

Ruimteakoestische modelvorming

Ruimteakoestisch modelleren kan in de praktijk grofweg op 3 manieren, van globaal (statistisch, energiebalans) naar medium (geometrische benadering) tot zo waarheidsgetrouw mogelijk, inclusief het golfkarakter van geluid. Aan de hand van het project Kulturpalast Dresden laten we zien hoe wij gebruik maken van de verschillende niveaus van modellering.

Door: Margriet Lautenbach en Martijn Vercammen

Over de auteurs:

Margriet Lautenbach en Martijn Vercammen zijn beiden werkzaam bij Peutz bv, afdeling zaalakoestiek

VOORAFGAAND AAN HET MODELLEREN

Een model is een informatieve representatie van een object, persoon of systeem. Een model is in wetenschappelijke zin altijd bedoeld om de werkelijkheid zo veel mogelijk na te bootsen om te kunnen voorspellen hoe de werkelijkheid zal uitpakken na het nemen en uitvoeren van een aantal beslissingen. Dat geldt ook voor ruimteakoestiek.



FIGUUR 1: CONCERTZAAL KULTURPALAST DRESDEN BIJ DE OPENING IN 2017

Een model geeft echter een heleboel antwoorden niet. Wat je wilt bereiken bijvoorbeeld, daar vertelt een model je niets over. Veel wettelijke eisen of richtlijnen voor ruimteakoestiek zijn er niet. Hoe belangrijker de ruimteakoestiek voor de functionaliteit van een ruimte, hoe minder handvatten er zijn, lijkt het. Het blijft bij een norm NEN-EN-ISO 3382-1 die beschrijft hoe een aantal akoestische grootheden gedefinieerd worden en gemeten (en dus gemodelleerd), kunnen worden, maar deze norm beschrijft niet welke waarden deze grootheden zouden moeten hebben voor een bepaalde functionaliteit als symfonische muziek.

Het stellen van geschikte ruimteakoestische eisen voor een specifieke ruimte is een uitdaging op zich. Het zal evident zijn dat de doelstelling niet uit het model rolt. Toch is het handig om de doelstelling vast te leggen vóór iemand aanvangt met het modelleren, al is het maar om te voorkomen dat de doelstelling niet (mede) gevormd wordt door de uitkomsten van het model.

Voor een symfonische concertzaal, zoals het Kulturpalast Dresden (figuur 1), bestaat het opstellen van eisen uit literatuuronderzoek, zoals¹, gesprekken met de toekomstige gebruikers (vooral musici en dirigent), het met hen beluisteren van concerten in voorbeeldzalen en laten invullen van enquêtes tijdens het luisteren. Juist door luisterexercities kunnen we een relatie leggen tussen hoe musici luisteren en wij akoestische parameters meten en berekenen. Daarmee kunnen we ook hun gewenste klankbeeld vertalen in ruimteakoestische doelstellingen.

HET EERSTE MODEL: EEN EENVOUDIG REKENSOMMETJE

Voor de betrokken musici van een nieuw te bouwen concertzaal is de ruimteakoestiek van fundamenteel belang. De zaal is hun gezamenlijke instrument waarin de noten moeten samensmelten tot één geheel. De opdrachtgever neemt de wensen van de musici over het algemeen zeer serieus, waardoor de ruimteakoestiek niet zelden in het middelpunt van de belangstelling staat. Dat maakt het ontwerpen van de ruimteakoestiek een verantwoordelijke taak, die vaak ook door alle betrokkenen zo gevoeld wordt. Iedereen wil graag zo veel mogelijk zekerheid vooraf. Daardoor krijgen wij opdracht-technisch gezien volop ruimte om de mogelijke modelleringstechnieken maximaal te benutten. Alle niveaus van modellering worden tijdens het ontwerpproces doorlopen. Zo ook voor Dresden. En dat begint met een eenvoudig sommetje.

De winnende architect, gmp und partners uit Berlijn, had een concertzaal voor ogen waarbij de publieksvlakken op oplopende stoelrijen rondom de musici gedrapeerd waren, een zogenaamde terrassenzaal. Direct achter de laatste stoelrijen begon het plafond als een symmetrische tegenhanger van de oplopende vloer: het geheel deed denken aan de geborgenheid van een mosselschelp. Dat idee sprak de opdrachtgever enorm aan.

