

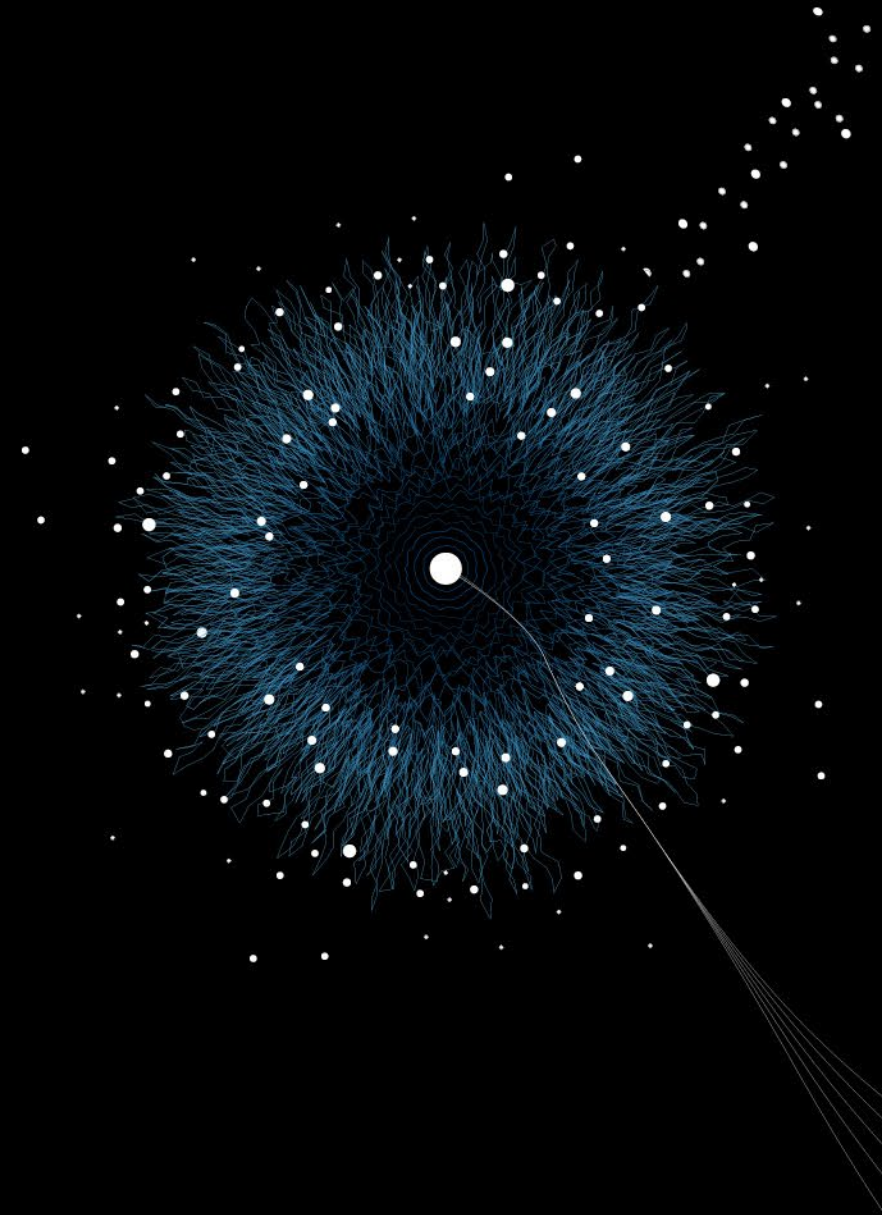
DE FYSICA VAN DE STILTE

WND CONFERENTIE

14-12-2024

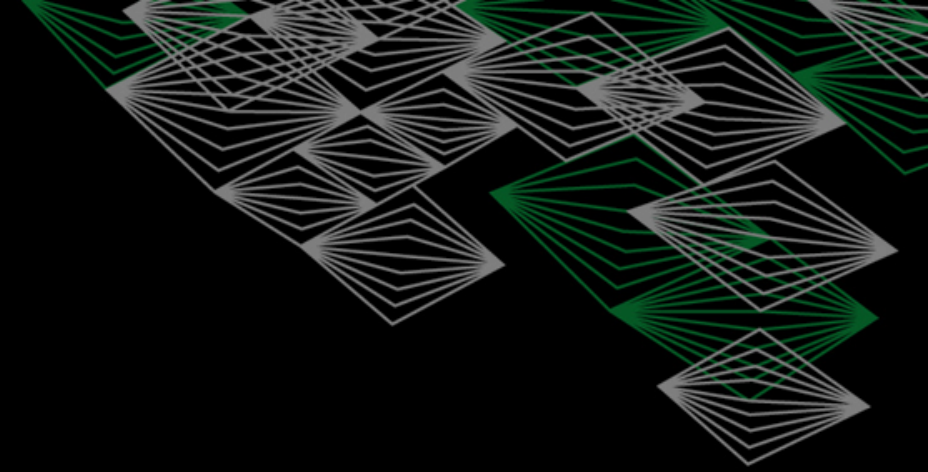
DR. IR. YSBRAND WIJNANT

UNIVERSITEIT TWENTE / DEMCON SOUND SOLUTIONS



DE FYSICA VAN DE STILTE

- Introductie
- Fysica
- Oplossingen



INTRODUCTIE

- Ernstige hinder en slaapverstoring (OBW 2020)
 - Wegverkeer (slaapverstoring!)
 - Buren (slaapverstoring!)
 - activiteiten/spelende kinderen/tuinieren/motoren
 - Bouw- en sloopactiviteiten
 - Railverkeer
 - Vliegverkeer
 - Windturbines
 - ...





Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied

@ODNZKG · [Follow](#)



Er wordt veel geluidsoverlast ervaren van Awakenings. Het festival voldoet aan de geluidsnormen, maar door de weersomstandigheden draagt het geluid veel verder dan normaal. Meer info op: haarlemmermeergemeente.nl

5:35 PM · May 14, 2023



Nieuws

Veel geluidsoverlast in Haarlemmermeer door technofestival Awakenings

De weersomstandigheden zorgen voor veel geluidsoverlast door festival Awakenings bij inwoners van Haarlemmermeer. Dat meldt de gemeente op Twitter.

Gijs Verhoef 14 mei 2023, 19:36



NH Nieuws



In samenwerking met
NH Nieuws



NOS Nieuws • Gisteren, 08:12

Het weer blijkt oorzaak van geluidsoverlast technofestival Awakenings

INTRODUCTIE

- Maar hoe krijgen we het **stiller** met elkaar ...
 - Begrijpen
 - Meten
 - Inzicht/modelleren van de fysica
 - Toepassen van fysische principes
 - Beetje creativiteit ...
 - Ondernemen
 - Wetgeving
 - etc ...

FYSICA



FYSICA

- Geluidsmodellen zijn vrijwel altijd gebaseerd op de **golf-vergelijking**

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0$$

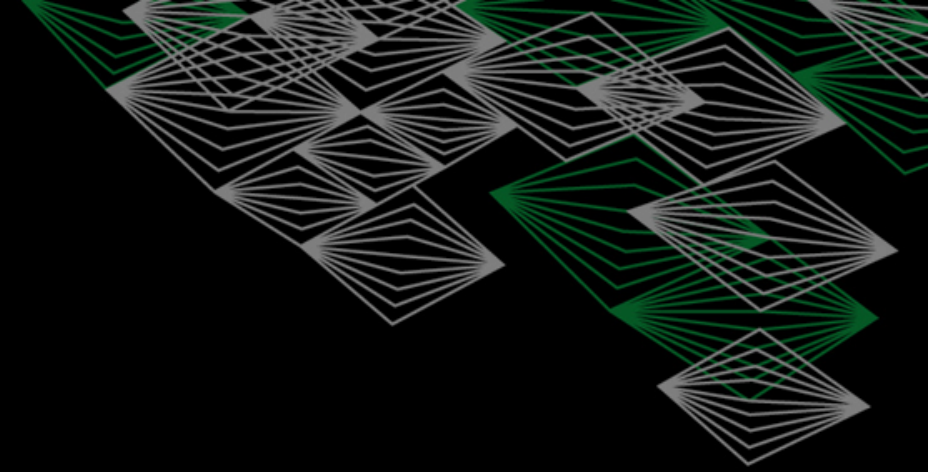
- of, in het frequentiedomein, op de **Helmholtz vergelijking**

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \qquad k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

= golf getal = ruimtelijke frequentie

FYSICA

- Analytische modellen
- Semi-analytische modellen
- Numerieke modellen

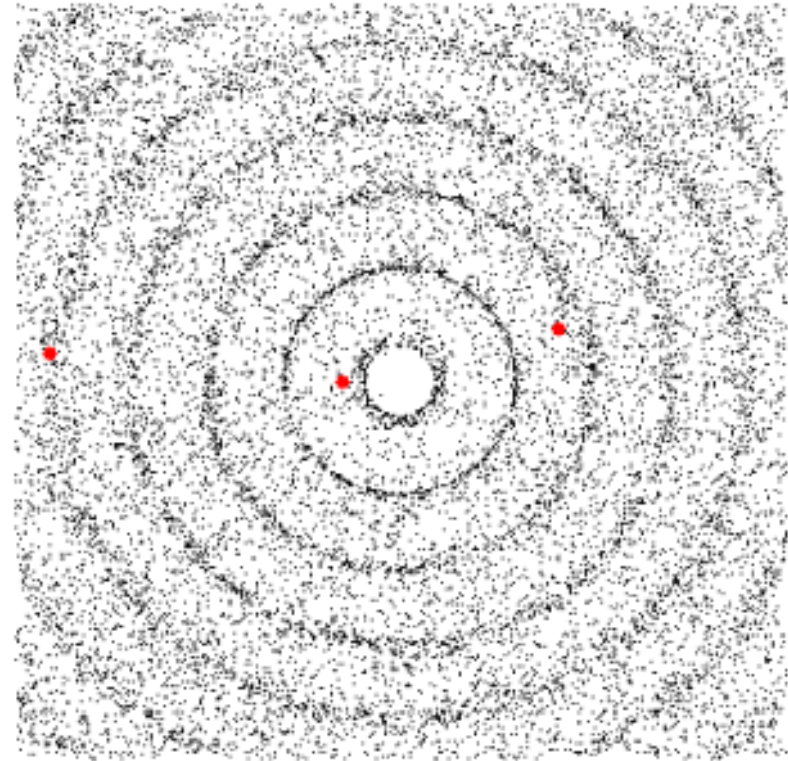


FYSICA

- Oplossingen (snel + “onnauwkeurig”)
 - Analytisch
 - omnidirectional puntbron

$$p = \frac{f(r - ct)}{r}$$

Acoustic Monopole



isvr

FYSICA

- Oplossingen (snel + pragmatisch)

- Semi-empirisch

1.4. Rekenmodel

Het equivalente geluidsniveau L_{Aeq} in dB(A) vanwege het wegverkeer wordt gevonden uit:

$$L_{Aeq} = E + C_{optrek} + C_{reflectie} - D_{afst \tan d} - D_{lucht} - D_{bodem} - D_{meteo} \quad 1.1$$

1.9. Luchtdemping, bodemeffect, meteo-effect

Deze termen worden op de hierna volgende wijze berekend:

$$D_{lucht} = 0,01r^{0,9} \quad 1.12$$

met r de kleinste afstand tussen waarneempunt en rijlijn [m]

$$D_{bodem} = B \left[2 + 4 \left(1 - e^{-0,04r} \right) \left(e^{-0,65h_w} + e^{-0,65(h_{weg}+0,75)} \right) \right] \quad 1.13$$

met B de bodemfactor, gedefinieerd als het deel van het bodemvlak, begrensd door de wegas en de denkbeeldige lijnen vanuit het waarneempunt naar de snijpunten van de begrenzinglijnen met de wegas, dat niet reflecterend is.

$$D_{meteo} = 3,5 - 3,5e^{-0,04r / (h_{weg} + h_w + 0,75)} \quad 1.14$$

2.9. De meteo-correctieterm C_M

Voor de berekening van de meteo-correctieterm C_M zijn de volgende gegevens nodig:

R : de horizontaal gemeten afstand tussen bron- en waarneempunt [m];

h_b : de hoogte van het bronpunt boven de gemiddelde maaiveldhoogte in het brongebied [m];

h_w : de hoogte van het waarneempunt boven de gemiddelde maaiveldhoogte in het waarneembied [m].

Als h_b en/of h_w kleiner is dan nul, wordt voor h_b respectievelijk h_w de waarde nul aangehouden. De berekening verloopt als volgt:

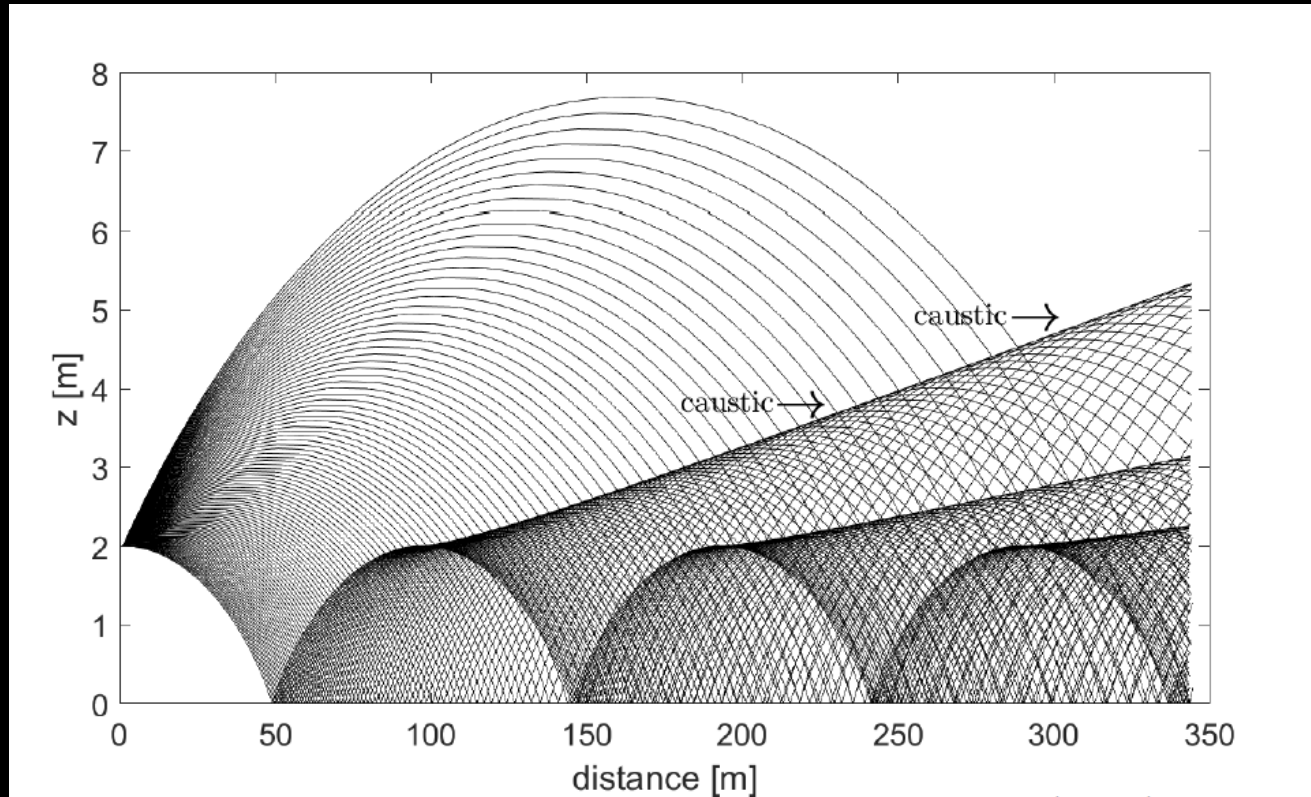
$$C_M = 3,5 - 35 \frac{h_b + h_w}{R} \text{ voor } R > 10(h_b + h_w) \quad 2.16$$
$$C_M = 0 \text{ voor } R \leq 10(h_b + h_w)$$

