergie.

Buiten het concentratiegebied is het echter wel degelijk mogelijk met geometrische methoden het geluidniveau van de reflectie te bepalen. Een praktische formule is:

$$\Delta L_r = -10 \lg \left( \frac{1}{\left( \frac{1}{u} + 1 \right) R_x \cos \theta_x} - 1 \right) - 10 \lg \left( \frac{1}{\left( \frac{1}{u} + 1 \right) R_y \cos \theta_y} - 1 \right) \quad (1)$$

Hierin is:

- $\Delta L_r$  versterking van het geluidniveau van de reflectie ten gevolge van de kromming (dus 0 dB voor een vlakke plaat) [dB]
- $u, s$  afstand van bron en ontvanger tot het reflecterende vlak [m]
- $R_{x,y}$  straal van het gekromde vlak in x of y richting [m]
- $\theta_{x,y}$  hoek van inval in x of y richting

Voor cilindersegmenten is slechts een van de twee termen van toepassing ( $R_y = \infty$ ).

## GOLVELDBENADERING

Binnen het concentratiegebied is een golfveldbenadering nodig. Een methode om, rekening houdend met het golfkarakter, de geluiddruk ten gevolge van de reflectie te bepalen is de Kirchhoff integraal. Op basis van het tweede theorema van Green is af te leiden dat voor ieder punt A binnen een volume de geluiddruk is te bepalen uit de druk en deeltjessnelheid op het oppervlak S van dit volume:

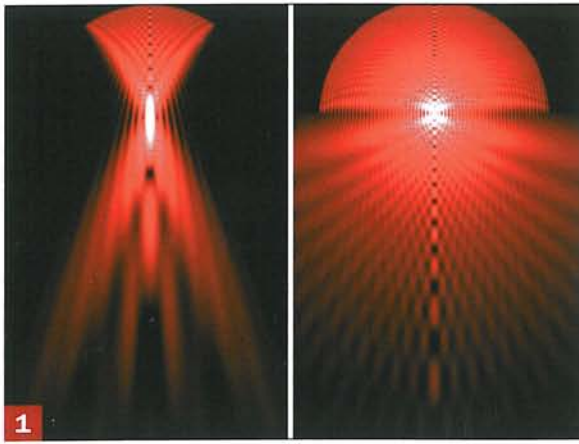
$$p(\vec{r}_A) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left( p(\vec{r}) \frac{1 + jku}{u} \cos \varphi \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_A|}}{|\vec{r}-\vec{r}_A|} + j\omega \rho \cdot v_n(\vec{r}) \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_A|}}{|\vec{r}-\vec{r}_A|} \right) dS \quad (2)$$

Hierin is:

- $k$  golfgetal  $\omega/c$  en  $c$  is de voortplantingssnelheid van geluid in lucht [m/s]
- $p(\vec{r})$  geluiddruk op het oppervlak, in het punt aangeduid met vector  $\vec{r}$  [Pa]
- $v_n(\vec{r})$  deeltjessnelheid in de richting van de normaal op het oppervlak [m/s]
- $\varphi$  hoek tussen de lijn tussen het punt op het oppervlak en het ontvangpunt en de normaal op het oppervlak

Verondersteld wordt een geluidbron buiten het volume. Bij een monopool geluidbron kunnen de druk en de deeltjessnelheid op het oppervlak op grond van de geometrische uitbreiding van de monopool berekend worden. Indien het oppervlak als een reflecterend oppervlak wordt beschouwd kunnen druk en deeltjessnelheid ten gevolge van een geluidbron binnen het volume als eerste benadering op dezelfde wijze worden bepaald, waarbij de deeltjessnelheid in tegengestelde richting wordt aangenomen. Hierdoor is op het oppervlak de som van invallende en gereflecteerde deeltjessnelheid nul. Ofschoon uitgevoerd voor harmonische signalen, is deze benadering alleen valide voor de eerste reflectie. Voor meervoudige reflecties is het oppervlak 'transparant'. De methodiek is geverifi-





1 Rekenvoorbeeld van de geluiddruk van het gereflecteerde geluid op basis van (2). Links: halve bol ( $\theta_m = \frac{1}{2} \pi$ ), rechts bolsegment ( $\theta_m = \frac{1}{5} \pi$ ),  $R = 5,4$  m, 1000 Hz, getoond  $14 \times 21$  m, kleurbereik: wit  $\geq +10$  dB, zwart  $\leq -20$  dB

eerd met behulp van een metingen van de geluidreflectie ten gevolge van een halve ellipsoïde. Korthedshalve wordt verwezen naar [1].

