

AFSTUDEERARTIKEL

BREEDBANDABSORPTIE MET GEKOPPELDE KWARTGOLFLENGTEBUIZEN

EEN ONDERZOEK NAAR 3D-GEPRINTE PRODUCTEN VOOR BINNENAKOESTIEK

Het akoestisch klimaat heeft een grote impact op de bruikbaarheid van een ruimte en wordt veelal over het hoofd gezien tijdens het architectonisch ontwerpproces. Bestaande akoestische producten, zoals paneel resonatoren, schuimen of spouwconstructies hebben elk hun eigen frequentie doelgebied. 3D printtechnieken zijn in opkomst en hebben voordelen ten opzichte van conventionele productietechnieken, zoals vormvrijheid, de snelheid van model tot product en een rendabele oplage van één product. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om nieuwe producten te ontwerpen die uniek zijn per toepassing en toegespitst worden aan de hand van meetresultaten. Het volgende artikel geeft inzicht in mijn afstudeeronderzoek waarbij ik de combinatie zoek tussen akoestisch ontwerp en 3D print technieken.



T.J.W. (Tom) Scholten
MSc, DPA Cauberg-
Huygen, Rotterdam

Akoestiek wordt vaak gezien als complexe materie, terwijl additive manufacturing wordt gebruikt om complexe vormen te produceren. De twee kunnen elkaar versterken om nieuwe types akoestische producten te maken voor binnenakoestiek. Additive manufacturing staat ook wel bekend als 3D printen en is een techniek die producten laag voor laag opbouwt. Natuurlijk zijn er verschillende processen, maar de methodiek blijft hetzelfde.

Elke ruimte heeft zijn eigen benodigde nagalmtijd die past bij het gebruik, de nagalmtijd aanpassen kan door absorptiemateriaal toe te voegen. Er zijn verschillende producten, zoals schuimen en geperforeerde panelen. Die hebben allemaal een bepaald frequentiebereik en gedrag, maar absorberen nooit voor 100% over het gehele frequentiebereik. Vanwege hun generieke gedrag is het lastig om specifieke frequenties, of staande golven in een ruimte te absorberen.

Kwart golflengtebuizen hebben de eigenschap om juist één specifieke frequentie te absorberen voor 100%, deze kwaliteit heeft als nadeel dat het absorptiebereik erg smal is. Dit smalle absorptiebereik staat recht tegenover het frequentiespectrum dat wij als mensen produceren. In theorie kan breedbandabsorptie gemaakt worden, Frits van Eerden laat dit zien in zijn promotieonderzoek aan de UT in Enschede. Hij schreef zijn onderzoek in 2000, nu zijn we 18 jaar verder, de techniek dus ook.

Ik stelde mezelf de vraag of het mogelijk zou zijn om het principe van gekoppelde kwart golflengtebuizen te gebruiken om efficiënte akoestische producten te ontwerpen, ik koos om additive manufacturing te gebruiken als fabricage techniek om mezelf zo min mogelijk te beperken in zowel het ontwerp als productieproces. Mijn onderzoek is een deel van een groter onderzoek, het ADAM project. ADAM staat voor Acoustic Design by Additive Manufacturing. Het onderzoek is geïnitieerd door de NWO, naast de

TU Delft zijn ARUP, Materialise, Merford en Peutz bij het project betrokken.

ONDERZOEK IN HET KORT

Zoals ieder onderzoek begon mijn onderzoek ook met een literatuurstudie, wat uit twee delen bestond: akoestiek en additive manufacturing. Binnen het eigen onderzoek zijn ook vergelijkbare onderzoeken van voorgangers geanalyseerd, de focus lag hier op de metingen die zij gedaan hebben. Conclusies uit deze analyse konden vervolgens gebruikt worden voor de opzet van eigen metingen. Resultaten uit eigen metingen dienden als input voor de ontwerpfase waarbij een parametrisch CAD model is ontwikkeld dat direct het ontwerp genereert wat geprint kan worden.