2.7. De luchtdemping ΔL_L

FYSICA

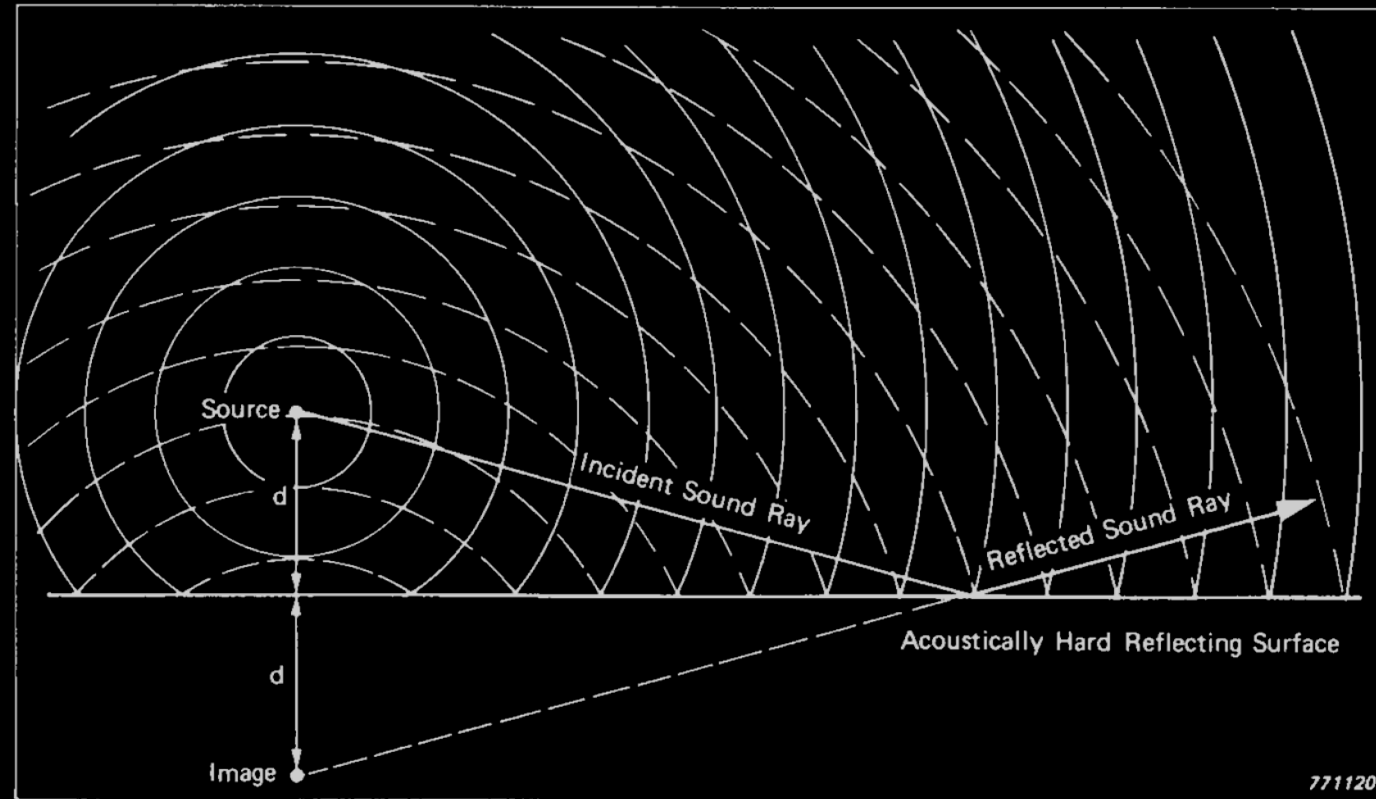
- Oplossingen (langzaam maar nauwkeurig)

- Numeriek
 - FEM/EEM
 - BEM/REM
 - Stralen-theorie
 - Parabolische vgl.
- 6 elementen per golflengte



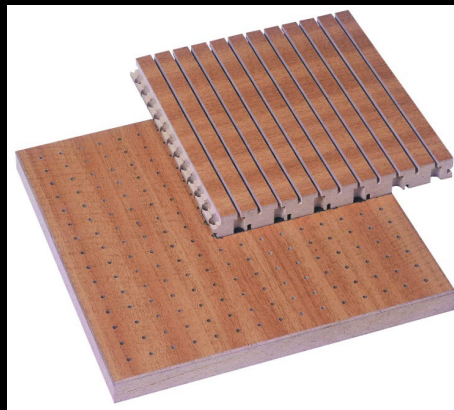
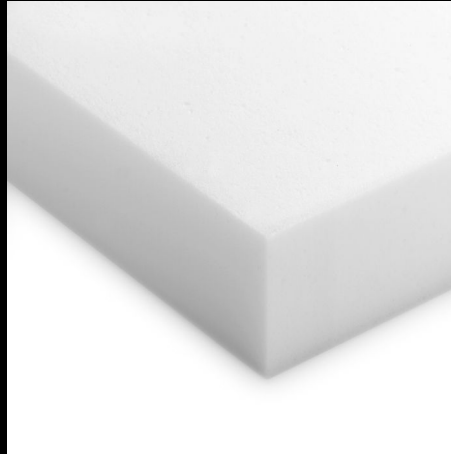
FYSISCHE ASPECTEN VOOR STILTE

- 1. Reflectie



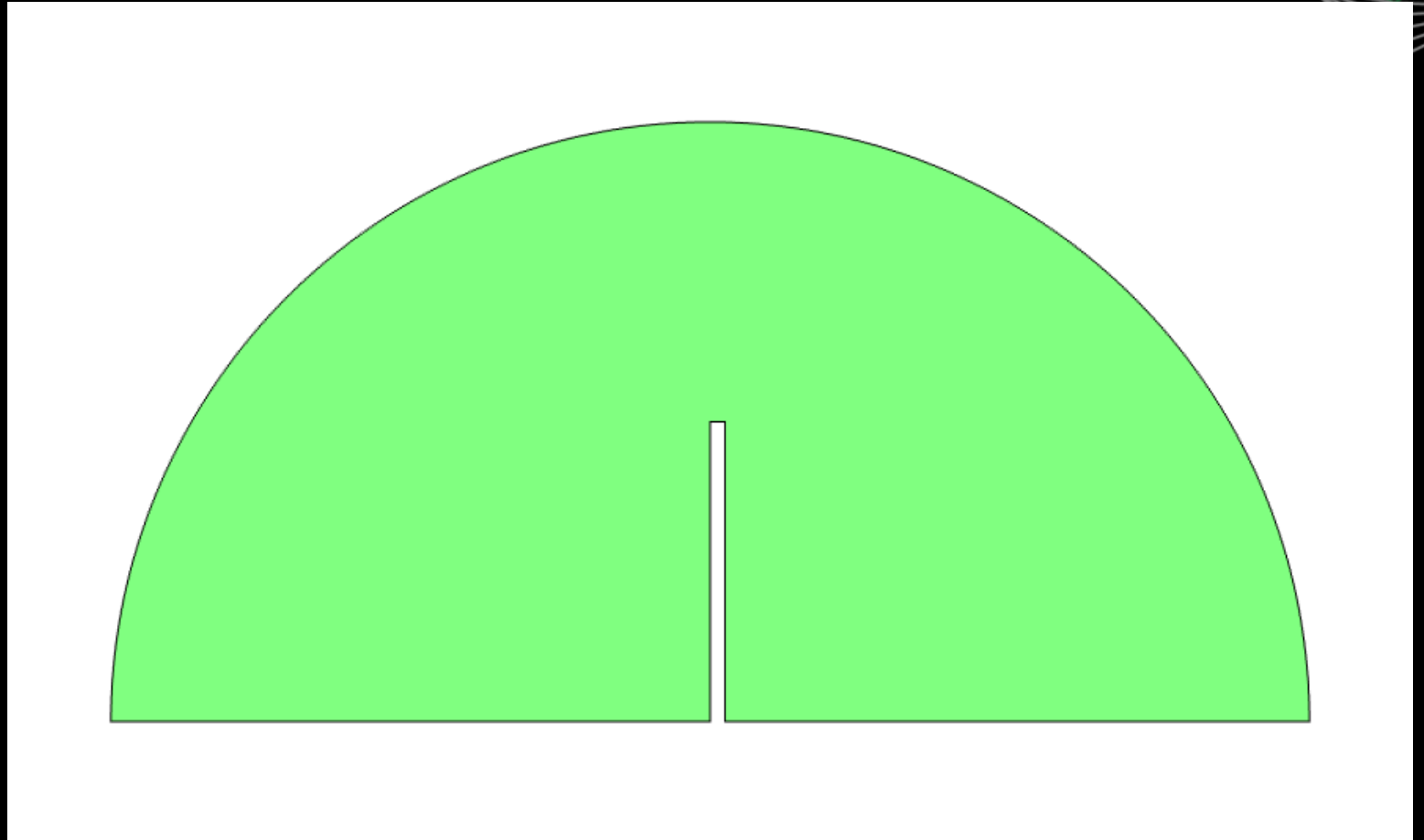
FYSISCHE ASPECTEN VOOR STILTE

- 2. Absorptie



FYSISCH ASPECTEN VOOR STILTE

- 3. Diffractie



FYSISCHE ASPECTEN VOOR STILTE

- Spherische golf uitbreiding
 - Geluid intensiteit neemt kwadratisch af met de afstand

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

- 6 dB geluidsreductie per afstandsverdubbeling

FYSISCHE ASPECTEN VOOR STILTE

- Absorptie in de lucht

$$p = p_0 e^{-\alpha r/2}$$

met $\alpha = \alpha(f, T, H, P_{atm}, \dots)$

- Belangrijk bij hoge frequenties and grote afstanden
- Geluidsdissipatie = energie wordt omgezet in warmte

FYSISCH ASPECTEN VOOR STILTE

- Bodem reflectie/absorptie
 - Geluidsdruk verdubbeling bij reflecterende oppervlakken (+6 dB)

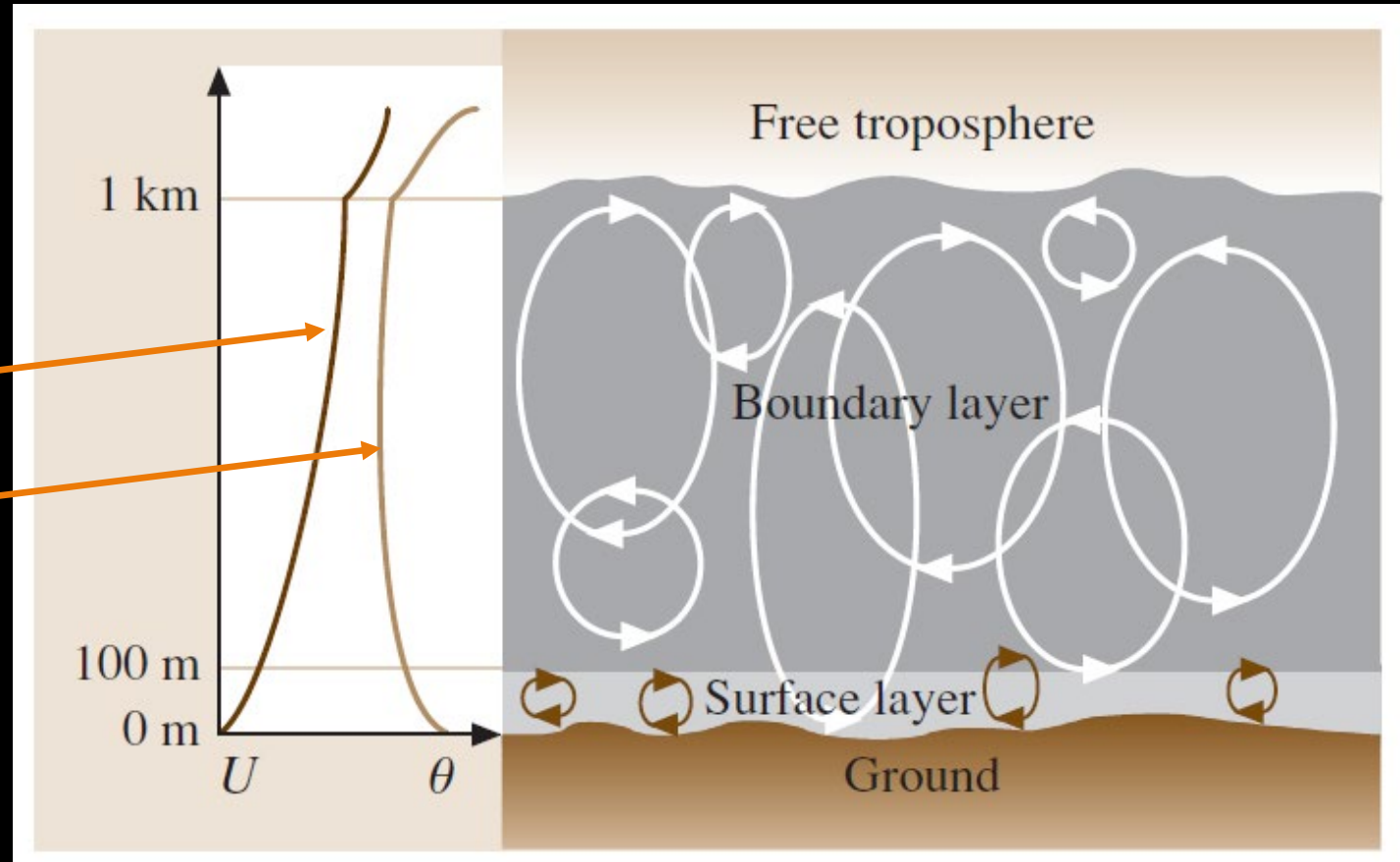
FYSISCHE ASPECTEN VAN GELUIDSPROPAGATIE

- Wind/Temperatuur

wind profiel

temperatuur
profiel (overdag)

$$\theta = T + \gamma_d z$$



FYSISCHE ASPECTEN VAN GELUIDSPROPAGATIE

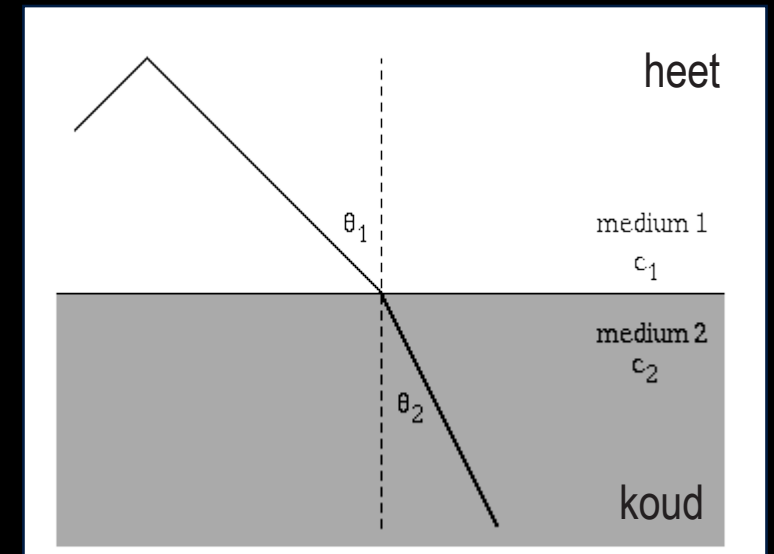
- **Temperatuur**

- 1. Geluidssnelheid neemt toe met de temperatuur $c = \sqrt{\gamma RT}$

- 2. Wet van Snellius

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2}$$

- ... golf refracteert naar lagere geluidssnelheden
- ... golf refracteert richting de kou
- ... golf refracteert weg van de warmte