De Kirchhoff benadering leent zich in ieder geval voor een numerieke benadering, zie bijvoorbeeld figuur 1 en het voorbeeld van de Tonhalle verderop. Hierbij is op te merken dat dit een intensieve berekening is. De Kirchhoff Integraal is verder uitgewerkt in de vorm van mathematische benaderingen voor verschillende geometrieën, onder meer een bol(segment) en een cilinder(segment).

**GELUIDDRUKNIVEAU IN HET CONCENTRATIEPUNT**

Bij een bron in het middelpunt van een bolsegment met straal  $R$  en openingshoek  $\theta_m$  (met  $0 < \theta_m \leq \pi$  is het geluidniveau in het concentratiepunt (tevens het middelpunt van het bolsegment):

$$\Delta L_{1m} = 20 \lg k(1 - \cos \theta_m) \tag{3}$$

waarin:  $\Delta L_{1m}$  geluidniveau in het brandpunt ten opzichte van het directe geluidniveau op 1 m van de geluidbron

Opgemerkt wordt dat het geluidniveau van de reflectie alleen afhankelijk is van de frequentie, niet van de straal van de bol.

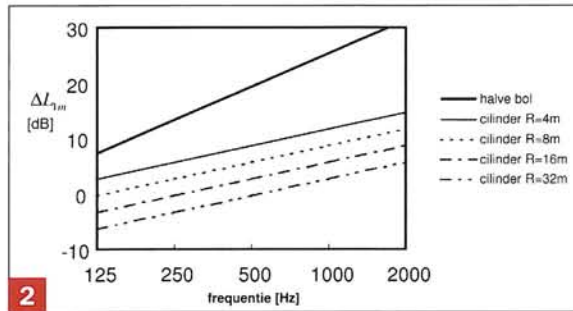
Bij een cilindersegment met straal  $R$  is het geluidniveau in het concentratiepunt (op de middenas van de cilinder):

$$\Delta L_{1m} = 20 \lg \left( \frac{\theta_m}{\pi} \right) + 10 \lg \left( \frac{\pi k}{R} \right) \tag{4}$$

Dit is van toepassing mits de lengte van de  $l$  cilinder tenminste bedraagt:  $l > \sqrt{\lambda R}$  (waarin  $\lambda$  de golflengte  $c / f$ ).

Figuur 2 laat het geluidniveau in het concentratiepunt in een cilinder zien voor een halve bol en een aantal cilinders met verschillende straal. Te zien is dat de geluidniveaus relatief hoog zijn, vooral bij de bol.

Indien de geluidbron zich niet in het midden van de bol of de cilinder bevindt, is er geen sprake van volledige opbouw van de geluiddruk in het concentratiepunt. De



2 Het geluidniveau van de geluidreflectie  $\Delta L_{1m}$ , ten opzichte van het geluidniveau op 1 m van de geluidbron, in het midden of op de middenas van een halve bol (4) en een cilinder met straal  $R = 4, 8, 16$  en  $32$  m (6)

reductie van het geluidniveau in het concentratiepunt  $\Delta L_{1m}$  als functie van de afstand  $x$  van de geluidbron tot het middelpunt van bol is voor  $x < 0,85\sqrt{\lambda R}$  te benaderen met:

$$\Delta L_f = 20 \lg \left( \cos \left( q \frac{x^2}{\lambda R} \right) \right) \tag{5}$$

met  $q = \pi / 2$  voor  $\theta_m \geq \pi / 2$   
en  $q = \theta_m$  voor  $\theta_m < \pi / 2$

Naarmate de afstand tussen bron en ontvanger toeneemt zal het geluidniveau van de reflectie dus iets afnemen. Daarentegen zal de afname van het directe geluidniveau veel sterker zijn. Het verschil tussen direct geluid en geluidniveau van de reflectie en daarmee de waarneming van een echo, zal daardoor over het algemeen toenemen met toenemende afstand tussen bron en toehoorder.