DE ESSENTIE VAN GELUID

Geluid nemen wij waar door een fysieke verstoring van een medium, zoals lucht of water. Deze verstoring wordt veroorzaakt door trillingen afkomstig van externe bronnen. De verstoring van het medium kan omschreven worden als hoge en lage drukgebieden die zich verplaatsen, één cyclus van hoog naar laag drukgebied staat beter bekend als de golflengte (λ) terwijl het aantal cycli per seconde wordt omschreven als de frequentie (Hertz). Een toename in luchtdruk ten opzichte van de atmosferische luchtdruk wordt omschreven als geluidsdruk (Pascal). Het menselijk oor is erg gevoelig voor deze drukverschillen, verschillen zo klein als 0,00002 Pascal zijn al merkbaar. Ter referentie: de atmosferische druk staat gelijk aan 100.000 Pascal. Het luchtdrukverschil wordt vanwege deze extremen aangeduid door middel van een logaritmische schaalverdeling beschreven aan de hand van decibellen (dB) wat geen eenheid is maar een verhouding.

ABSORPTIE IN BINNENAKOESTIEK

In een gesloten ruimte botsen geluidsgolven tegen muren en andere objecten. Een deel van het inkomend geluid zal

hierdoor weerkaatsen en een deel zal geabsorbeerd worden. Dit principe wordt beschreven met de verhouding $a + r = 1$, de a in deze verhouding staat beter bekend als de absorptiecoëfficiënt.

Zoals eerder gezegd is de nagalmtijd een belangrijke eigenschap voor de bruikbaarheid van een ruimte. De nagalmtijd beschrijft de tijd waarin het geluidsdrukkniveau met 60 dB daalt nadat een geluidsbron stil is. De nagalmtijd staat nauw verbonden met de aanwezige absorptie in een ruimte, een veelgebruikte formule om te nagalmtijd te berekenen is die van Sabine:

$$T = \frac{1V}{6A} \tag{1}$$

met:

$$A = S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots \tag{2}$$

waarbij:

V = het volume van de ruimte in m^3

A = de som van de wandoppervlakten in m^2

T = de nagalmtijd in seconden

S = de oppervlakte van één absorberend oppervlak

α = de absorptiecoëfficiënt van het absorberend materiaal

Zijn eenvoudige formule beschrijft direct het verband tussen volume en de hoeveelheid aanwezig absorptiemateriaal [3].

ABSORPTIE IN GEKOPPELDE KWART GOLFLENGTEBUIZEN

Er zijn een aantal manieren om geluid te absorberen, de methode gebruikt in het onderzoek berust op kwart golflengtebuizen. Zoals de naam al suggereert gaat het simpelweg om een holle buis met een gesloten einde die bijna exact een kwart van de golflengte is. Bijna omdat bij die lengte nog een klein stukje wordt opgeteld, de zogeheten eindcorrectie [4]. Deze lengte is afhankelijk van de radius van de buis en wordt beschreven als:

$$d = \frac{8r}{3\pi} \tag{3}$$

waarbij:

d = lengte van de eindcorrectie in meters

r = de radius van de buis in meters

De volledige lengte van één buis kan vervolgens als volgt beschreven worden:

$$l = \frac{c}{4f} - d \tag{4}$$

waarbij:

c = de snelheid van geluid (343 m/s)

f = de frequentie in Hz

l = de lengte van de buis in meters

De frequentierespons is zo specifiek omdat er interferentie optreedt in de buis, aan het einde van de buis wordt de geluidsgolf teruggekaatst en interfereert met de inkomende geluidsgolf. Dit is echter niet hoe de buis geluid absorbeert, die gebeurt namelijk door viscoze grenslaag aan de binnenwand van de buis waar de lichtsnelheid

sterk verlaagd wordt. Breedbandabsorptie door kwart golflengtebuizen is in dit onderzoek onderzocht door ze lineair te schakelen, in de achterwand van de eerste buis bevindt zich de opening van de volgende buis.