FYSISCHE ASPECTEN VAN GELUIDSPROPAGATIE

- **Temperatuur**

- **Refractie**



FYSISCHE ASPECTEN VAN GELUIDSPROPAGATIE

- Wind

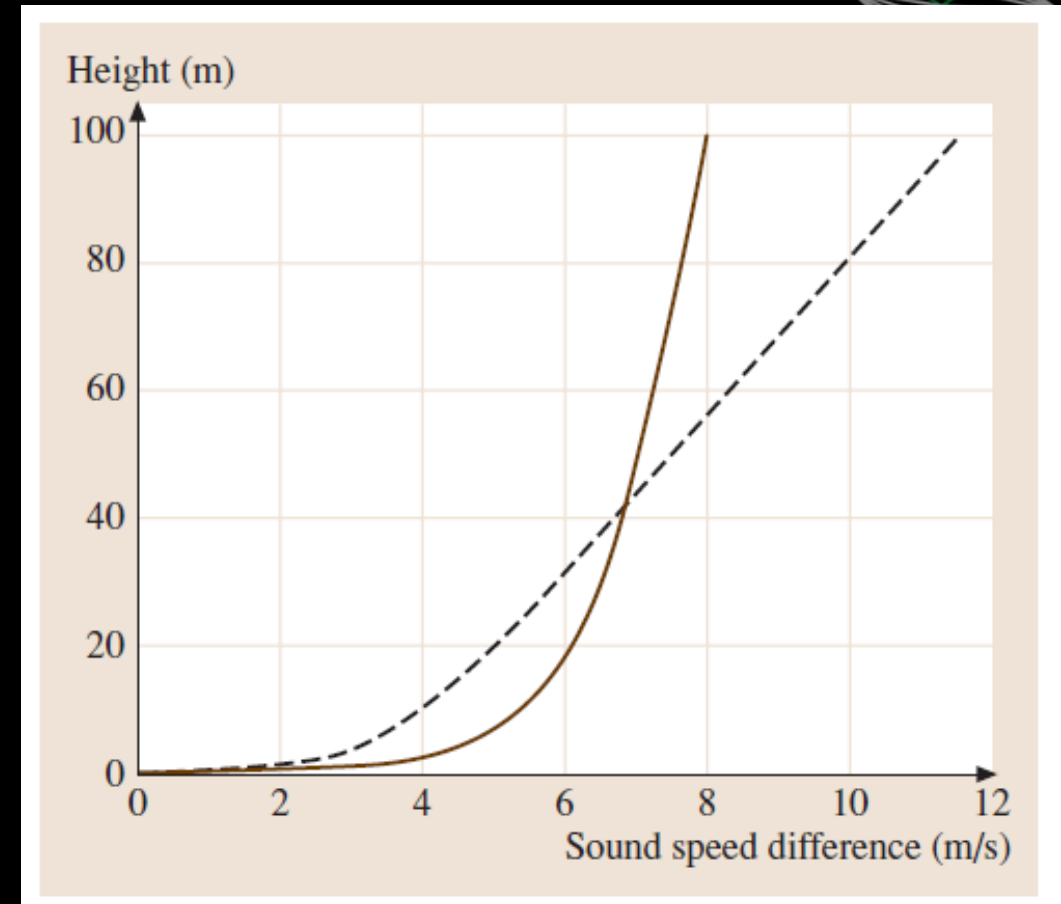
- windsnelheid kan simpelweg worden opgeteld (of afgetrokken) van de geluidssnelheid (afhankelijk van de richting van de golf)

$$c = c_0 \pm v(z)$$

- dus ... **verandert de geluidssnelheid** ... dan dus ook ... **refractie**
 - ... golf refracteert richting een afname van de geluidssnelheid
 - ... golf refracteert weg van een toename van de geluidssnelheid

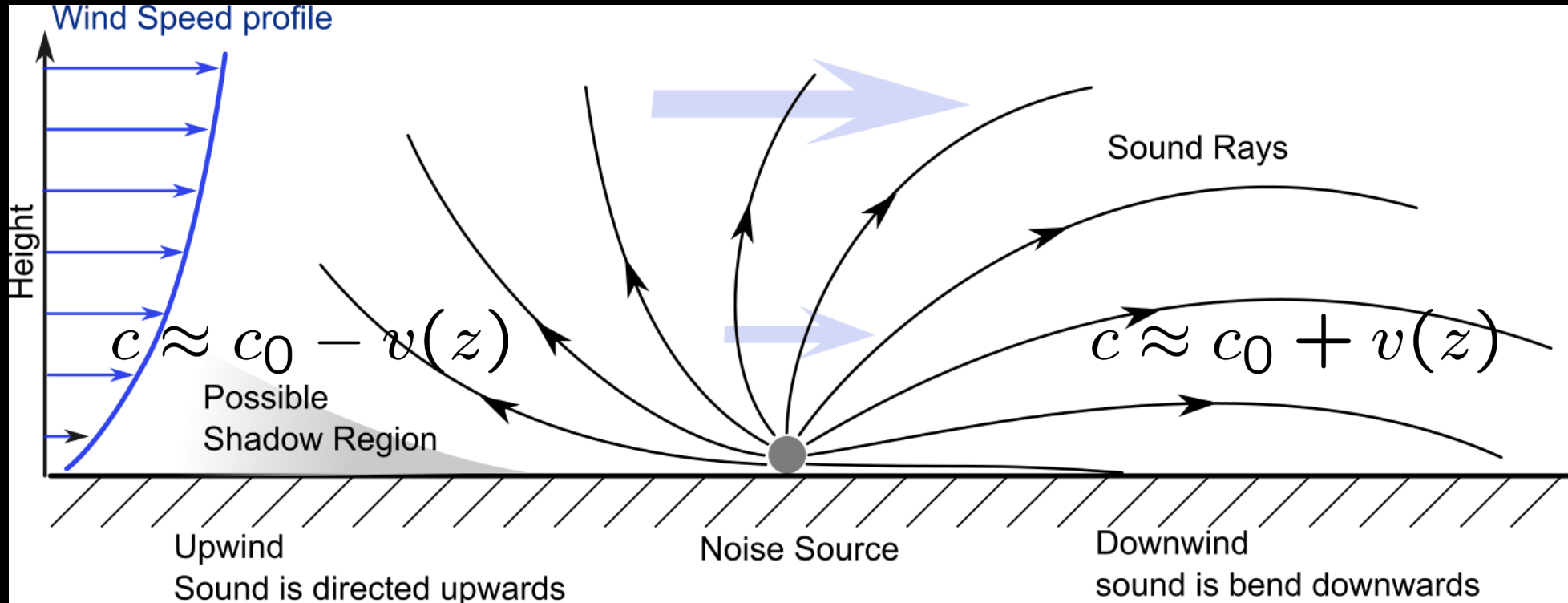
FYSISCHE ASPECTEN VAN GELUIDSPROPAGATIE

- Wind
 - Wind profielen
 - log-profiel: wind, bewolkte nacht
 - lineair-profiel: kalme, heldere nacht
 - Windsnelheden zijn klein t.o.v. geluidssnelheid



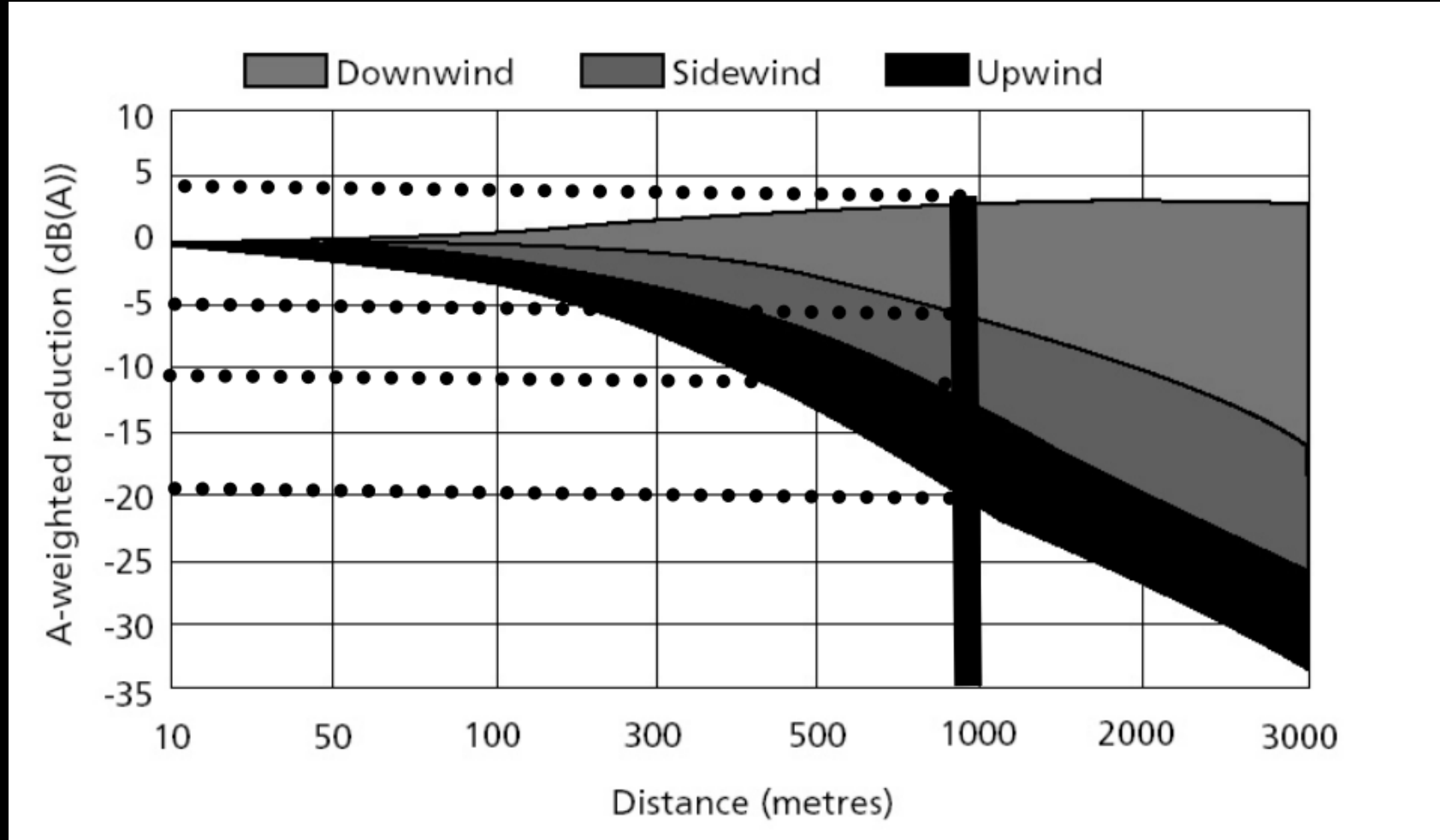
FYSISCHE ASPECTEN VAN GELUIDSPROPAGATIE

- Wind



FYSISCHE ASPECTEN VAN GELUIDSPROPAGATIE

- Wind



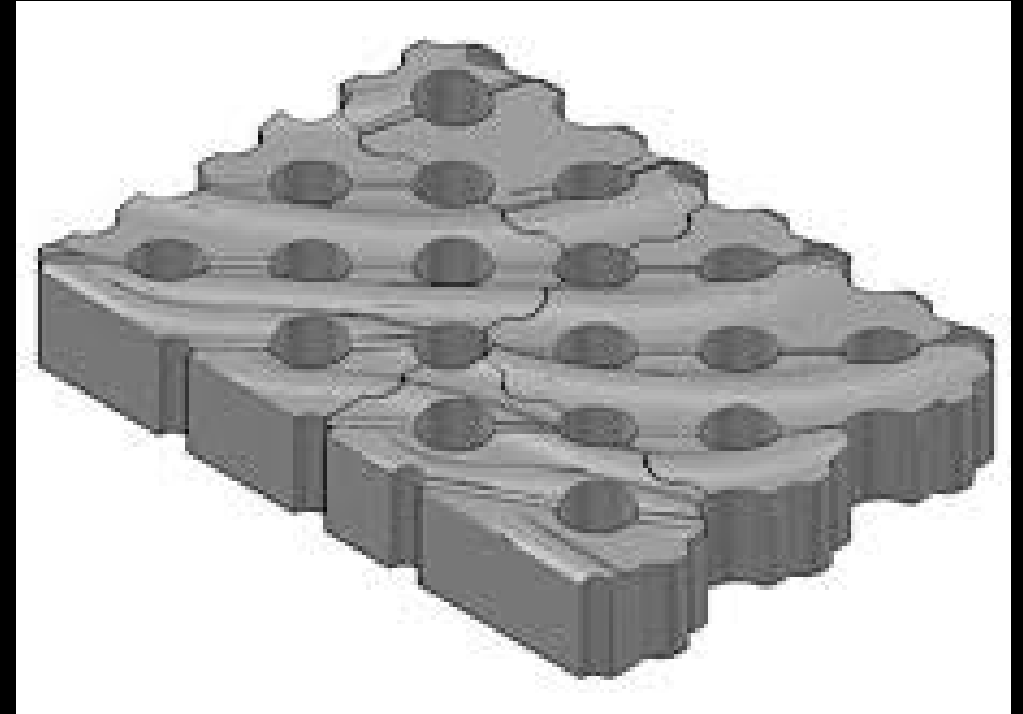
DE FYSICA VAN DE STILTE

- Oplossingen
 - Geen geluid maken ...
 - Meander
 - Stalen bruggen dempen (CLD)
 - Geluid afbuigen (diffractoren)
 - Geluid absorberen
 - Geen geluid afstralen
 - ...



OPLOSSINGEN ... BEGIN BIJ DE BRON

- Grasbetonblokken die weinig trillingen introduceren



CONCLUSIE

- Wat niet wordt **geëxciteerd** maakt geen geluid ...
dus probeer zo min mogelijk trilling te veroorzaken