Een eenvoudige berekening van de nagalmtijd $T(1)$ met een theoretische benadering voor de luidheid geeft snel inzicht wat er



voor volume V nodig is om in een met publiek bezette situatie (de onvermijdelijke absorptie A) een nagalmtijd te realiseren van gemiddeld 2,0 s en deze te combineren met een luidheid G van +5 dB (2)

$$T = \frac{V}{6A} \text{ [s]} \quad (1)$$

$$G = 31 - 10 \log \left(\frac{V}{24T} \right) \text{ [dB]} \quad (2)$$

Deze waarden voor nagalmtijd en luidheid zijn niet alleen een gemiddelde van een aantal uitstekend beoordeelde concertzalen, het past bij het geluidniveau dat musici willen laten horen als ze in groot symfonische samenstelling forte spelen: ca. 90 dB(A).^{2,3,4}

Voor het ontwerp van het Kulturpalast betekende deze wenselijke combinatie van nagalmtijd en luidheid dat het volume flink vergroot zou moeten worden van 16.000m³ tot zo'n 19.000m³. En omdat een homogeen geluidveld (zie volgende paragraaf) gebaat is bij een compact volume, had het ontwerp meer hoogte nodig.

Zo kunnen eenvoudige formules leiden tot heldere uitgangspunten en significante aanpassingen voor het ontwerp van een concertzaal. Deze modelvorming slaan we daarom, ondanks beschikbare ingewikkelder rekenmodellen, nooit over.

HOMOGEEN, ISOTROOP, SCHROEDER EN ECHO'S

Elke akoestiek heeft geleerd dat bovengenoemde formules alleen gelden in een diffuus geluidveld. We hebben het immers over statistische benadering van ruimteakoestiek, waarbij we niet kijken naar individuele reflecties, diffractie of interferentie. We beschouwen alleen de energiebalans voor de ruimte als geheel.

Een diffuus geluidveld is homogeen en isotroop: de geluiddruk en de richting van de geluidintensiteit is overal in de ruimte gelijk. Om op alle luisterposities in de zaal een optimale balans (cd-kwaliteit) te realiseren van de verschillende instrumenten op het podium (doorgaans zo'n 85 bronnen), is juist een gelijkmatige verdeling van het geluid en dus dat diffuse geluidveld een noodzakelijke doelstelling.

Vanuit die doelstelling redenerend kun je derhalve bij de eerste berekeningen uitgaan van de theoretische modellen voor een diffuus geluidveld.

Daarnaast geldt dat bij bovengenoemde waarden voor onze concertzaal de Schroeder-frequentie 20 Hz is. Boven deze frequentie zijn er voldoende overlappende eigenfrequenties. Er is derhalve een geringe variatie van geluiddruk als functie van de frequentie en de plaats in de ruimte. Oftewel: het kan geluidveld kan statistisch benaderd worden.

Dit betekent echter niet dat we voor een concertzaal uit kunnen gaan van vlakke reflecterende wanden en dat het dan wel goed komt met een gelijkmatige geluidverdeling. Een concertzaal is dermate groot dat een reflectie van een vlakke publieksachterwand op het podium terugkomt als een hoorbare echo. Een concertzaal is ook zeker niet gevrijwaard van potentiële flutterecho's tussen parallelle reflecterende vlakken. En een concertzaal heeft per definitie een ongelijkmatige verdeling van de absorptie: het is vooral de 'vloer' die absorberend is: de stoelen en het publiek. Die kun je moeilijk over de wanden en het plafond verdelen om een gelijkmatiger geluidveld te realiseren.

Resumerend: het simpele statistische modelletje is zonder meer noodzakelijk, maar volstaat niet.

EEN GOLF IS NIET RECHT: STRALENMODELLEN

Dat er ontwerp-technische maatregelen nodig zijn om een gelijkmatige verdeling van het geluid over het publieksvlak te realiseren, blijkt duidelijk uit de volgende stap van modellering: de geometrische benadering van ruimteakoestiek.

Bij de geometrische benadering van akoestiek wordt geluid gemodelleerd als energie-"pakketjes" die zich vanaf een bron rechtlijnig (als stralen) voortplanten met de snelheid van geluid. Het pakketje verliest energie als het reflecteert tegen een absorberend oppervlak, dan verdwijnt een met de absorptie evenredig deel van de energie. Daarnaast verliest het pakketje energie door luchtabsorptie via de afgelegde weg. Elke ontvanger heeft een bepaald volume. Energiepakketjes die binnen een bepaald tijdsframe dit volume passeren, worden geteld en zo ontstaat een histogram van geluidenergie versus tijd, welke een beetje lijkt op een (gekwadrateerde) impulsresponsie.