WAT IS ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing is een formele benaming voor iets wat beter bekend staat 3D printen. In principe is het een techniek die computermodellen rechtstreeks kan produceren, zonder vooropgezet productieproces. De enige vereisten zijn een computer, software en een (3D) printer. Een 3D geprint product wordt in lagen opgebouwd, afhankelijk van de techniek wordt deze laag geprint zoals een conventionele printer, geëxtrudeerd door de printmond of het materiaal wordt gehard door een laser. Vanwege de snelle werkwijze wordt additive manufacture momenteel nog vooral gebruikt als middel om te experimenteren en prototypes te produceren. 3D print technieken zijn te verdelen in verschillende hoofdgroepen, met daar binnen verschillende methodes [1]:

- Liquid polymer systems

Deze methode gebruikt een vat met een vloeibare polymeer, zoals de naam al suggereert. Het kruispunt van twee lasers verhardt het materiaal plaatselijk waardoor de feitelijke vorm ontstaat. Dit proces resulteert in prints met hoge resolutie, daarnaast kunnen ook prints gemaakt worden met verschillende mechanisme eigenschappen binnen één print.

- Molten material systems

Dit is beargumenteerbaar de meest bekende techniek waarbij één of twee spuitmonden gesmolten polymeer extruderen die direct terug gekoeld wordt en zo vastplakt aan de onderliggende laag en uithardt. De tweede spuitmond wordt vaak gebruikt voor het printen van een supportmateriaal. Veel zelfbouwprinters berusten op deze techniek aangezien de materialen goedkoop zijn en de printtijd kort is. Daar staat tegenover dat de prints een lage resolutie hebben en veel supportmateriaal nodig is wat later verwijderd moet worden.

- Solid sheet systems

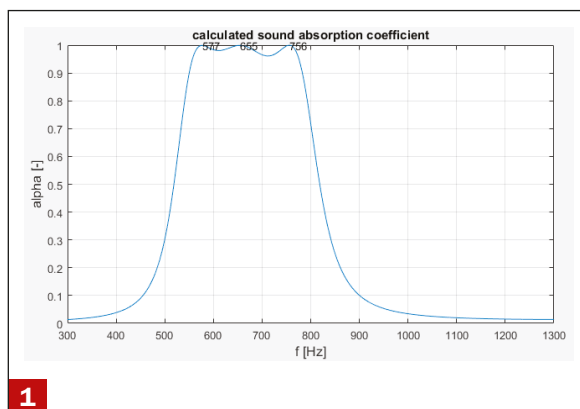
Hier worden de lagen opgebouwd door met een laser uitsneden te maken in plaatmateriaal en die vervolgens te stapelen. Deze platen komen veelal vanaf een grote rol materiaal. De platen worden aan elkaar geplakt door een hars die uithardt bij blootstelling aan warmte.

- Discrete polymer systems

Bij deze techniek worden prints opgebouwd uit hele kleine korrels, of prints worden geëxtrudeerd door een printmond waarin een bindmiddel en korrels gemengd worden en dus zo laag voor laag worden opgebouwd. Of polymeerpoeder wordt uitgehard met een laser. Belangrijk hier is dat een polymeer gebruikt wordt met thermoplastische eigenschappen.

De techniek die in dit onderzoek gebruikt is, valt in de categorie "discrete polymer systems" en wordt Selective Laser Sintering genoemd. SLS gebruikt lasers en een vat met zeer kleine korrels of eigenlijk een poeder. Het poeder wordt uitgehard door een laser, waarna een nieuwe laag er overheen geveegd wordt. Voordeel bij deze techniek is de hoge initiële sterkte en het feit dat onverhard poeder ondersteuning geeft aan de print.