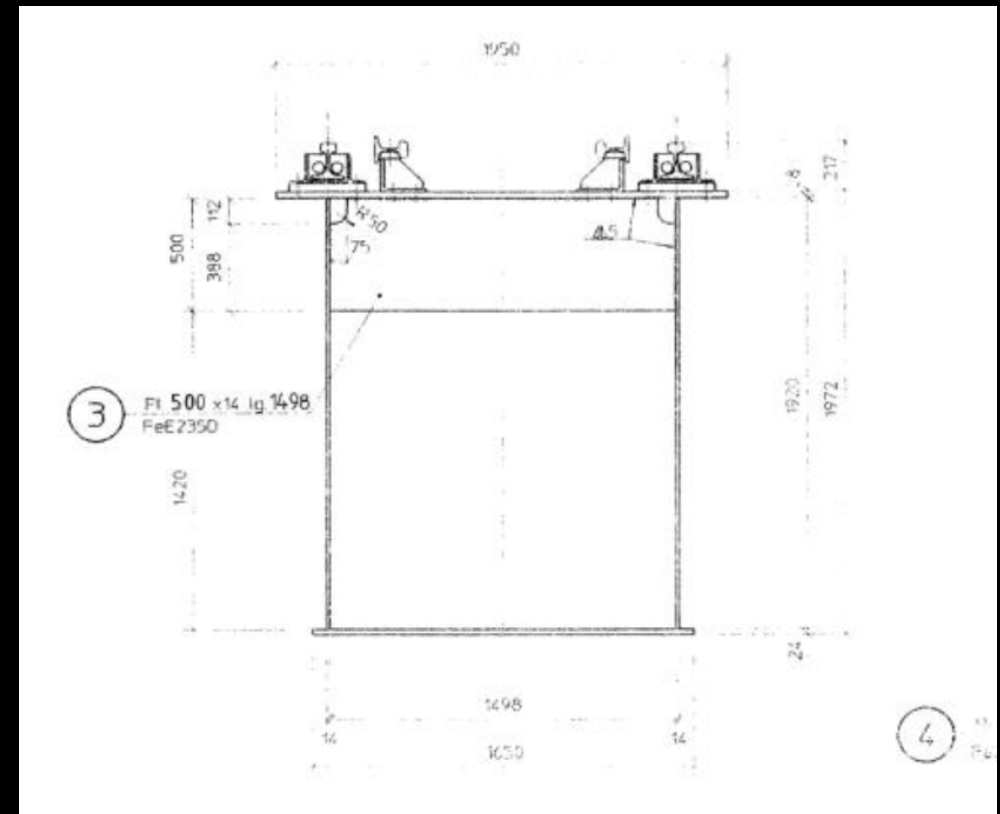
OPLOSSINGEN ... **DICHT** BIJ DE BRON

- **Brug** Roermond

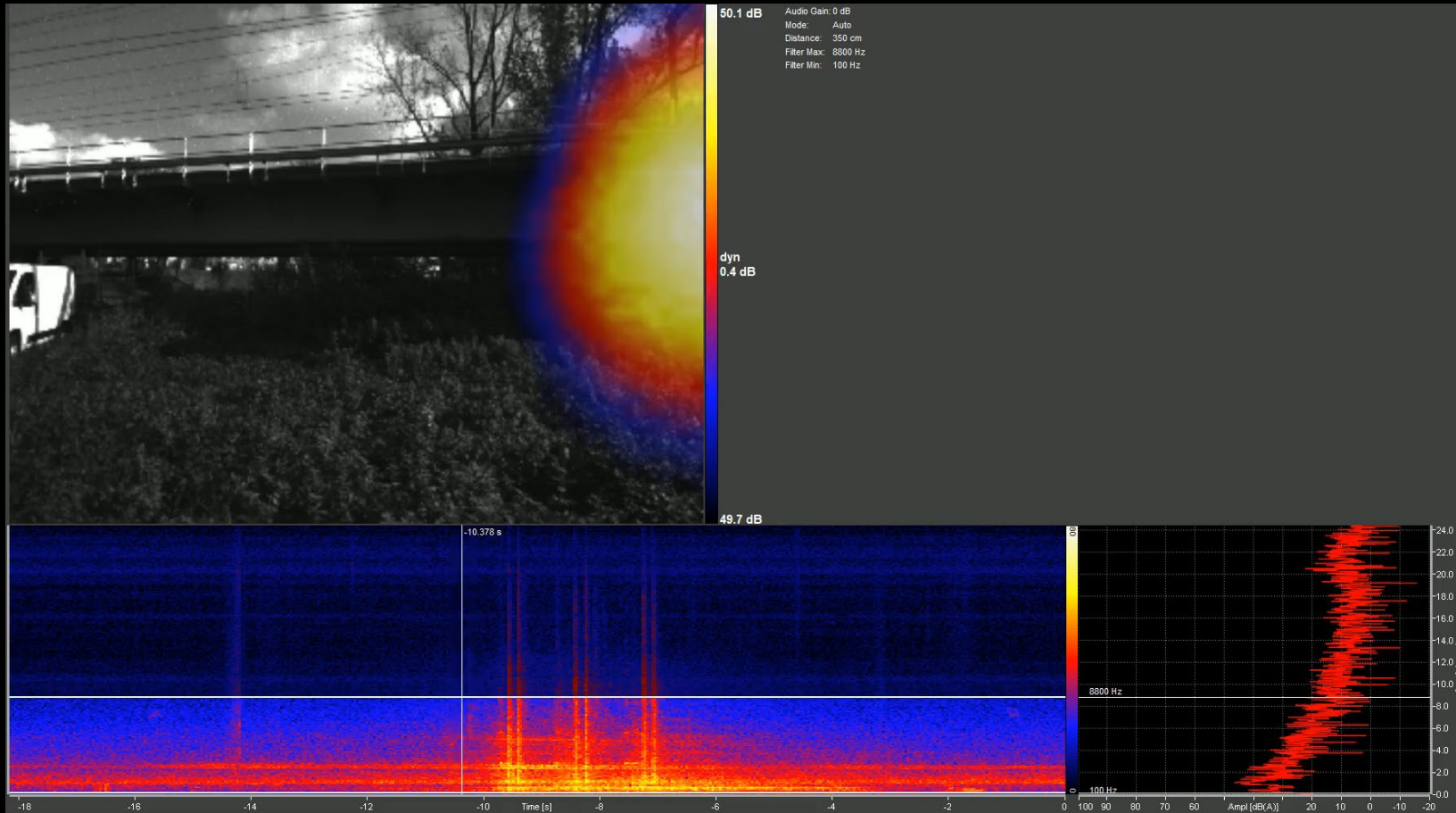


STALEN BRUGGEN

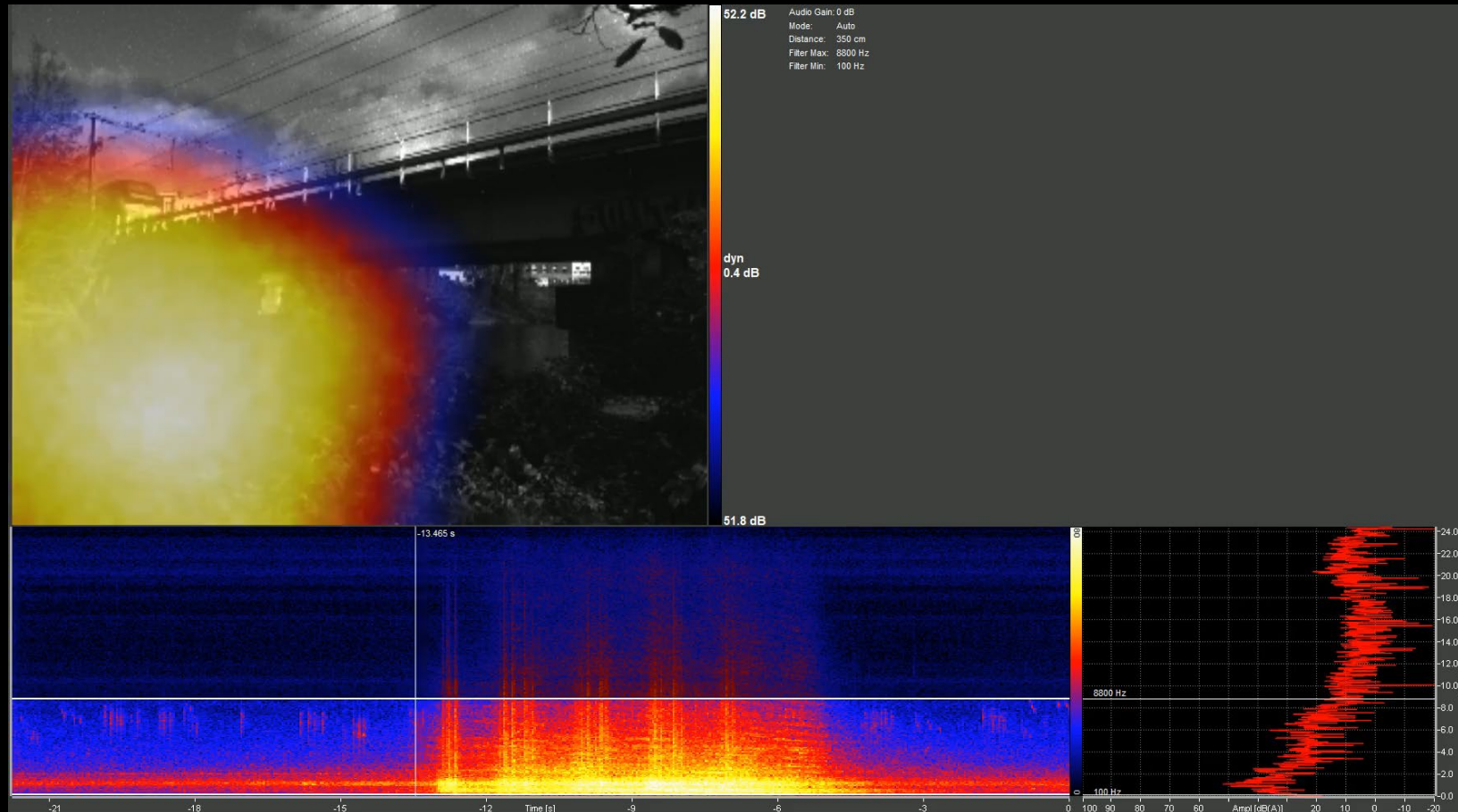
- Brug Roermond



GELUIDSAFSTRALING

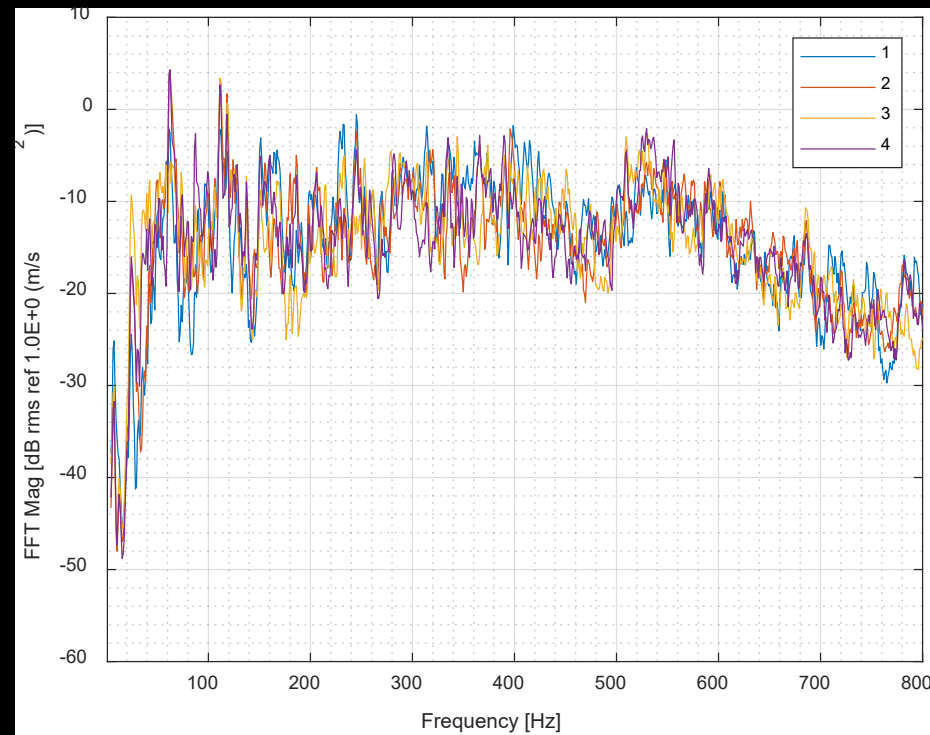
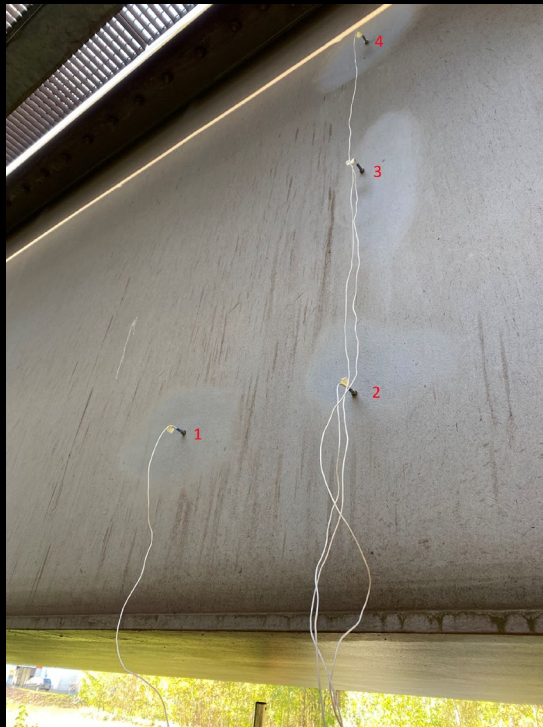