**HET CONCENTRATIEGEBIED**

Indien bekend is hoe groot het gebied is waarbinnen geluidconcentratie optreedt kan op basis hiervan bepaald worden of de relevante ontvangerposities zich binnen of buiten dit gebied bevinden, en daarmee of de geometrische benadering dan wel de golfveldbenadering nodig is. Op basis van de Kirchhoff Integraal is een mathematische benadering opgesteld voor de geluiddruk in een bol en in een cilinder [1]. Op een zekere afstand van het concentratiepunt kunnen hiermee de nulpunten gevonden worden die ontstaan door destructieve interferentie. Deze druknulpunten kunnen beschouwd worden als de begrenzing van het geluidconcentratiegebied. Figuur 3 illustreert voor een rekenvoorbeeld het verloop van de geluiddruk langs de as.

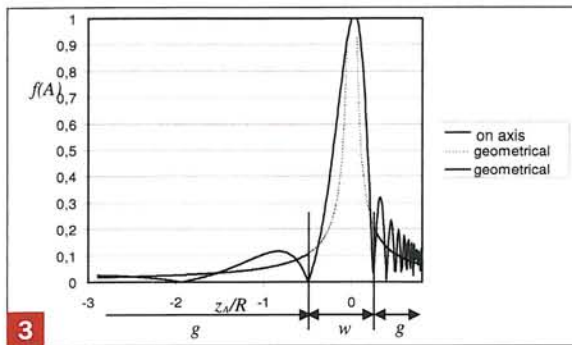
Voor een bol wordt het geluidconcentratiegebied langs de as begrensd door:

$$z_{1/2} = \frac{R}{\pm \lambda \frac{2z_B - R}{R(1 - \cos \theta_m)} - s} - w \tag{6}$$

waarin:  $z_B$  de projectie van de bronpositie op de as van het bolsegment [m]

De afstand  $w$  is de afstand van het concentratiepunt tot het reflecterend vlak en is te bepalen uit de dunne lens formule:





Voorbeeld van de berekende gereflecteerde geluiddruk ten opzichte van de geluiddruk in het concentratiepunt als functie van de relatieve afstand  $z_n/R$  langs de as, met aanduiding van het (g) geometrische veld en (w) het concentratiegebied. Berekening voor de situatie van figuur 1, rechts ( $kR(1 - \cos\theta_m) = 19$ )

$$\frac{1}{w} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R \cos\theta} \quad (7)$$

Loodrecht op de as wordt het geluidconcentratiegebied begrensd door:

$$x_f = \frac{\lambda w}{2R \sin\theta_m} \quad (8)$$

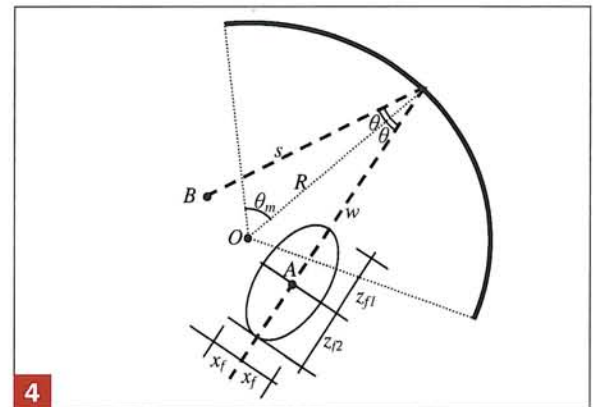
Het concentratiegebied en de gehanteerde parameters worden geïllustreerd in figuur 4.

De omvang van het concentratiegebied neemt sterk toe voor lagere frequenties. Dat betekent dat veelal de geluidconcentratie wordt waargenomen als een laagfrequent verschijnsel, ondanks het feit dat de versterking bij de lage frequenties geringer is dan bij de hoge. Binnen het concentratiegebied is ook het verloop van de geluiddruk te benaderen, zie hiervoor [1].