Absorptie coëfficiënt per frequentie



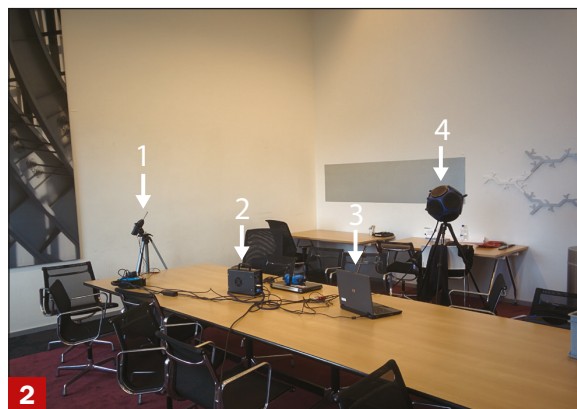
Meetopstelling in de nagalmkamer, faculteit Natuurkunde TU Delft

GELUID SIMULEREN

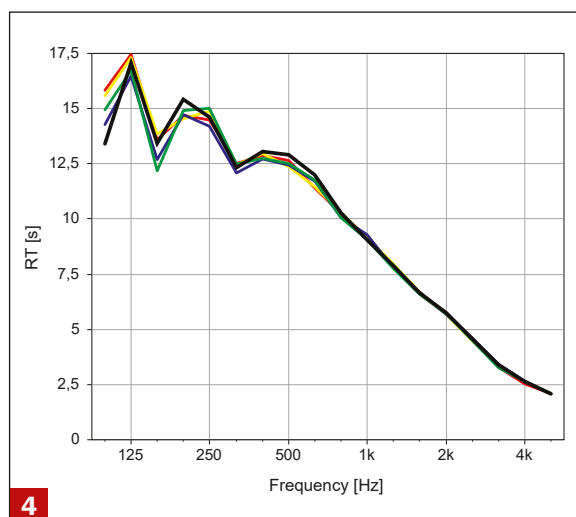
Het lastige aan geluid is het feit dat je het niet kan zien, dit maakt het simuleren van geluid eveneens een uitdaging. Er bestaan natuurlijk softwarepakketten die dat doen, zoals Comsol, maar die zijn niet toereikend genoeg voor mijn applicatie. Gelukkig was mijn begeleidende professor Martin Tenpierik al begonnen in MatLab; zijn werk was een belangrijke basis om op voort te bouwen. Al snel kwam het inzicht dat het handmatig zoeken naar de beste oplossing een tijdrovende bezigheid was. Om tijd en moeite te besparen op de lange duur is daarom besloten om een optimalisatie functie toe te voegen in het script. Deze functie berekent een lokaal maximum binnen vooraf ingegeven grenswaarden. Aanvankelijk leek de functie goed te werken, maar de resultaten die de functie genereerde bleken niet betrouwbaar. Binnen het ADAM-project is de postdoc Fengian Tian verantwoordelijk voor alle softwareontwikkeling. Hij bleek parallel aan mij ook een optimalisatie aan het ontwikkelen te zijn op basis van een evolutionair algoritme. Zijn methode was in staat de geometrie van één buis te berekenen, terwijl mijn functie dat voor meerdere tegelijk kon. Vanwege de betrouwbaarheid is gekozen om verder te werken met zijn optimalisatie. Figuur 1 laat een grafiek uit MatLab zien met geoptimaliseerde waarden.

METEN AAN GELUID

Binnen het onderzoek zijn meerdere typen metingen gedaan, een impedantiebuismeting, veldmeting en nagalmkamermeting. Elk van deze metingen speelt zijn eigen rol in het onderzoek. De impedantiebuismeting dient ter verificatie van een MatLab model dat de absorptie uitre-



Meetopstelling in vergaderruimte 01.West.060, Faculteit Bouwkunde TU Delft



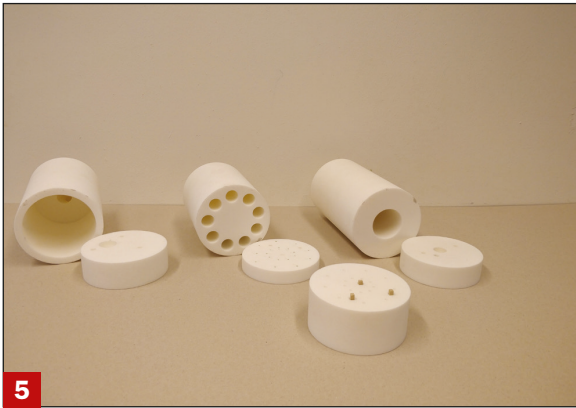
Grafiek met nagalmtijden gecombineerd

kent, daarnaast is de meting een goed testcase om de bruikbaarheid van geprinte geometrieën te controleren.