In commercieel verkrijgbare rekenprogramma's wordt deze "ray-tracing" gecombineerd met de spiegelbronmethode (ISM) en "beamtracing", welke zich beide ook lenen voor het beperkt integreren van de fase-component van geluid voor vroege reflecties. De verschillen tussen rekenprogramma's onderling betreffen over



FIGUUR 2: SCHEMATISCHE LANGSDOORSNEDE KULTURPALAST, LINKS: WEDSTRIJDONTWERP, RECHTS VOORLOPIG ONTWERP

het algemeen de gekozen algoritmes voor geluidverstrooiing bij een reflectie, de reflectie-orde waarbij het ene algoritme overgaat in het andere, de mogelijkheden voor de gebruiker te kiezen uit beschikbare algoritmes en de wat minder zichtbare manieren om de uitkomsten wat meer op de werkelijkheid te laten lijken (bijvoorbeeld door mogelijke uitwassen te onderdrukken).

Hoewel het geheel er vanwege de 3D-modellering van de ruimte geraffineerder uitziet dan de uitkomsten van een spreadsheet voor nagalmtijd, is het verschil tussen model en werkelijkheid nog vrij groot. Desalniettemin kunnen model en werkelijkheid veel overeenkomsten tonen als de invloed van de geometrie dominant is ten opzichte van de invloed door diffractie en interferentie. Daardoor kan deze modelvorming heel bruikbaar zijn: er komt meer informatie beschikbaar over de invloed van de geometrie en de verdeling van absorptie.

Wij hebben in het leren werken met geometrische modellen veel kennis opgedaan bij renovatieprojecten als De Doelen Rotterdam, het Concertgebouw Amsterdam, de Staatsoper Berlijn, de Opera Keulen, de Gasteig München, De Vereeniging Nijmegen en de Oosterpoort Groningen". Daar hebben we eerst ruimteakoestische metingen verricht waarmee we later onze modelvorming konden vergelijken. Dat gaf veel inzicht de 'stelschroeven' van de algoritmes, de invloed van de vlakgrootte in de modelvorming en de betrouwbaarheid van resultaten, waarna een dergelijk geome-

trisch model uitstekend ingezet kan worden voor een variantenstudie.

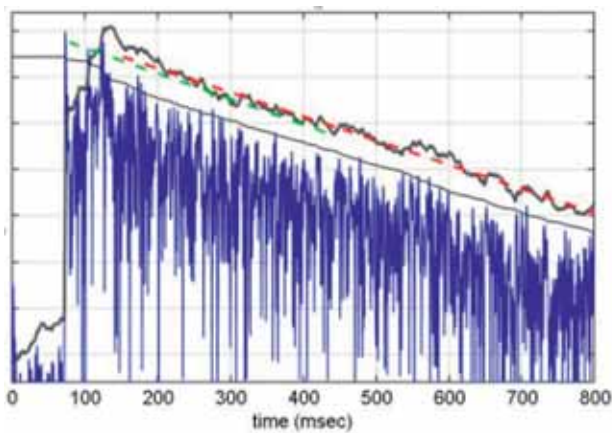
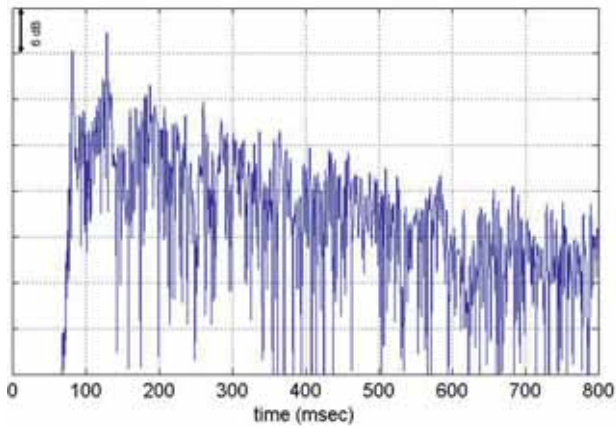
Voor het modelleren van het Kulturpalast maken we uiteraard gebruik van die ervaring. Doel is: met behoud van de gewenste nagalmtijd en luidheid het ontwerpen van een ruimte waarin het geluidveld in plaats en tijd zo gelijkmatig mogelijk is. Voor het ontwerp van het Kulturpalast heeft de geometrische modellering geleid tot onder meer:

- het versmallen van de zaal en het minder steil maken van de hellingshoek voor de publieksrijen; *doel: het realiseren van meer en sterkere reflecties van de wanden rondom, om meer ruimtelijkheid te genereren (een natuurlijk dolby surround effect).*
- het ontwerp van de publieksterrassen; *doel: het voorkomen van te grote absorptievlakken en het ruimtelijke effect verder versterken.*
- het meer naar achter positioneren van het podium; *doel: het aandeel stoelen vóór het podium vergroten, dit is vanwege de richtkarakteristiek van de instrumenten de plaats met de van nature beste balans tussen instrumentgroepen.*
- het introduceren van kleine overstekken in de wandstructuur; *doel: reflecties gedeeltelijk ook weer naar beneden sturen om het aandeel vroege reflecties te vergroten.*
- het ontwerpen en toetsen van een eerste geometrie van de wand- en plafondstructuur; *doel: gelijkmatige verstrooiing van het geluid, het voorkomen van te sterke reflectieclusters en het vermijden van lacunes in het reflectiepatroon.*
- de keuze voor toe te passen materialen; *doel: het realiseren van een nagenoeg vlak nagalmspectrum dat naar de lage frequenties toe gering oploopt voor een mooie klankontwikkeling.*

Ondanks de beperkte modelvorming hebben we zodoende al veel onderzocht, de successievelijke stappen in het ontwerp zijn gezet, maar de invloed van diffractie en interferentie is nog onderbelicht, vandaar de hiernavolgende paragraaf.



FIGUUR 3: LINKS: HOOGFREQUENTE GELUIDBRON: IN HET PODIUM INGEBOUWDE TWEETERS MET HIEROP EEN KOOLSTOF CONUS; 1/4" CONDENSATOR MICROFOONS MET IN DE VOET (VERBREIDING) DE VOORVERSTERKER; PUBLIEK EN MUSICI GEMODELLEERD MET GELUIDABSORBERENDE SCHUIMPYRAMIDES. SCHAALMODEL KULTURPALAST DRESDEN 1:10.



FIGUUR 4 : GEMETEN IMPULSRESPONSIE IN 1 KHZ OKTAAFBAND IN HET SCHAALMODEL VAN HET KULTURPALAST (BOVEN) EN NA REALISATIE (ONDER) VAN RECHTSACHTER OP HET PODIUM NAAR 1E LINKER ZIJBALKON (ORANJE PIJL); METING IN WERKELIJKHEID MET SPECIALE GORDIJNEN OM DE INVLOED VAN HET PUBLIEK TE SIMULEREN.

GOLVEN IN EEN SCHAALMODEL

Schaalmodellen worden in verschillende vakgebieden van de technische wetenschappen gebruikt,⁵ en sinds het begin van de 20e eeuw ook voor ruimteakoestisch onderzoek. Het basisprincipe van een ruimteakoestisch model is dat met een verkleind model van de zaal, in ons geval doorgaans 1:10, en omgekeerd evenredig verhoogde frequenties (dus factor 10) eenzelfde verhouding ontstaat tussen geometrie en golflengte als in de toekomstige werkelijkheid. Door het uitvoeren van metingen kunnen we dan onderzoek doen met behoud van het golfkarakter van geluid.

Het meten van 10x hogere frequenties vraagt natuurlijk om speciaal hiervoor ontwikkelde bronnetjes en microfoonnetjes (figuur 3). Ook de gebruikte materialen en hun eigenschappen moeten meeschalen. Met behulp van een nagalmkamer schaal 1:10 kunnen we de absorptie van materialen en het publiek voor de schaalmodellen testen.

Details tot ca. 10 cm in werkelijke grootte worden gemodelleerd. Dus bijvoorbeeld traptreden worden in het model opgenomen, maar kleinere ornamenten niet. De invloed daarvan valt grotendeels buiten het meetbare gebied, bovendien zou dat te kostenverhogend werken, omdat wij zo'n model als onderzoekstool benutten en het derhalve ook nog wel eens aangepast moet worden.

Wij maken vanuit praktische en gezondheidstechnische overwegingen gebruik van lucht in het model, waardoor rekenkundig gecorrigeerd moet worden voor luchtabsorptie.

In het schaalmodel kunnen vervolgens impulsresponsiemetingen verricht worden zoals we dat ook in werkelijke zalen doen. Naast

het reflectiepatroon kunnen de ruimteakoestische parameters volgens de norm gemeten en door ons beoordeeld worden.