### VOORZIENINGEN OM DE GELUIDCONCENTRATIE VERMINDEREN

Twee voor de hand liggende technieken om de geluidenergie van een reflectie in een specifieke richting te verminderen zijn het toepassen van geluidabsorptie of van geluiddiffusie. Om te beoordelen of dergelijke maatregelen voldoende effectief zijn is het in eerste instantie nodig om te weten wat de geluidconcentratie wordt zonder deze voorzieningen, zie hiervoor de vorige hoofdstukken. Vervolgens dient het effect van de voorzieningen bekend te zijn.

De reductie  $\Delta L$  van de reflectie van geluidabsorberende materialen kan bepaald worden op grond van de absorptiecoëfficiënt van het materiaal  $\Delta L = 10 \lg(1 - \alpha)$ . In de praktijk zijn reducties tot iets meer dan 10 dB te bereiken. Laagfrequent is dit echter lang niet altijd haalbaar. De geluidreductie  $\Delta L$  van een reflectie ten gevolge van een onregelmatig oppervlak kan bepaald worden uit de z.g. scattering coëfficiënt  $s$  met:  $\Delta L = 10 \lg(1 - s)$ . Voor de bepaling van de scattering coëfficiënt is een laboratorium meetmethode (ISO 17497-1) beschikbaar, gegevens zijn er echter nog slechts mondjesmaat. Wel blijkt uit metingen en boundary element method (BEM) berekeningen dat het moeilijk is een scattering coëfficiënt van 0,9 of meer te realiseren, vooral bij de lage frequenties. Dit betekent dat met diffusie een reductie van de spiegelende reflectie tot maximaal circa 10 dB gerealiseerd kan worden.



Indicatie van het concentratiegebied (grijs) rond het concentratiepunt A, met afmetingen  $z_{f1,2}$  and  $x_f$

Vergelijken we deze 10 dB van hetzij absorptie, hetzij diffusie met de versterking ten gevolge van gekromde vlakken, welke in figuur 2 aangegeven is, dan is te constateren dat vooral bij koepelvormige constructies absorptie of diffusie de geluidconcentratie niet geheel weg zal kunnen nemen. Bij cilindrische constructies daarentegen beduidend lager en is het heel wel denkbaar dat de toepassing van diffusie of absorptie toereikend kan zijn, zoals ook al in diverse praktijkgevallen gebleken is.

Een alternatieve methode om grotere reducties te bereiken dan 10 dB is het geluid in plaats van diffuus te verstrooien, gericht te reflecteren, weg van het concentratiepunt. Om gericht te kunnen reflecteren moet de afmeting van het vlak tenminste een afmetingen hebben van  $2\lambda$ .

In het navolgende wordt een tweetal projectvoorbeelden gegeven.

### ROYAL ALBERT HALL LONDON

De Royal Albert Hall in London heeft een elliptische plattegrond en een ellipsoïde dakconstructie, zie figuur 5 en 6. De zaal biedt plaats aan circa 5000 toeschouwers en heeft een volume van circa 80.000 m<sup>3</sup>. Vanaf de opening van de zaal eind 19<sup>e</sup> eeuw wordt de zaal geplaagd door een sterke echo. Deze echo wordt in belangrijke mate veroorzaakt door het dak. Het verloop van de geometrische geluidreflectie wordt geïllustreerd in figuur 6. Het concentratiepunt ligt ver onder de zaal. Uit formule (6) blijkt dat het publiekvlak buiten het concentratiegebied ligt, ook voor de lage frequenties. Aan de hand van formule (1) is berekend dat de versterking van de geometrische reflectie door de ellipsoïde vorm  $\Delta L_c$  ter plaatse van punt M circa 14 dB bedraagt. Rekening houdend met de geometrische uitbreiding van direct geluid en de reflectie, is berekend dat de reflectie circa 8 dB sterker zou moeten zijn dan het directe geluid. Van de zaal is in het laboratorium van Peutz een schaalmodel gebouwd, schaal 1:12, zie figuur 5. In dit schaalmodel is een verschil tussen direct geluid en reflectie gemeten van circa 11 dB, relatief dicht bij de waarde die op grond van formule (1) bepaald is.