Het ultieme doel van het onderzoek was een prototype ontwikkelen aan de hand van metingen in een testlocatie en de werking van het prototype vervolgens te verifiëren door een tweede meting. De gekozen testlocatie was een kleine vergaderruimte in de faculteit bouwkunde, gekozen vanwege klachten door gebruikers over slechte verstaanbaarheid. De meetopstelling is te zien in figuur 2, in totaal zijn 6 metingen gedaan bij 2 luidsprekerposities.

Het resultaat is een waarde voor nagalmtijd per 1/3 octaafband wat ik vervolgens kon afzetten tegen de waarde die ik wilde bereiken. Aan de hand van het verschil kon ik met behulp van de optimalisatie berekenen hoeveel gekoppelde buizen ik nodig heb om de nagalmtijd terug te brengen naar een gewenst niveau.

Parallel aan het onderzoek is een meting in de nagalmkamer gedaan in de faculteit van Natuurkunde aan de TU Delft. Het doel van deze meting was de werking van vrij geplaatste kwart golf lengtebuizen onderzoeken. De MatLab code gaat uit van een oppervlak rondom de opening van de buis, aantonen dat er geen oppervlak rondom de opening van de buizen vereist is kan meer ontwerpvrijheid geven in een later stadium. De proefstukken waren gemaakt van 26 mm PVC buis met een einddop en ingeklemd in een houten voet van 140 x 140 mm.



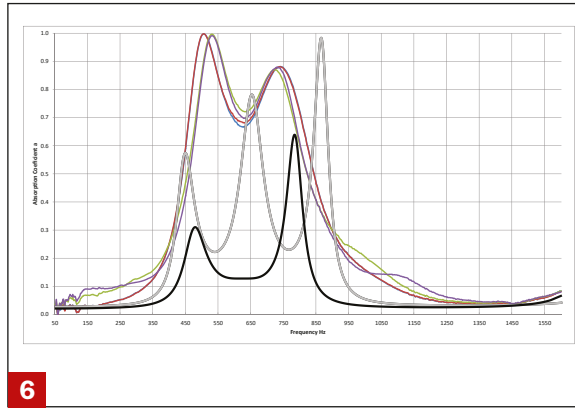
5 Geprinte proefstukken

Vervolgens is een aantal metingen gedaan met telkens 10 buizen meer, optellend van 0 tot 40 stuks. Ten slotte zijn alle meetresultaten overlapt om te bekijken of er een daling in nagalmtijd te zien is wat duidt op absorptie, zie figuur 4. De zwarte lijn is de lege ruimte, geel is 10 buizen, rood 20 buizen, blauw 30 en groen 40.

Hier is te zien dat de nagalmtijd zakt bij de verwachte octaafband 160 Hz (buizen zijn 465 mm lang dus zouden moeten absorberen bij 168 Hz) en dat de daling toeneemt naarmate het aantal buizen toeneemt. Tijdens het modelleren van de 3D prints gebeurde er iets interessants, de gemodelleerde 3D prints bleken niet printbaar. Materialise, een commerciële printfirma uit België, maakte duidelijk dat de gekozen geometrie te klein was: kanalen kunnen niet vrij gemaakt worden. Op zich is deze constatering niet zo interessant, maar de nu bekende minimumeis betekende nieuwe simulaties. De resultaten hiervan onverwacht en zelfs onwenselijk te noemen. Echter het doel van de impedantiebuismeting was niet ideale absorptieprofielen creëren maar het verifiëren van het MatLab script. Daarom is besloten door te gaan met de vernieuwde set modellen en deze te printen en te testen.