Figuur 4 toont een vergelijking van de gemeten impulsresponsie in het schaalmodel respectievelijk het Kulturpalast na oplevering, gelijke bron- en ontvangerpositie.

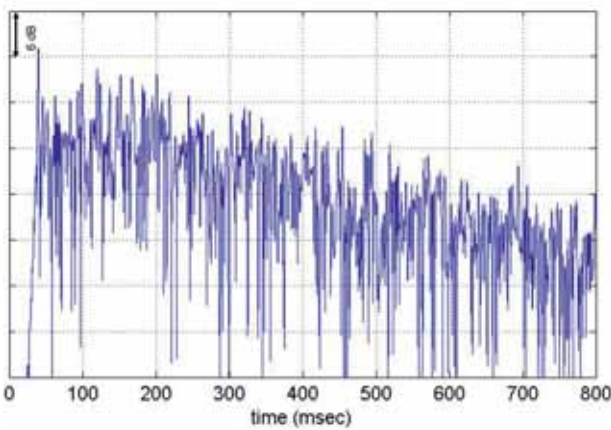
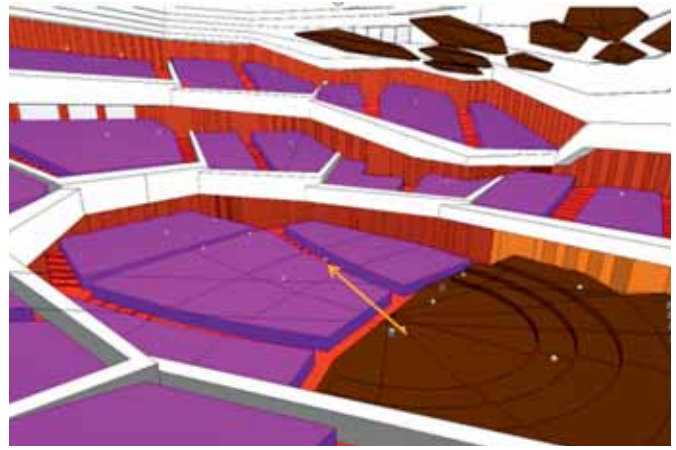
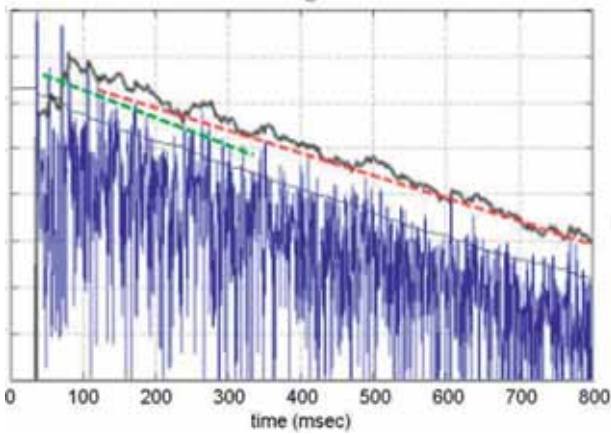
Het schaalmodelonderzoek voor het Kulturpalast heeft in meerdere fases plaatsgevonden, waarbij tussen de fasen het model geometrisch is aangepast. Het onderzoek heeft in chronologische volgorde geleid tot:

- een veel sterker diffuserende plafondstructuur
- klankkaatsers boven het orkest
- het anders uitrusten van de zigzag-structuur van de wanden achter het 1e balkon
- een verdere uitwerking van de diffuserende plafondstructuur

De laatste twee aanpassingen waren nodig omdat in het midden van het parket een te sterk reflectiecluster te laat in tijd arriveerde. Dit late en langdurige cluster van reflecties werd veroorzaakt door interferentie waardoor het in het geometrische model absoluut niet als probleem herkend werd (figuur 5). Het schaalmodel was derhalve van grote waarde voor het akoestisch ontwerp van de zaal.

Naar aanleiding van het schaalmodelonderzoek is het ontwerp tweemaal vrij rigoureuus veranderd. Zoiets heeft veel impact op een ontwerptraject. Gmp vertelde later: "het was meerdere keren slikken om te horen dat we verder aan het zaalontwerp moesten werken, achteraf gezien is het ontwerp er echter met elke stap beter van geworden".