De echo in de Albert Hall ten gevolge van het ellipsoïde dak is weggenomen met convexe schotels (de z.g. mushrooms of flying saucers). Deze zijn rond 1968 in de zaal aangebracht en in het kader van de renovatie, op grond van het schaalmodelonderzoek, aangepast. Het





Schaalmodel 1:12 van de Royal Albert Hall, met de flying saucers

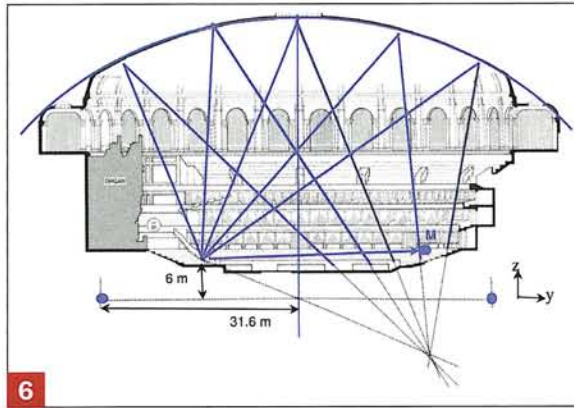
middendeel van het dak is geluidabsorberend uitgevoerd, het bovenste deel van de rand (upper cove) is vrijwel volledig afgeschermd door de schotels en het laagste deel van het dak (lower cove) heeft een veel kleinere radius en is nu in het zicht, zie figuur 7. De foto rechts illustreert dat na renovatie de zichtlijnen naar de upper cove zijn onderbroken door de schotels.

**TONHALLE DÜSSELDORF**

De concertzaal Tonhalle te Düsseldorf is een koepelvormige concertzaal voor circa 1900 toeschouwers, met een volume van circa 16.000 m<sup>3</sup>. Voor de renovatie had de zaal een binnenkoepel bestaande uit houten panelen, zie figuur 8. De panelen waren iets verdraaid zodat ze niet exact de koepelvorm volgden. Desalniettemin was sprake van een zeer sterke echo, waardoor de zaal een slechte naam had en de belangrijkste musici en orkesten er niet meer wilden optreden.

Het middelpunt van de koepelvorm bevindt zich iets boven publieksniveau, hetgeen betekent dat voor bronnen op het podium, het concentratiegebied in het publieksvlak ligt. De op grond van (3) berekende versterking  $\Delta L_{1m}$  van een perfecte koepel bedraagt 13 dB bij 500 Hz. Voor een positie op 8 m van de geluidbron bedraagt het met formule (3) en (5) berekende verschil tussen gereflecteerd en direct geluid 25 dB bij 500 Hz. Dit geldt echter ook voor een perfecte koepel.

Uit berekening van de Kirchhoff Integraal op basis van een numeriek model van de feitelijke, gecompliceerde geometrie (zie figuur 9), is een maximaal verschil tussen gereflecteerd en direct geluid bepaald van circa 15 dB bij



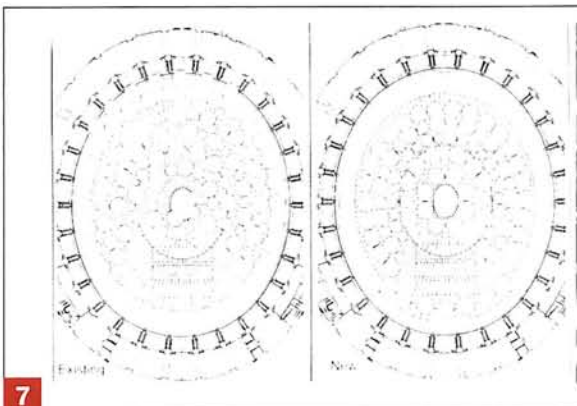
Langsdoorsnede van de Royal Albert Hall met het ellipsoïde dak. De posities van de brandpunten zijn aangegeven met een blauwe stip