GELUIDSAFSTRALING



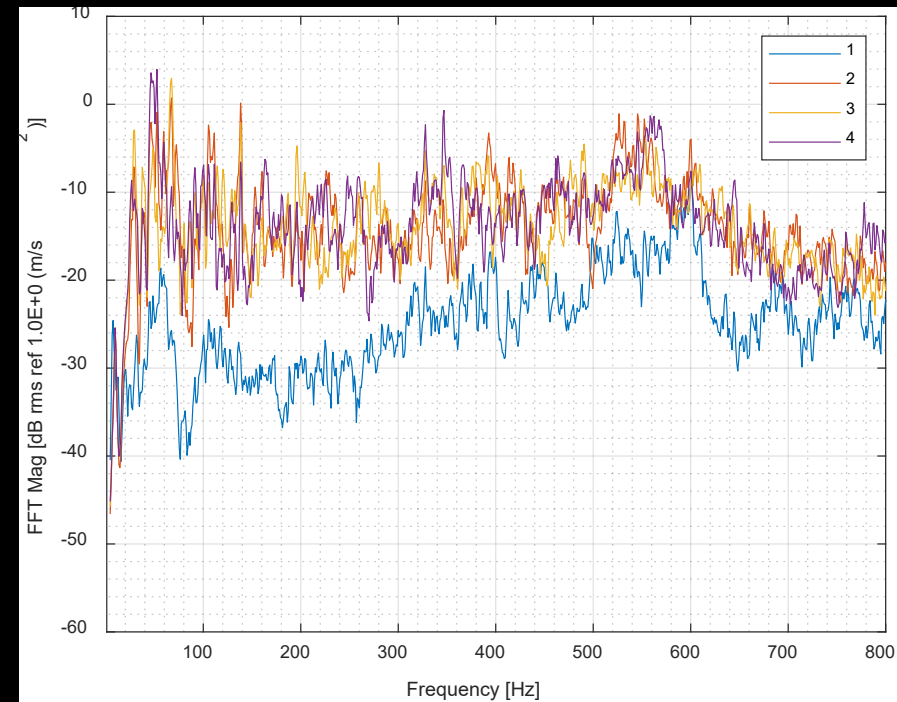
TRILLINGEN

- Hoge niveau's bij lage frequenties en tonale pieken = “modaal” gedrag



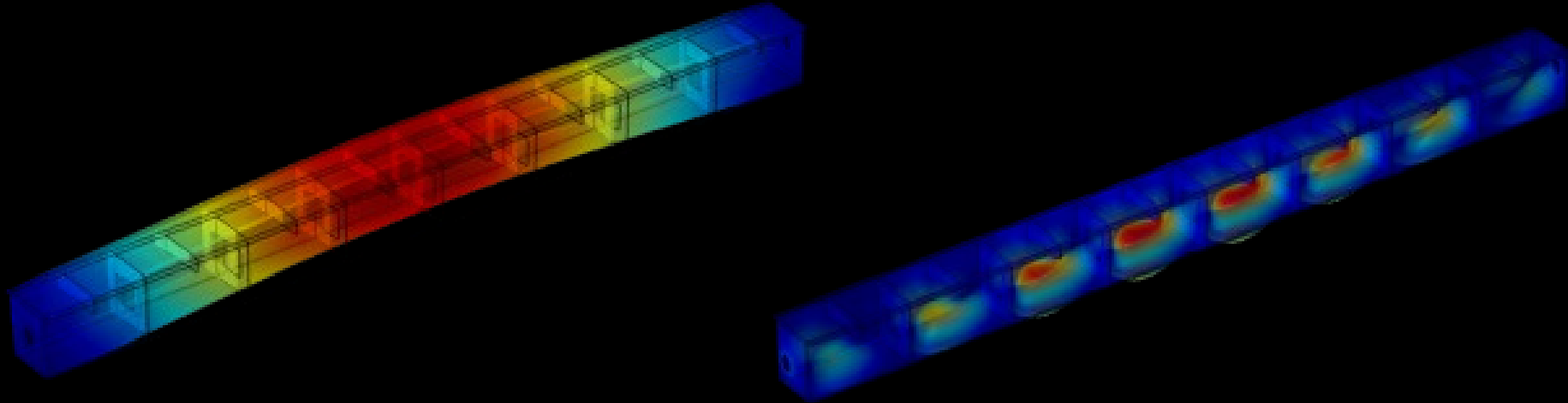
TRILLINGEN

- “knopen” bij interne verstijvers

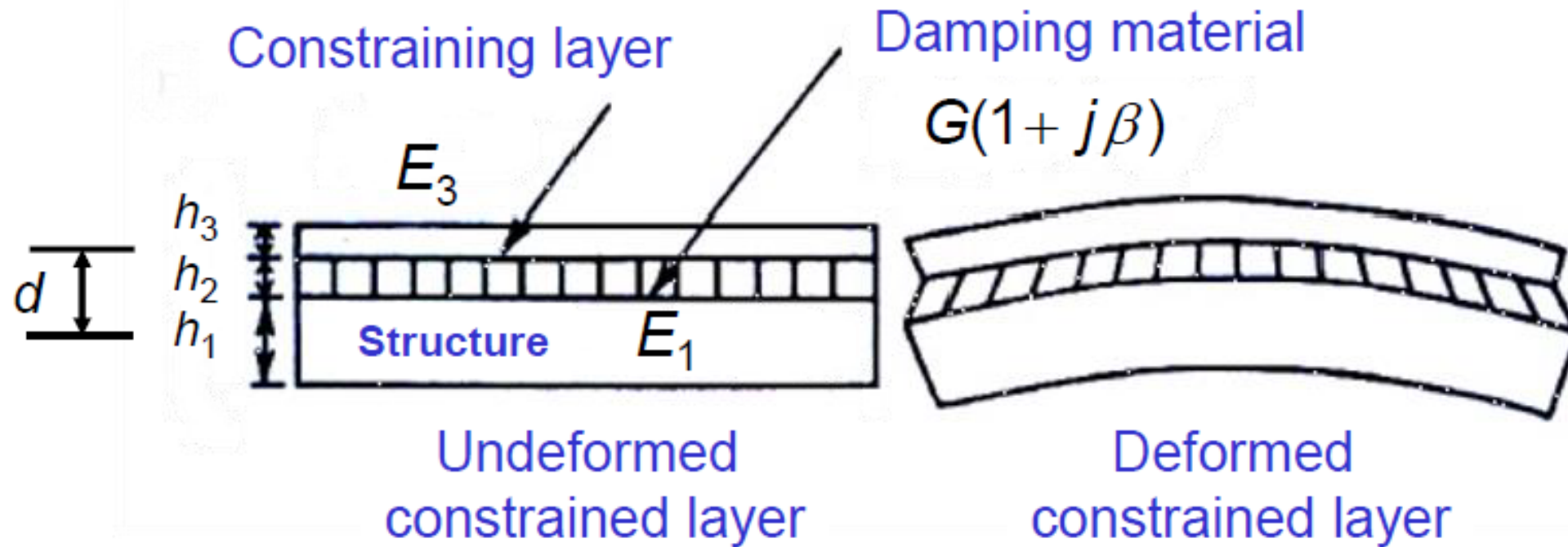


TRILLINGEN

- Modelleren



CONSTRAINED LAYER DAMPING (CLD) SANDWICH DEMPING

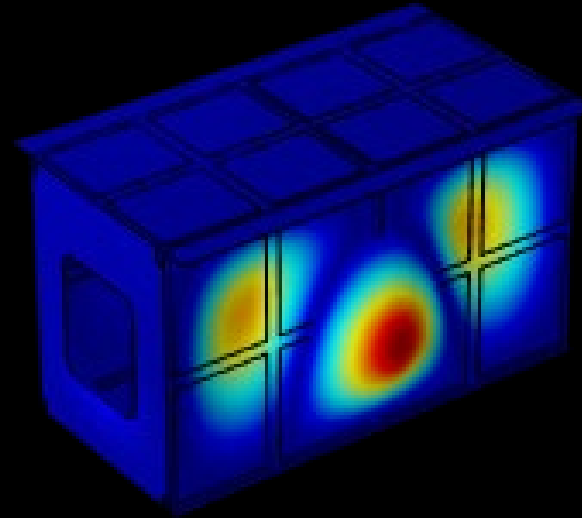
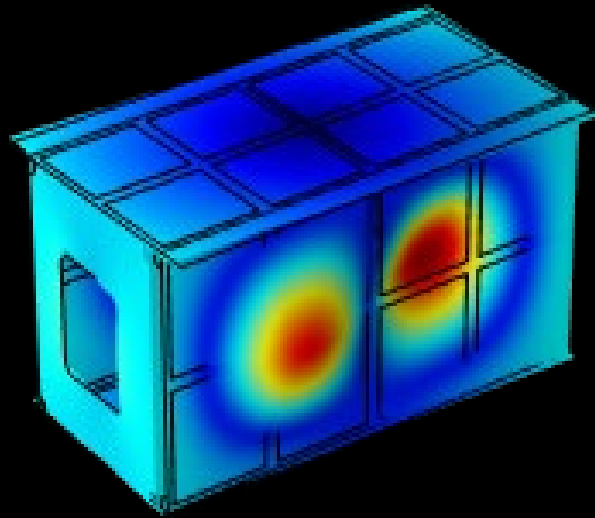


CONSTRAINED LAYER DAMPING (CLD)

- Voordelen
 - hogere demping in vergelijking met alleen een visco-elastische laag
 - laag gewicht
 - makkelijk te installeren
 - je ziet het niet
 - ...

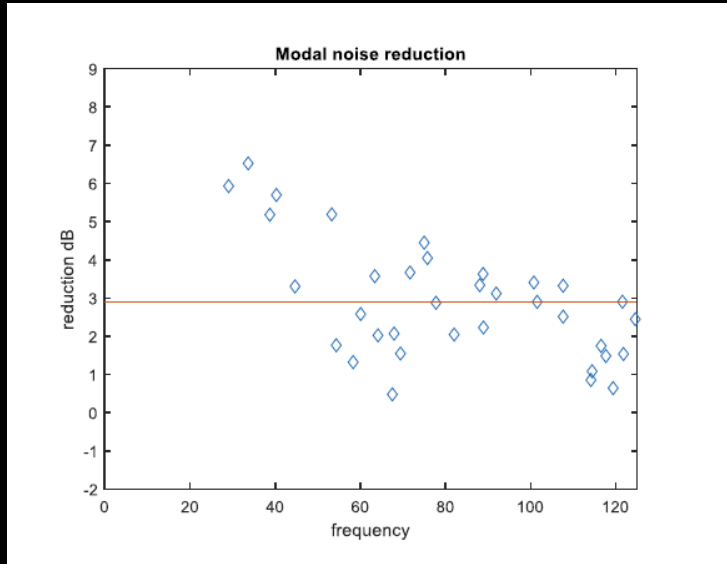
CONSTRAINED LAYER DAMPING (CLD)

- Modelleren

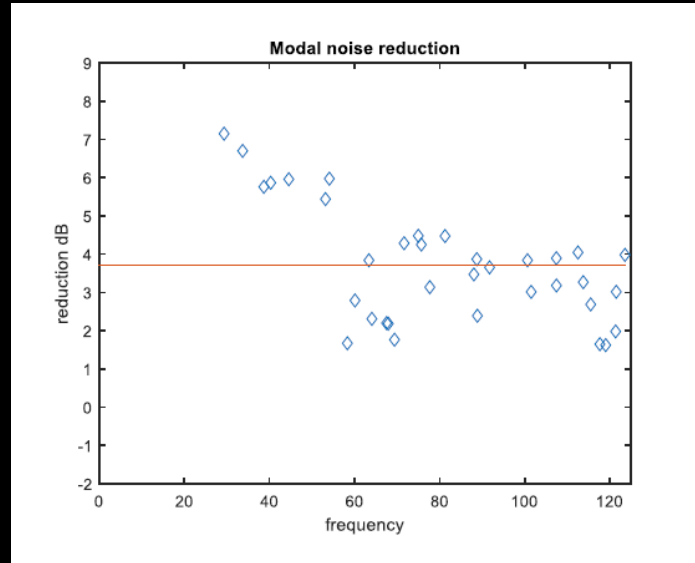


CONSTRAINED LAYER DAMPING (CLD)

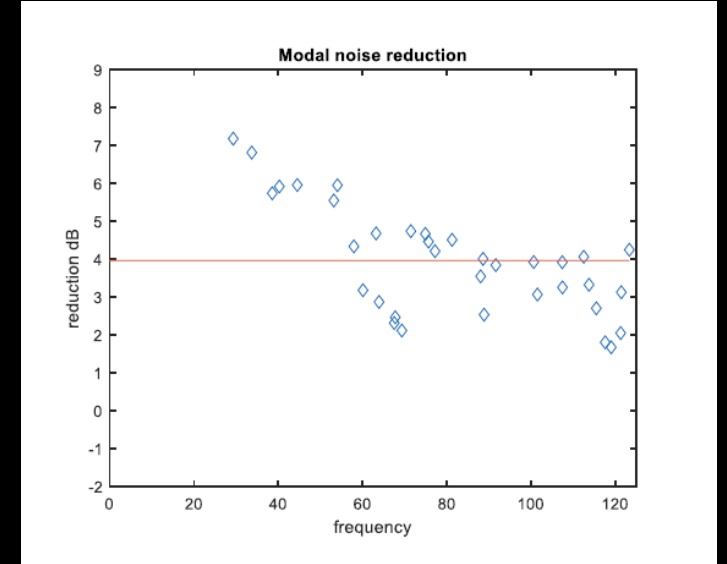
- Trillingsdemping = geluidsreductie



CLD op alleen de
verticale delen 2.9 dB



CLD op verticale &
Bodem 3.7 dB reductie



CLD op verticale, top-
en bodem delen 3.9 dB

CONSTRAINED LAYER DAMPING (CLD)

- Groningen Retrobridge. CLD met **magneten**!

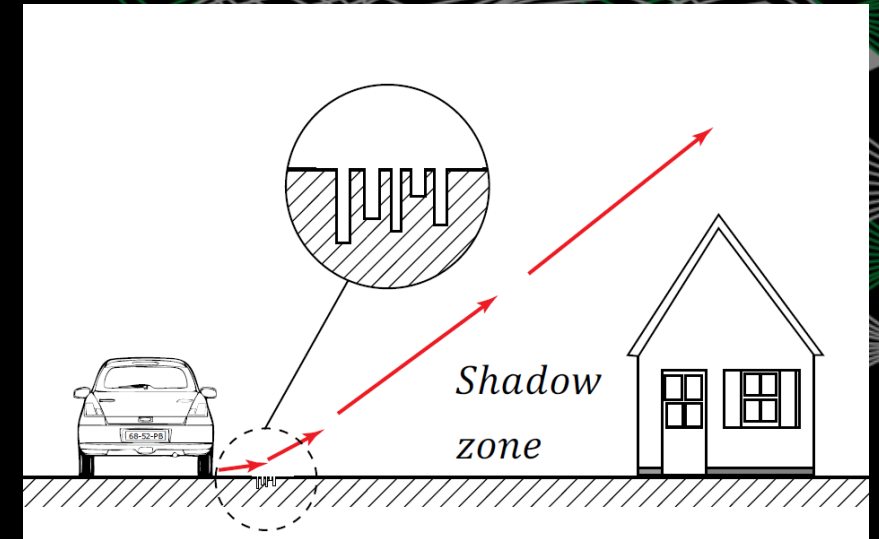


CONCLUSIE

- Je kunt met **constrained layer damping** een hoge mate van demping creëren en dus reduceert het geluid!

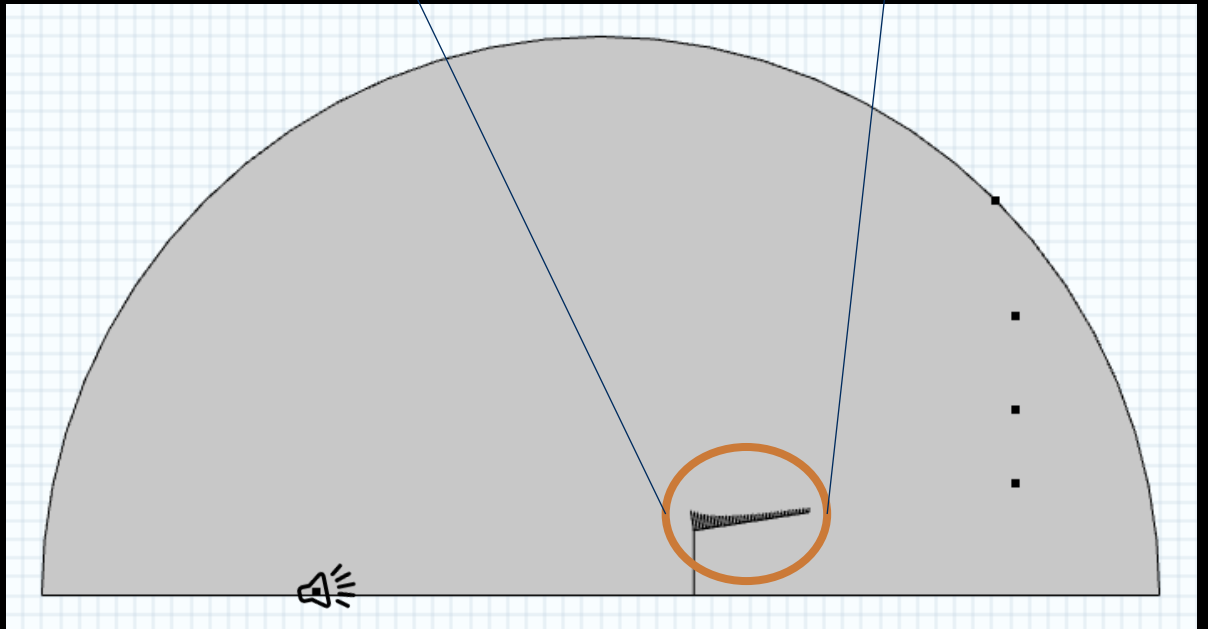
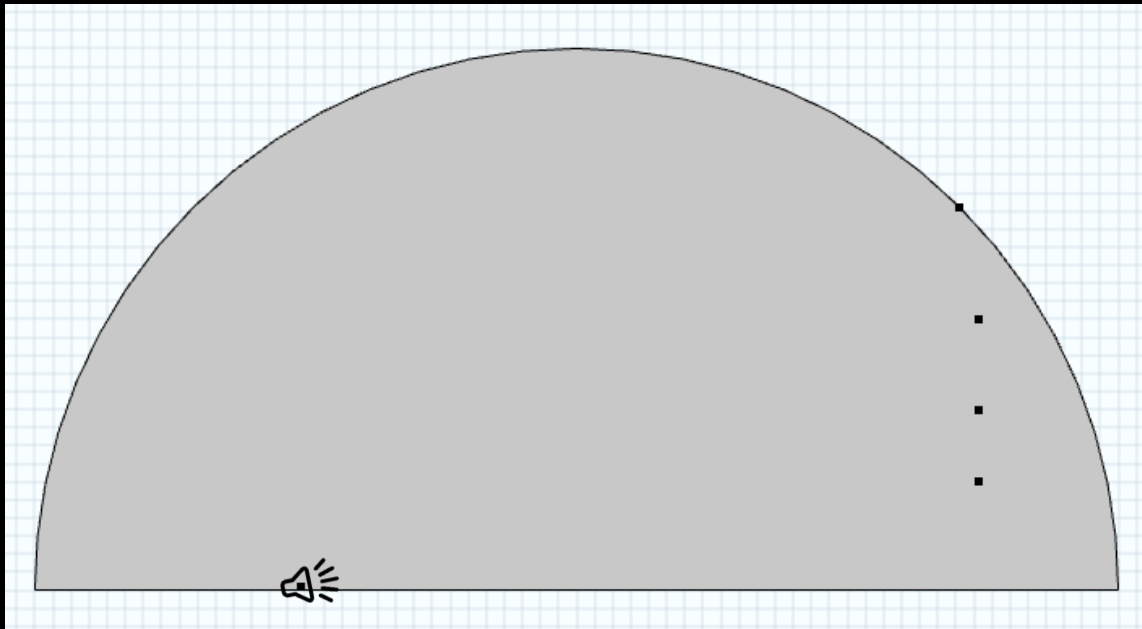
DIFFRACTOR

- **DiffRACTie**
 - Het afbuigen van golven om een obstakel
- Kunnen we **diffRACTie** toepassen om verkeerslawaaï te reduceren?
 - Afbuigen van golven in een **opwaartse** richting creëert een schaduwzone achter het diffracterende element
 - Afbuiging door “**resonatoren**” ($\lambda/4$ -resonatoren)