Na 3 series van schaalmodelmetingen is het ontwerp goedge-



FIGUUR 5: BOVEN: TIJD-HISTOGRAM VAN DE GELUIDOVERDRACHT IN DE 1 KHZ OKTAAFBAND VAN RECHTSVOOR OP HET PODIUM NAAR LINKSVOOR IN DE ZAAL (ORANJE PIJL); ONDER: IMPULSRESPONSIE VOOR DEZELFDE OVERDRACHT IN HET SCHAALMODEL.

keurd en uitgevoerd. Uit de opleveringsmetingen blijkt dat alle doelstellingen gehaald zijn. Musici en publiek zijn uitermate tevreden en de zaal is in de pers enthousiast onthaald: “Romantiek des 21 Jahrhunderts” volgens de Süddeutsche Zeitung.

RUIMTEAKOESTIEK VOOR DE TOEKOMST

Decennia achtereenvolgend heeft de ontwikkeling van ruimteakoestische rekentechnieken zich effectief beperkt tot het verfijnen van de geometrische modellen. Met het toenemen van de reken capaciteit van computers en opgedane ervaring bij kleinschaliger akoestische onderzoeken (zoals bandengedruide en geluidafstraling in auto-interieurs) wordt er de laatste jaren steeds meer onderzoek gedaan naar de toepassing van onder meer finite element models (FEM), boundary element models (BEM) en finite-difference time-domain models (FDTD) en combinaties ervan voor ruimteakoestiek. De resultaten ervan worden interessanter. Maar het blijkt ook nog steeds hoe ontzettend complex ruimteakoestiek is. Alleen al het verschil in golflengtes voor het grote frequentiebereik maakt de modelvorming heel complex voor genoemde technieken. Daarnaast is de input voor de rekenmodellen niet meer de, relatief eenvoudig te meten, absorptiecoëfficiënt, maar de veel ingewikkelder vast te stellen impedantie, waar voor veel (samenstelling van) materialen weinig over bekend is. Vervolgens is het rekenresultaat per frequentie heel gedetailleerd, maar het van belang zijnde frequentiegebied voor muziek omvat heel veel frequenties. Evengoed beginnen ook wij gebruik te maken van deze technieken,⁸ de rekentechnische toekomst komt ook voor ons steeds dichterbij, maar voorlopig meten we een hele zaal nog met schaalmodellen.

TOT SLOT

Dit artikel legt uit hoe we complexe materie als ruimteakoestiek proberen te onderzoeken en te modelleren. Daarin kunnen we

natuurlijk nooit compleet zijn. Omwille van de leesbaarheid hebben we ons beperkt tot de grote lijn bij één soort ruimte. Bij andere typen ruimten kunnen er andere uitdagingen zijn, zoals gekoppelde ruimten in operazalen (toneelhuis en zaal), waarbij in de energetische modelvorming de energie-uitwisseling tussen deze ruimtes wordt meegenomen.⁹ Maar de aanpak, drie modeleringsniveaus, van grof naar fijn, blijft dezelfde.

Meer informatie over het akoestische ontwerpproces van het Kulturpalast is te vinden in ¹⁰.

REFERENTIES

- 1 Beranek, L.L. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. Springer, 2nd edition, 2004
- 2 Beranek, L.L. The sound strength parameter G and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 129, No. 5, May 2011
- 3 Rindel, J.H., New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance, Forum Acusticum, Krakow, Poland September 7-12, 2014
- 4 J. Meyer, Raumakustik und Orchesterklang in den Konzertsälen Joseph Haydn's. Acustica 41, 1978, 145-162.
- 5 Addis, B. (ed.), Physical Models: Their historical and current use in civil and building engineering design, Wiley, 2020
- 6 Stefan B., Ahrens J. and Hamilton B., Incorporating source directivity in wave-based virtual acoustics: Time-domain models and fitting to measured data, Jasa 146, 2692 (2019)
- 7 NAG lezingendag Masterclass Modelleren, long abstracts te vinden op: <https://www.nag-acoustics.nl/masterclass-modelleren-26-november-2020-2/>
- 8 M.L.S.Vercammen, Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation, Acta Acustica 96 (2010)
- 9 Vercammen, M., Lautenbach M. Staatsoper unter den Linden, Proc. Inst. of Acoustics, Vol.40, Pt 3. 2018
- 10 Lautenbach M., Vercammen, M., Kulturpalast Dresden, Proc of the Institute of Acoustics, Vol.40, Pt 3. 2018