500 Hz, zie ook figuur 10. Metingen in de zaal vóór renovatie laten een verschil zien van 14 dB bij 500 Hz.

De in eerste instantie voorgestelde oplossing voor deze echo bestond uit convex gekromde panelen tussen de (voormalige) binnenkoepel en de betonnen buitenkoepel. De binnenkoepel werd daarbij vervangen door metaalgaas die qua afmetingen en positie correspondeerde met de oorspronkelijke houten panelen. Er is een schaalmodelonderzoek, schaal 1:12 uitgevoerd waaruit bleek dat deze oplossing onvoldoende reductie op zou leveren. Ook omdat de bestaande panelen al enigszins diffuserend waren, bleek de reductie beperkt en was nog steeds een verschil van circa 10 dB tussen gereflecteerd en direct geluid aanwezig.

In tweede instantie is een oplossing bedacht met reflecterende panelen onder een hoek van circa 30 graden, die het geluid met een maximale reflectiehoek van circa 60 graden wegreflecteren. Figuur 11 laat een doorsnede zien, de complexe 3D geometrie en een foto van het schaalmodel met deze oplossing. Geïllustreerd wordt hoe de reflecties weg gericht worden van het concentratiepunt, ofwel direct naar het publiek beneden, ofwel verder de koepel in. Deze oplossing bleek in het schaalmodel de echo weg te nemen.

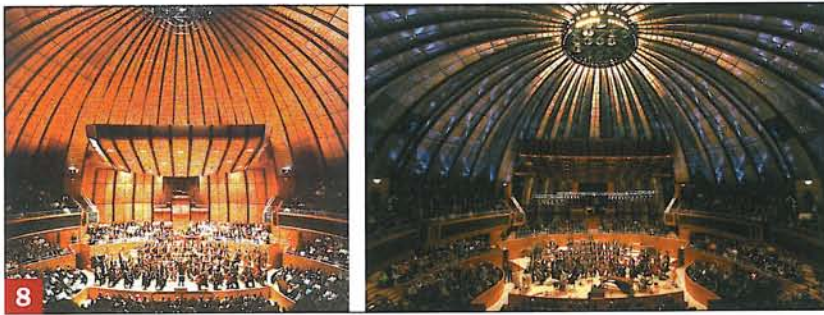
Figuur 8, rechts laat de Tonhalle na renovatie zien. Zichtbaar is het akoestisch transparante metaalgaas en in mindere mate de achterliggende, blauw aangelichte reflecterende panelen. De echo bleek verdwenen. En passant zijn



Plattgrond van de flying saucers in de Royal Albert Hall voor (links) en na (midden) renovatie







8 Interieur van de Tonhalle Düsseldorf vóór (links) en na de renovatie (rechts)

ook een aantal andere verbeteringen gerealiseerd, zoals onderlinge hoorbaarheid van de musici op het podium en verlenging van de galm. Musici, publiek en critici zijn enthousiast over de zaal en ook de grote orkesten en solisten komen weer.

### CONCLUSIES

Met de gepresenteerde methode is het mogelijk in de ontwerpfasen een prognose uit te voeren van de te verwachten geluidconcentratie. De focusering ten gevolge van in twee richtingen gekromde vlakken (bol, ellipsoïde) is beduidend sterker dan die van in één richting (cilinder). In het algemeen zal de bereikbare reductie van de focusering door toepassing van absorptie of diffusie bij in twee richtingen gekromde vlakken onvoldoende zijn om de geluidconcentratie geheel weg te nemen. Bij cilindrische vlakken zal dit mogelijk wel voldoende kunnen zijn.