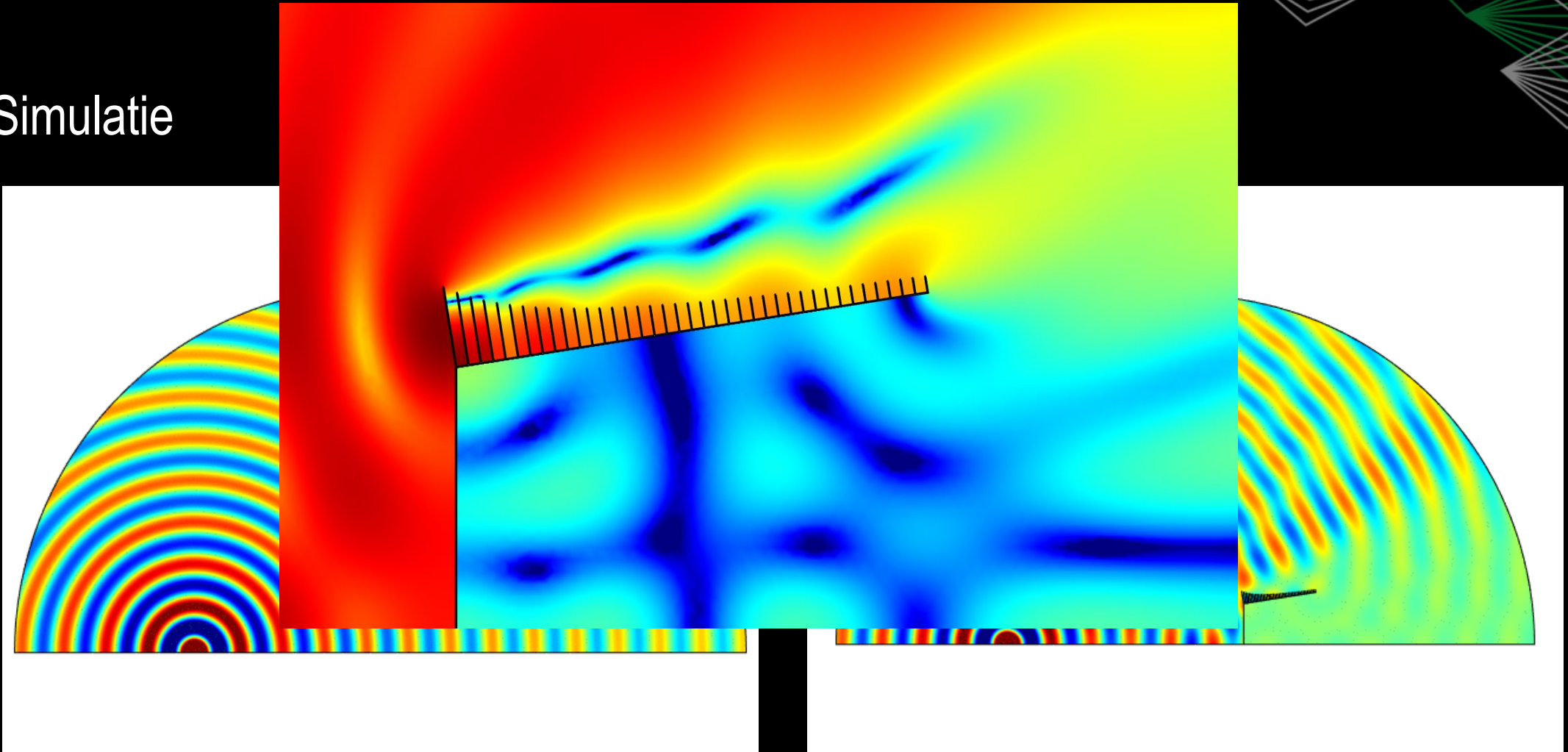
DIFFRACTOR

- Simulatie



DIFFRACTOR

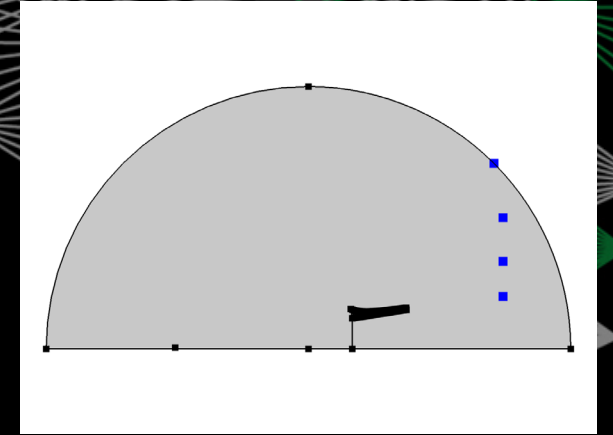
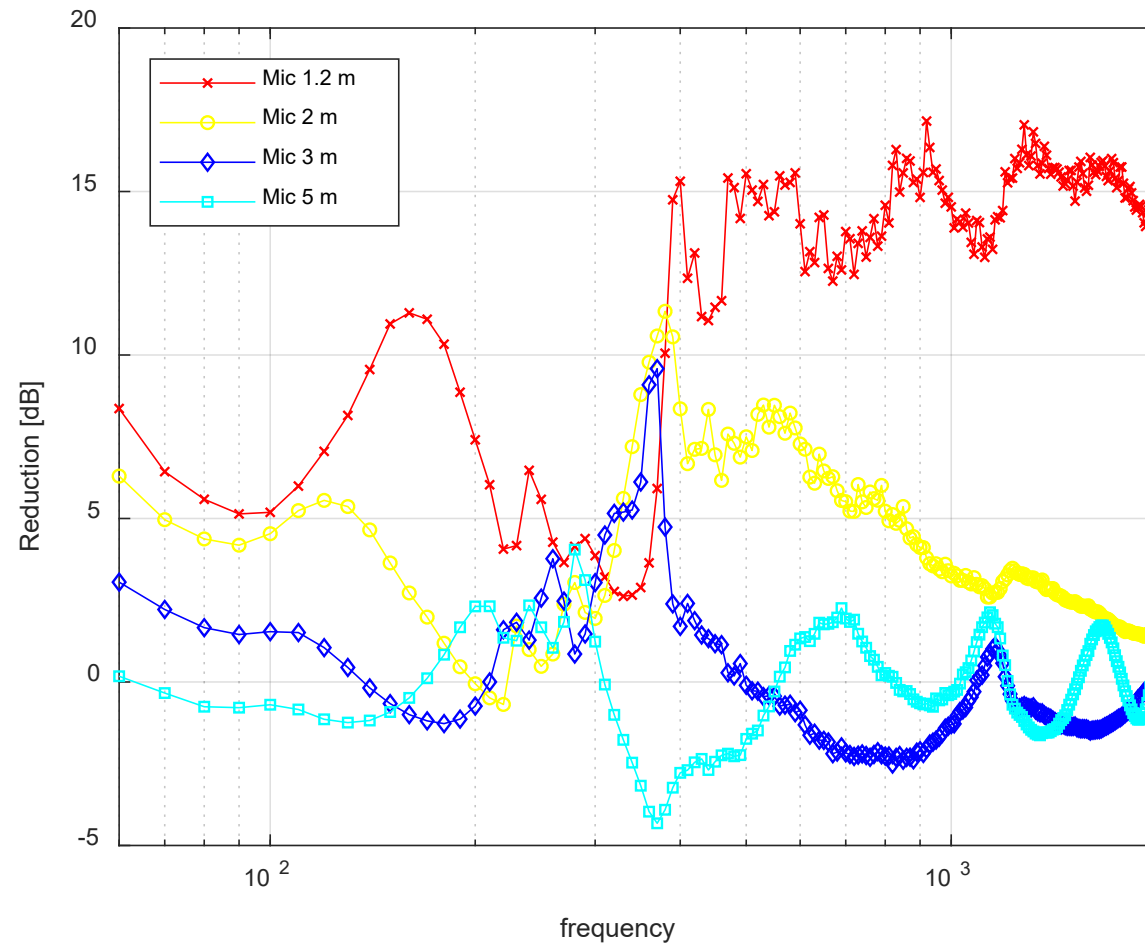
- Simulatie