Nadat de meting voltooid was heb ik de grafieken met elkaar vergeleken, helaas was hier de vergelijking ver te zoeken. Zowel het aantal verwachtte pieken als de hoogte kwamen niet overeen, gelukkig de positie wel. Dit betekende dat de buizen op zich wel werkten, maar dat er een ander effect in werking was. De meest logische stap was om te bekijken of ik met extra simulaties de gemeten grafieken kon benaderen. Dit lukte aardig goed, al zijn sommige verschillen tot op vandaag nog steeds niet verklaard. Figuur 6 laat de overlap zien tussen de metingen (in kleur) eerste simulaties (licht grijs) en tweede simulaties (zwart).

Het verschil tussen de resultaten van eerste simulaties en metingen werd veroorzaakt door meerdere factoren. Enerzijds fysiek en anderzijds simulatie technisch. Achteraf bleek dat de geprinte proefstukken anders waren qua maatvoering dan gemodelleerd. Dit kwam doordat overtollig printmateriaal aan de wanden van de kanalen bleef plakken door hitte uitstraling van de laser. Daarnaast krimpen verschillende prints anders naarmate er meer of minder materiaal aanwezig is. Deze twee fysieke factoren maakten dat de prints soms wel meerdere millimeters



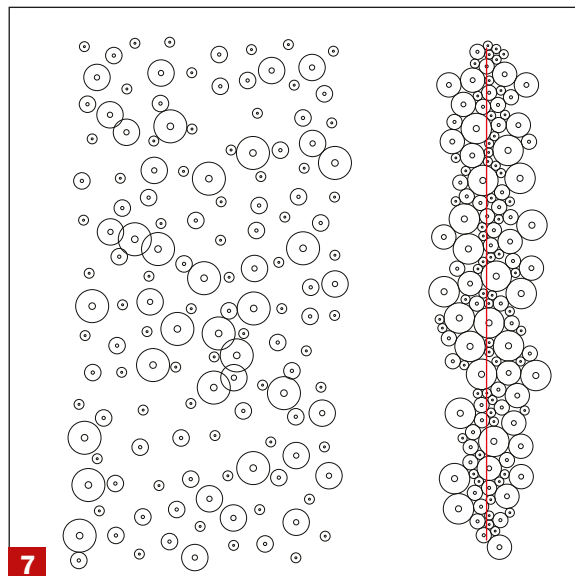
6 Grafiek met gemeten (gekleurd), eerste en tweede simulaties (licht grijs & zwart)

afweken van een gesimuleerd en gemodelleerd computermodel. Daarnaast heeft de lichtsnelheid effect op de hoogte van de grafiek, het oppervlak van de prints is glad maar heeft nog enige structuur. Dit fenomeen wordt niet meegenomen in simulaties, hier is de wand van een kanaal volledig glad. Ook speelt de viscositeit van lucht een belangrijke rol in hoe "snel" de lucht zich in het kanaal beweegt. Een andere waarde heeft ook een effect op het absorptiegedrag, helaas is hierover minder bekend.

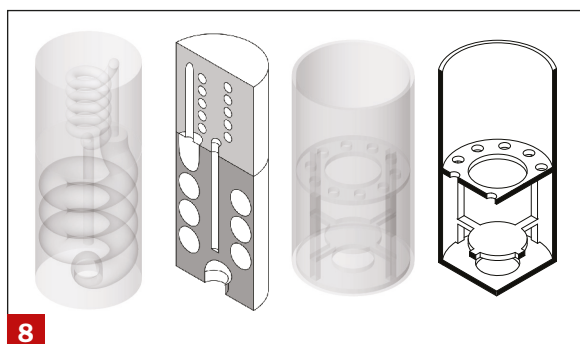
VAN GRAFIEKEN NAAR PRODUCT

Naast de viscositeit is er nog een andere eigenschap die optreedt rondom de opening van de buis die wordt omschreven als het absorptie oppervlakte effect [5]. Dit is een halve bol over de opening van de buis die ontstaat doordat lucht de buis in gaat. Plaatselijk versnelt de lucht en komt aangrenzende lucht ook in beweging. Dit maakt dat aangrenzende buizen met een vergelijkbare frequentierespons beïnvloed worden door cross talk, hierdoor worden de luchtstromen verstoord en vermindert het absorberend vermogen van de buizen [2].