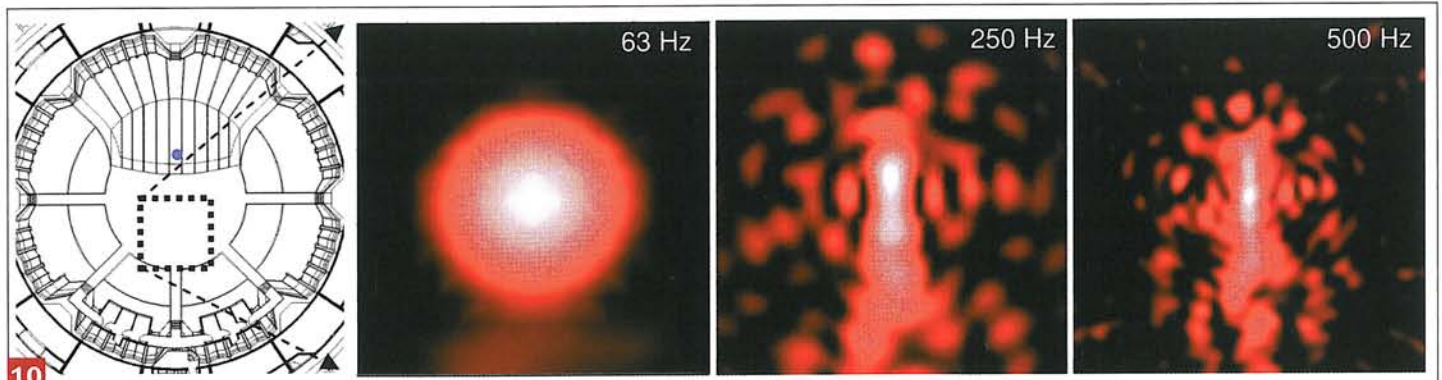


9 Visualisatie van het numerieke model van de Tonhalle Düsseldorf

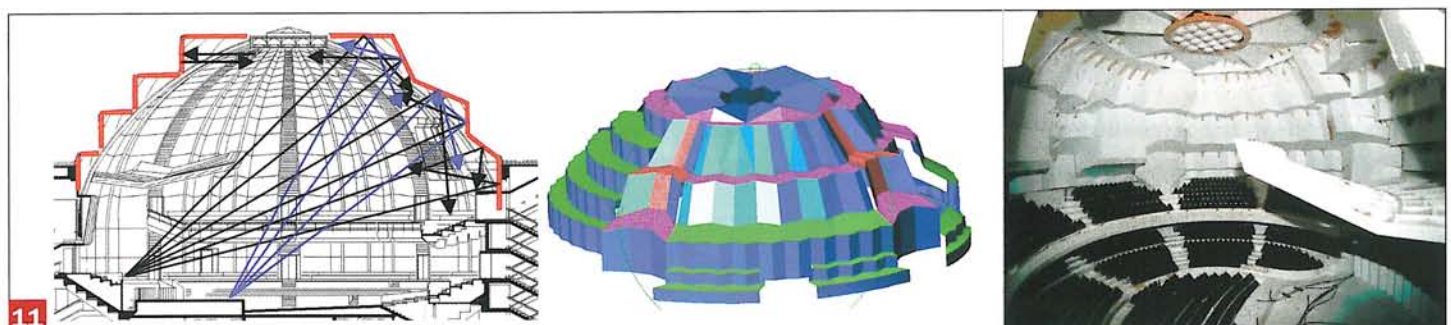
In het geval geluidabsorptie of diffusie onvoldoende is, dient gedacht te worden aan het in een andere richting reflecteren met schuin geplaatste klankkaatsers of meer ingrijpend, aan herziening van het ontwerp. Bij voorkeur dienen mogelijke focuseringseffecten ten gevolge van gekromde vlakken vanaf het begin van het ontwerp beschouwd te worden.

### BRONNEN

- [1] Vercammen, M.L.S., Sound concentration caused by curved surfaces, proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, Bouwstenen 163, 2012, <http://alexandria.tue.nl/extra2/732483.pdf>
- [2] Rindel, J., Attenuation of sound reflections from curved surfaces", Proc. 24th Conf. on Acoustics, Strbské Pleso, 1985
- [3] Kuttruff, H., Room acoustics, Elsevier Science Publ., 1973, (fourth edition, Taylor & Francis, London, 1999)



10 Links: plattegrond Tonhalle Düsseldorf met aanduiding van het berekende deel van het publiekvlak en de bron op het podium (blauwe stip). Rechts: met formule (2) berekende geluiddruk (dB re 1m) voor 3 frequenties



11 Renovatieconcept van de Tonhalle Düsseldorf. Links: doorsnede, midden 3D visualisatie van de reflectorgeometrie, rechts: foto schaalmodel 1:12