DIFFRACTOR

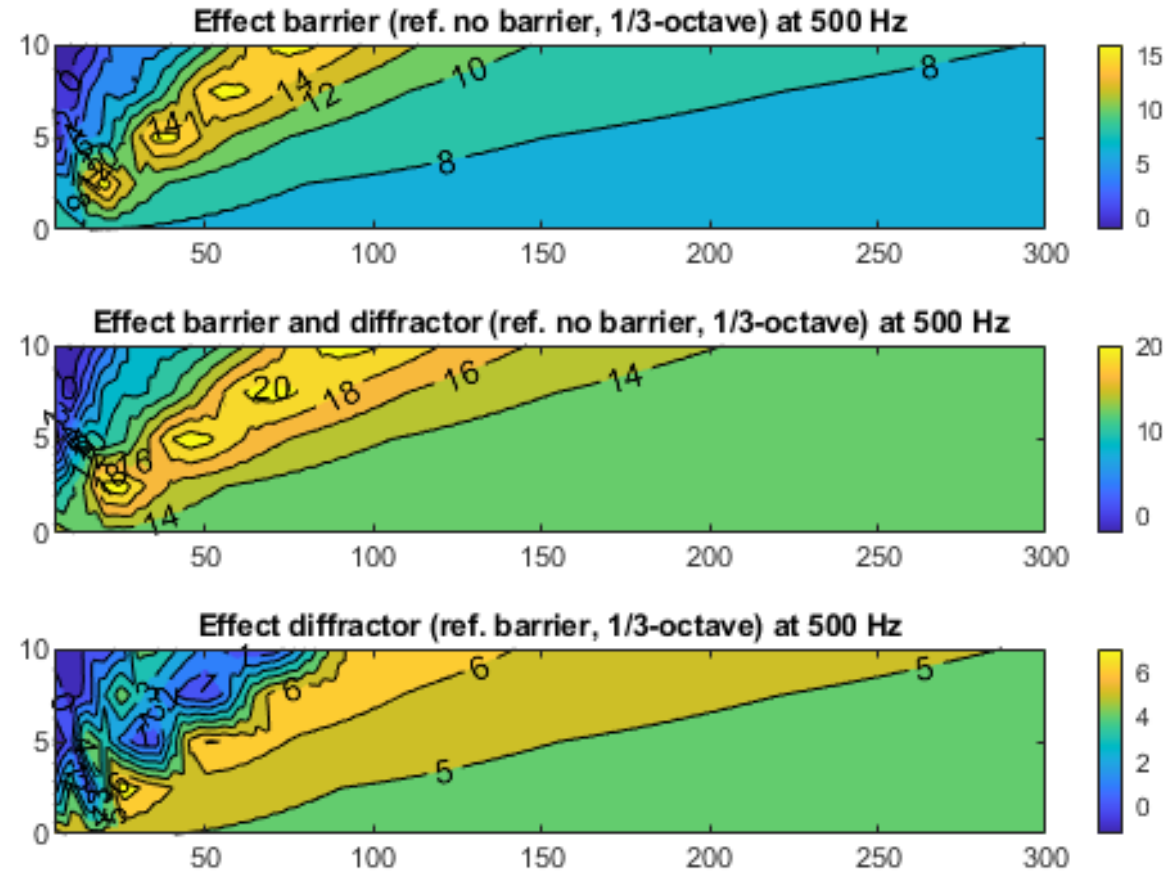


DIFFRACTOR



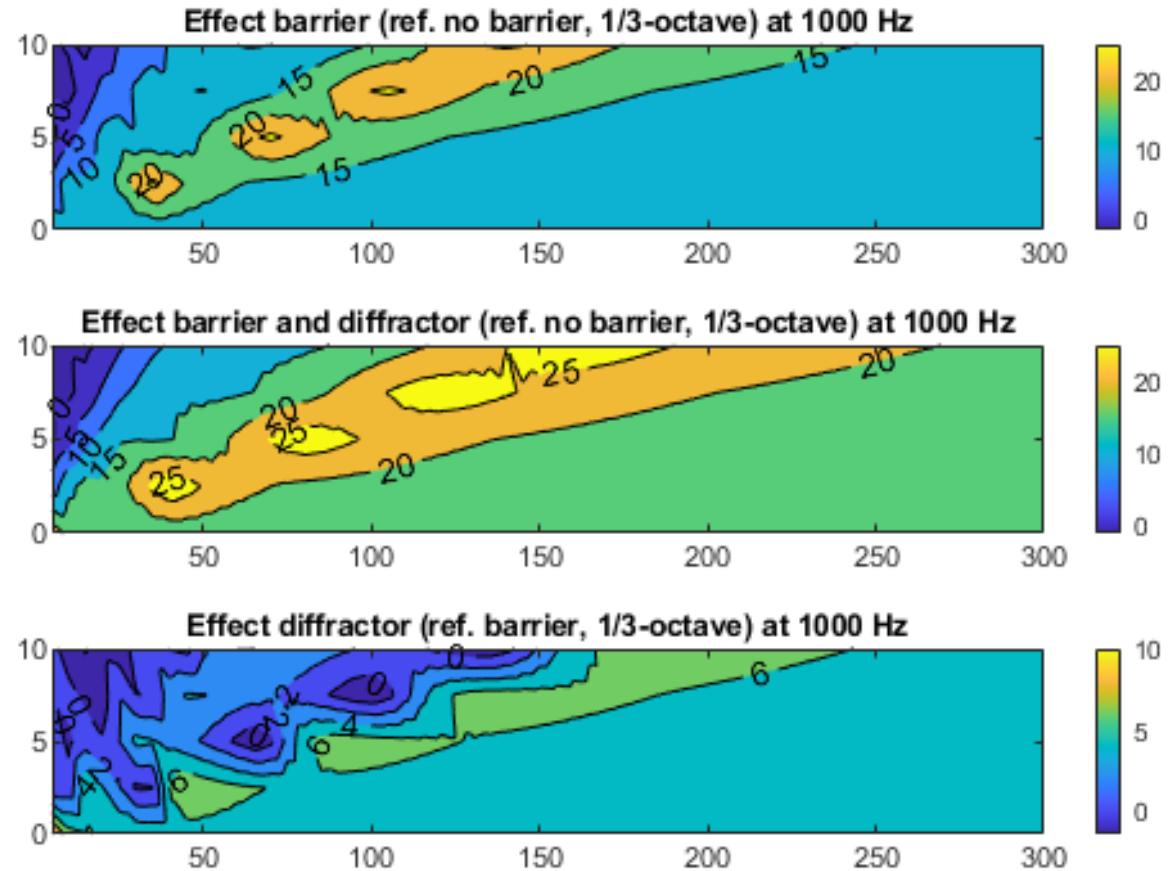
DIFFRACTOR

- Reductie bij 500 Hz
 - scherm
 - scherm + diffractor
 - = diffractor effect

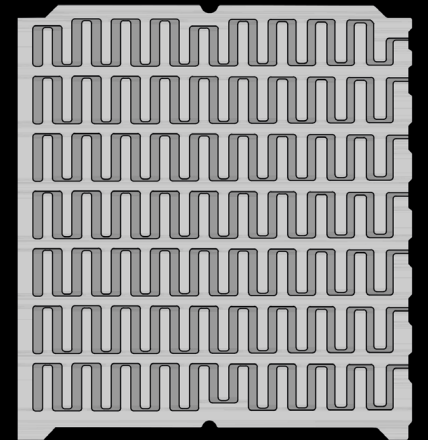


DIFFRACTOR

- Reductie 1 kHz
 - scherm
 - scherm + diffractor
 - = diffractor effect



DIFFRACTOR

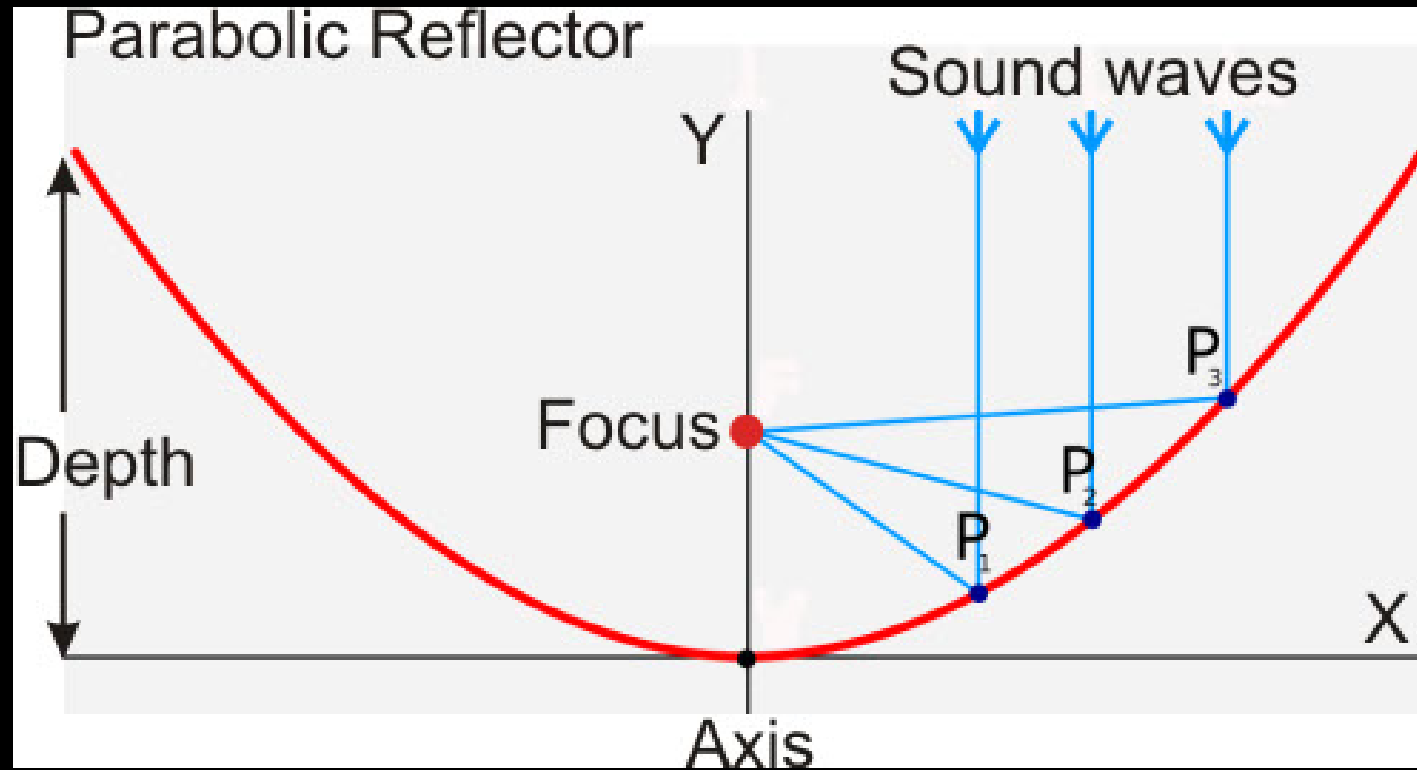


DE PARABOLISCHE REFLECTOR

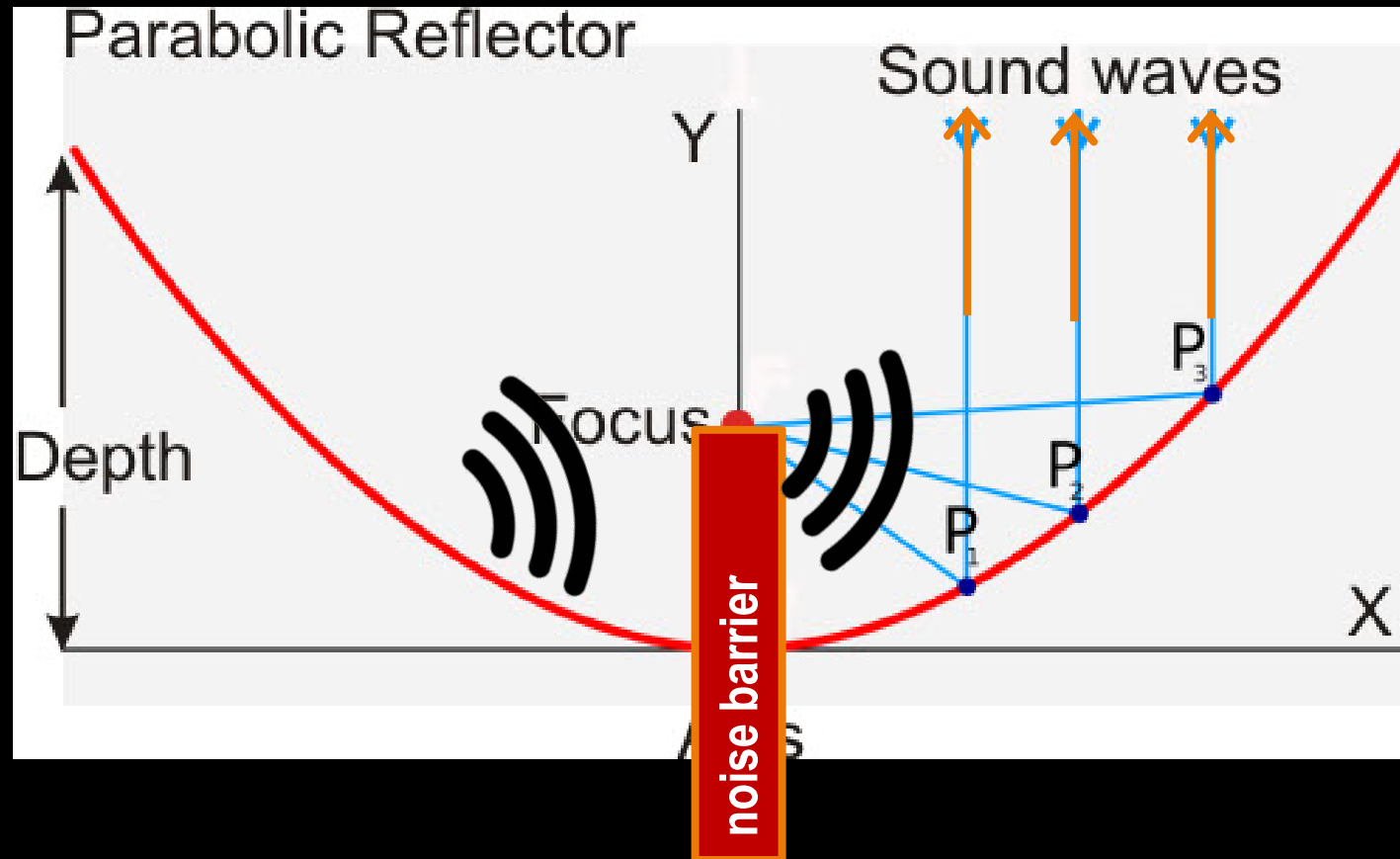
- **Simpeler** ontwerp



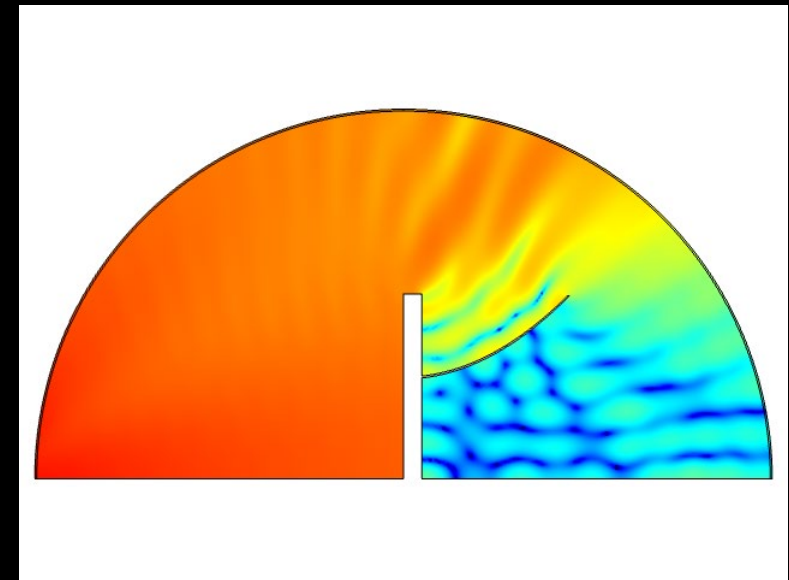
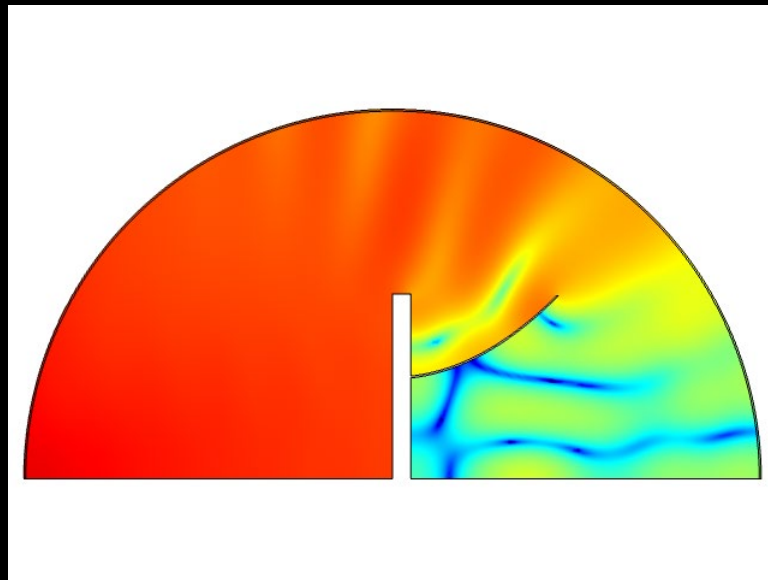
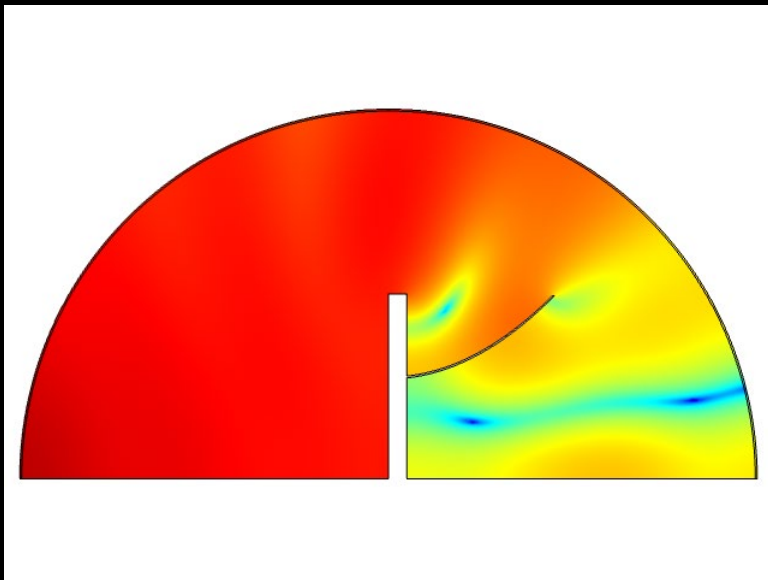
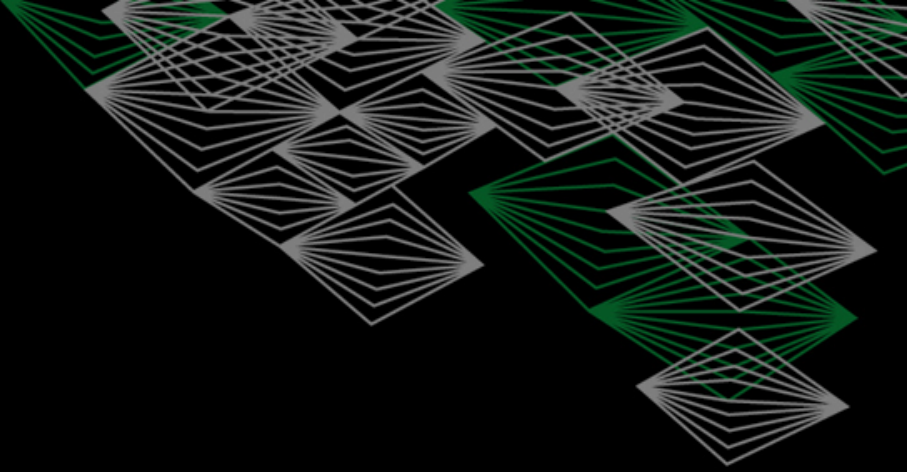
PARABOLISCHE REFLECTOR



PARABOLISCHE REFLECTOR

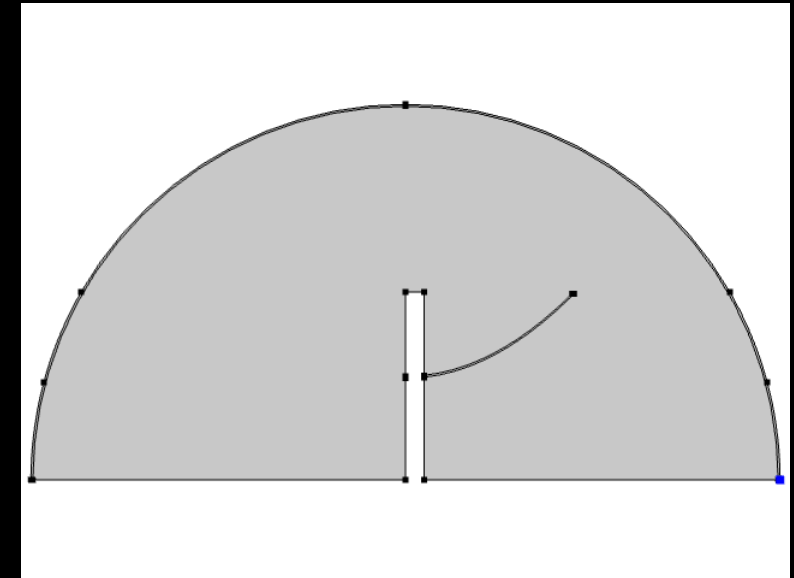
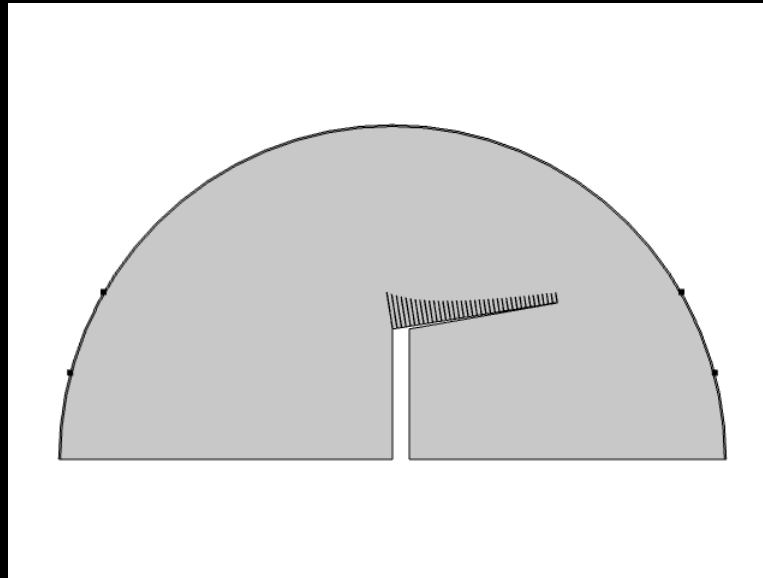
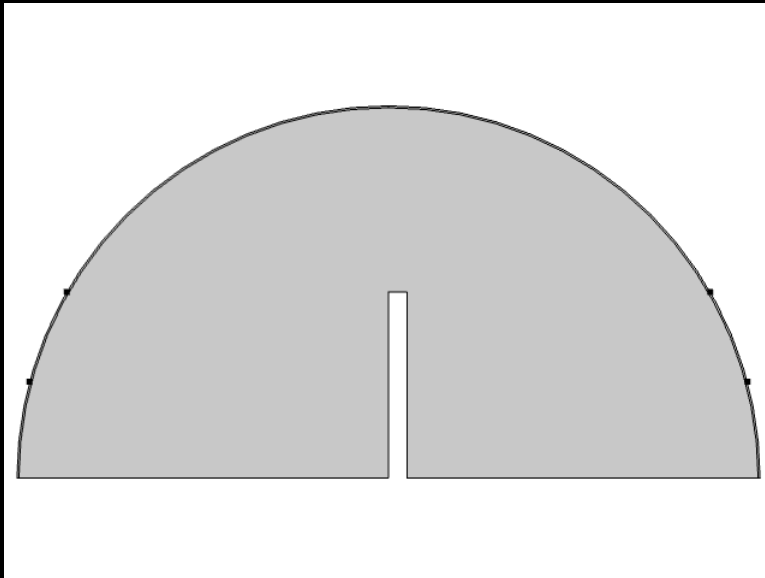