Met deze kennis zijn er een aantal manieren om de gekoppelde buizen te clusteren, het gekozen principe heet closest packing en is een methode om vanuit een collectie objecten één object te genereren met een zo klein mogelijk oppervlak. Vergelijkbaar met een honingraatstructuur. ▶



7 Closest packing met en zonder attractor



8

Doorsnedes van licht en absorptie cilinders

Het startpunt is populatie cirkels die de absorptieoppervlaktes representeren, vervolgens wordt er een attractor geïntroduceerd. In dit geval een lijn, maar dit kan elke 2D vorm zijn. De populatie vormt zich dan om deze attractor totdat het minimale oppervlakte bereikt is, zoals te zien in figuur 7.

Dit model is volledig parametrisch opgezet in Grasshopper wat een plug-in is voor McNeel Rhinoceros. De input van dit model zijn de resultaten van de optimalisatie die eerder aan bod gekomen is. Om van 2D naar 3D te gaan worden cilinders geplaatst op de individuele cirkels in de gehele populatie. Het achteraf plaatsen is nodig omdat deze niet parametrisch zijn, er zijn een paar varianten die makkelijker handmatig te modelleren zijn. Deze cilinders bevatten niet alleen de gekoppelde kwart golf lengtebuizen maar sommigen, circa 5%, hebben een lichtbron.

Eenmaal geplaatst ontstaat er een object wat goed past boven een mooie tafel, in dit geval een vergaderruimte. Absorptiemateriaal achteraf toevoegen is in de meeste situaties onwenselijk omdat standaardoplossingen niet voldoen aan de esthetische eisen van een ontworpen ruimte. Door licht en akoestiek te combineren ontstaat een integrale oplossing.

De kracht van deze methodiek is dat een model ontstaat waarvan de export rechtstreeks printbaar is. Ook is er minimale tijd nodig om een nieuw product te ontwikkelen, de resultaten van de meting zijn direct in te voeren in de optimalisatie, de output van de optimalisatie is de directe input van het parametrisch model. Daarnaast is in elke ruimte het akoestisch klimaat anders en de nagalm-tijd beïnvloeden vereist een eigen oplossing. Standaardoplossingen hebben niet alleen invloed op de frequenties in het doelbereik maar hebben ook effect op frequenties daarbuiten waardoor de juiste maatregelen nemen lastig kan zijn. Doordat de meetresultaten direct gekoppeld zijn aan het eindproduct ontstaat een oplossing die niet alleen efficiënt is maar ook esthetisch bijdraagt aan een reeds ontworpen ruimte. ■

Heeft dit onderwerp uw nieuwsgierigheid gewonnen? Het volledige afstudeeronderzoek is terug te vinden in de education repository van de TU Delft met de volgende sleutelwoorden: "Tom Scholten" "broadband absorption".

BRONNEN

- ▶ [1] Gibson, I. R., (2015), Additive Manufacturing Technologies, New York: Springer
- ▶ [2] Hannink, M., (2004), Optimised sound absorbing trim panels for the reduction of aircraft cabin noise, Enschede: University of Twente
- ▶ [3] van der Linden, A., (2011), Bouwfysica. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff
- ▶ [4] van Eerden, F., (2000), Noise reduction with coupled prismatic tubes, Wageningen: Ponsen & Looyen
- ▶ [5] Vér, I., & Beranek, L., (2006). Noise and Vibration Control Engineering, New Jersey: Wiley & Sons



9

Impressie van ontworpen product in context