PARABOLISCHE REFLECTOR



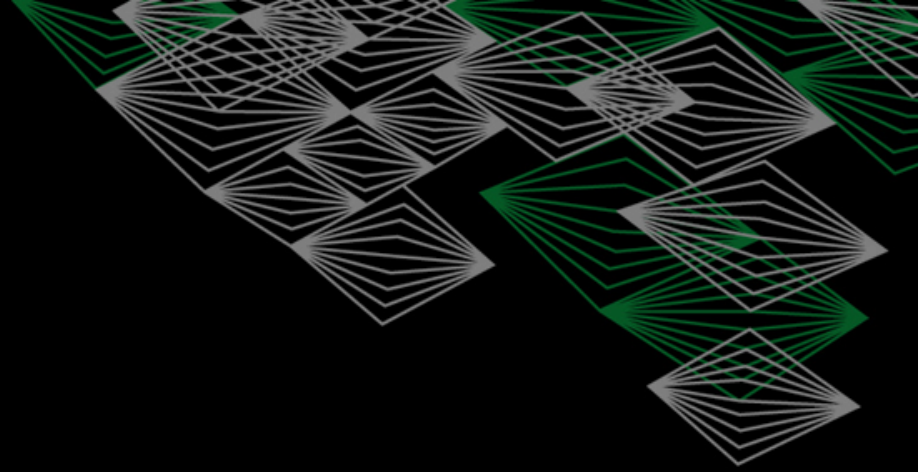
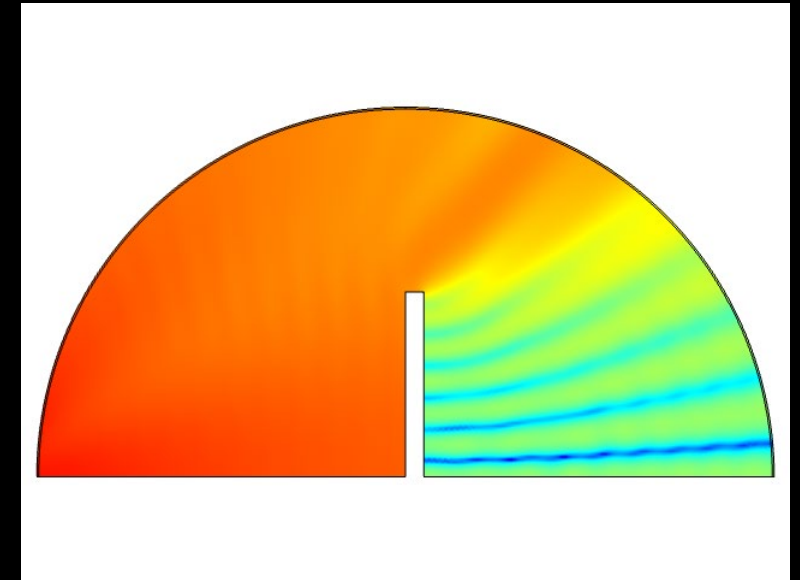
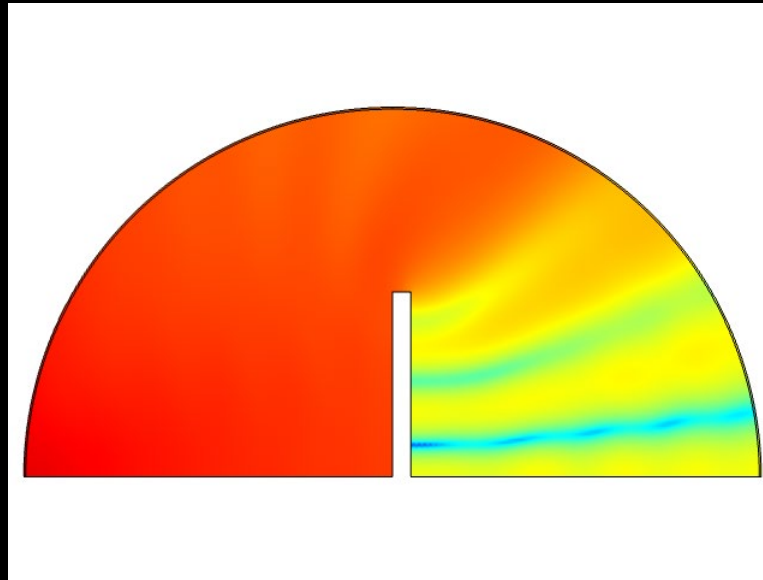
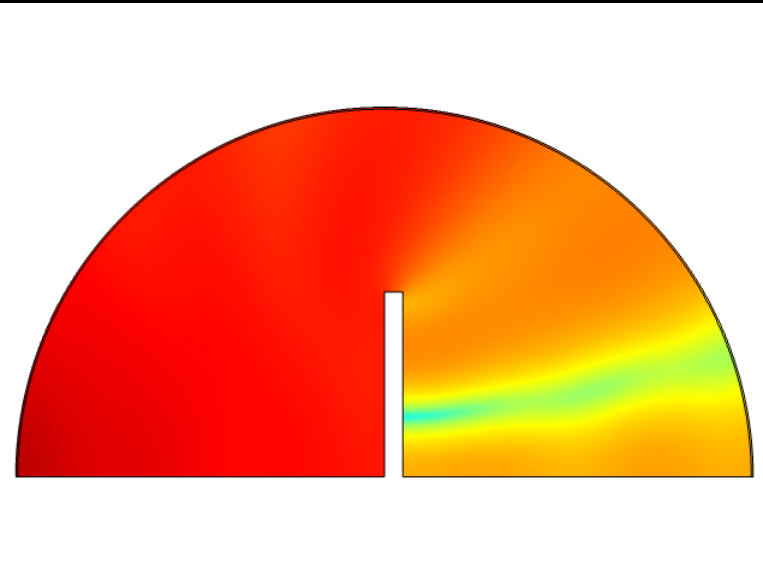
PARABOLISCHE REFLECTOR

- **Vergelijking** geluisreductie tussen scherm/diffractor/reflector



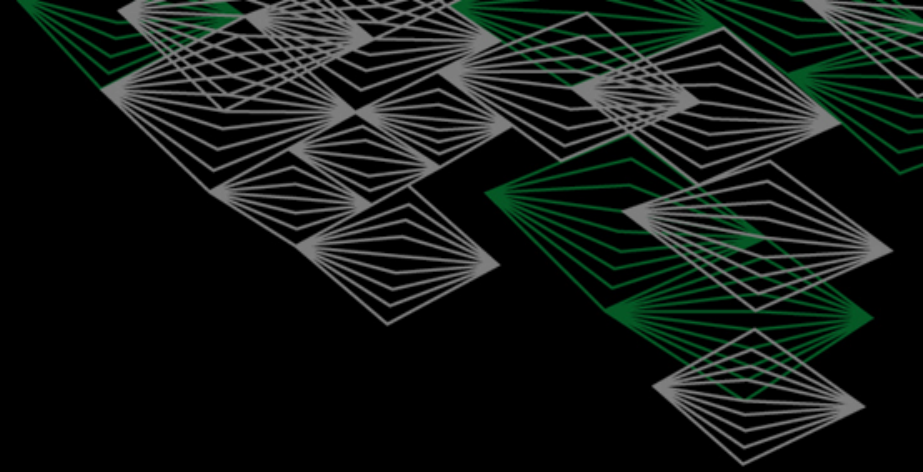
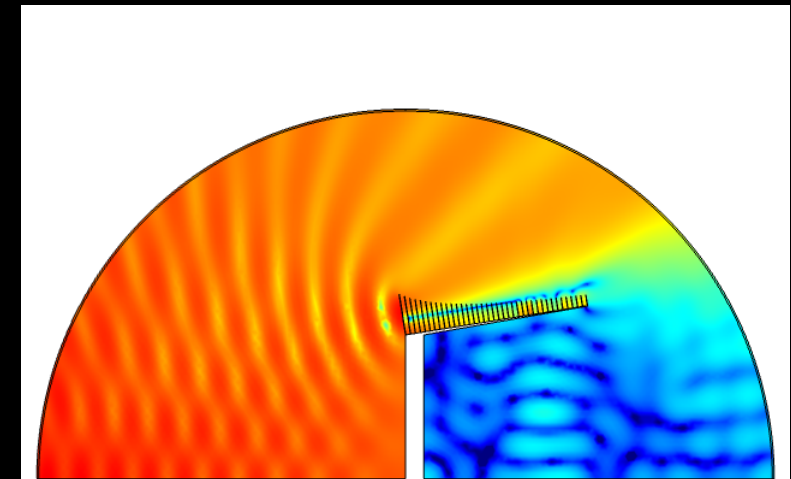
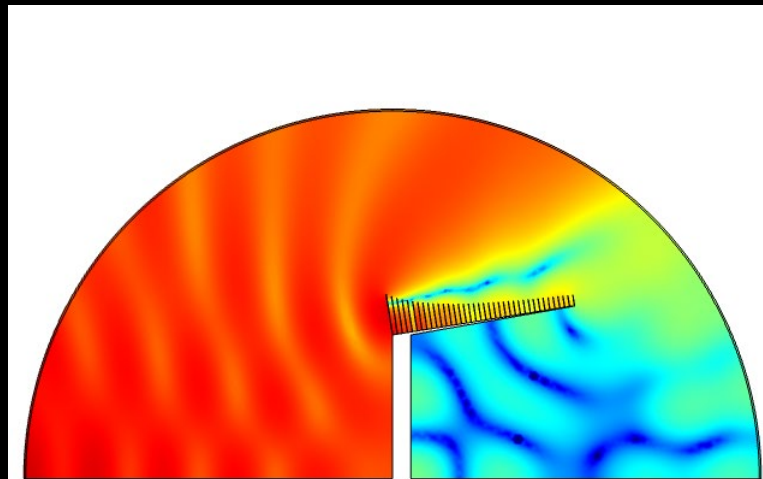
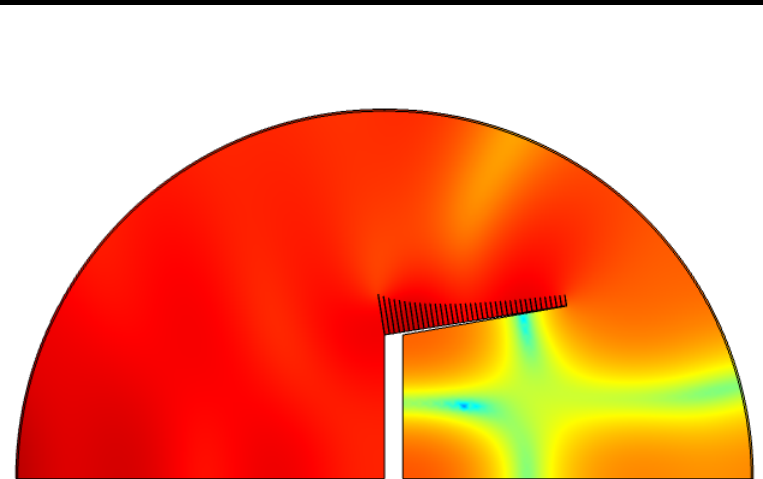
PARABOLISCHE REFLECTOR

- Scherm



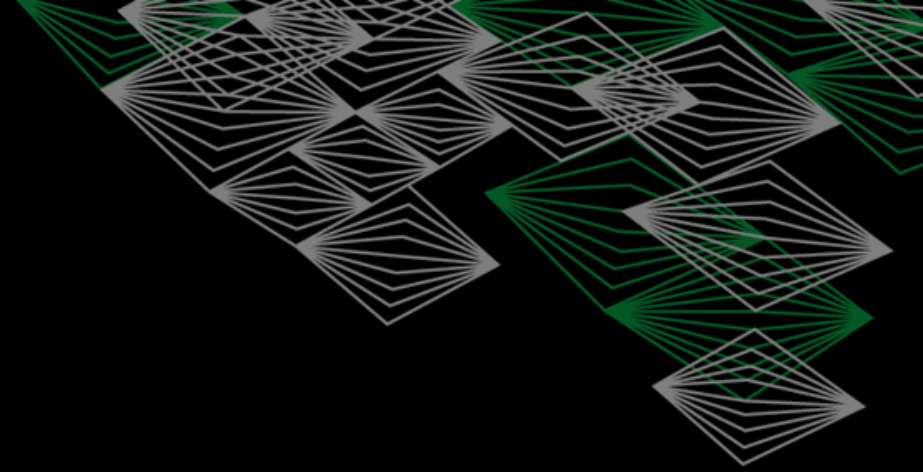
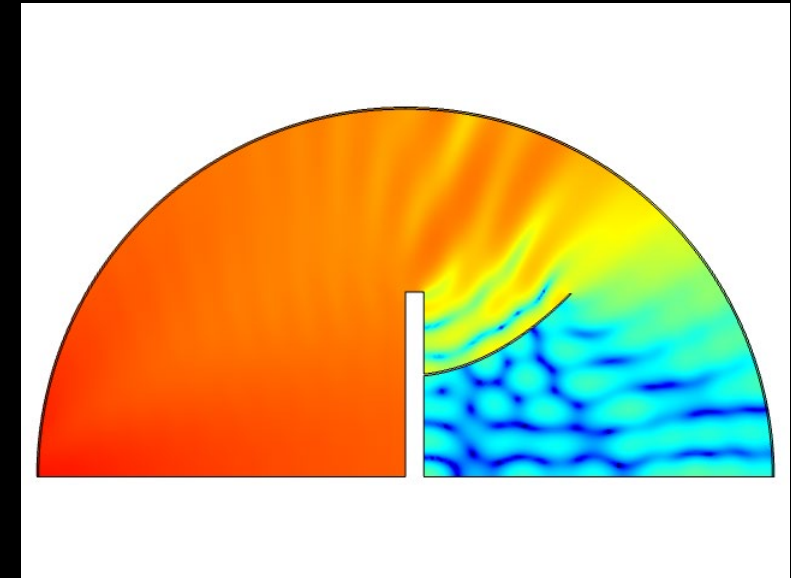
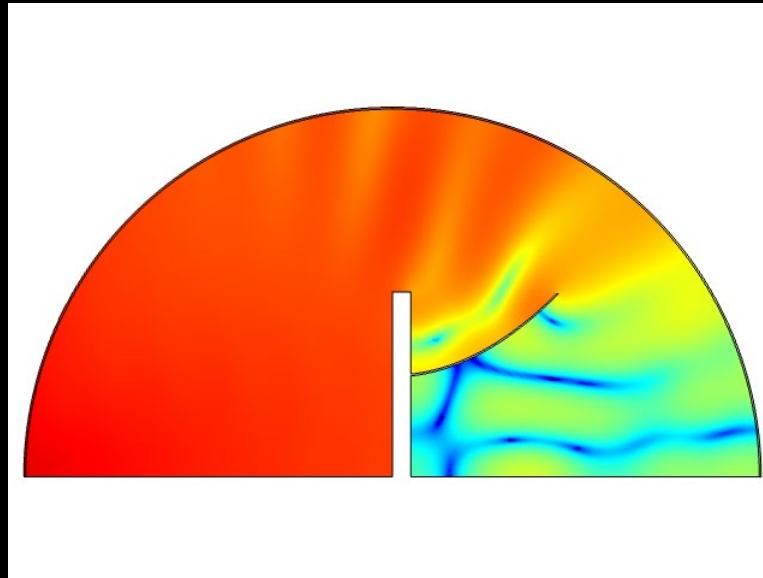
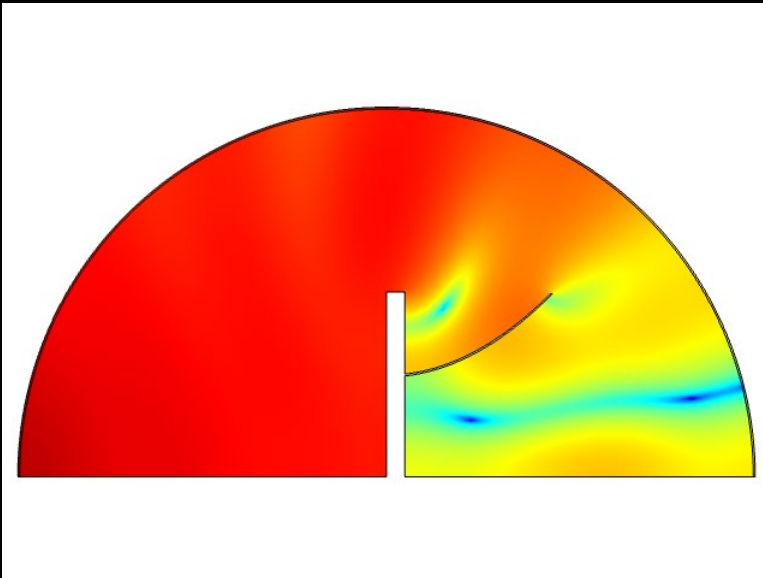
PARABOLISCHE REFLECTOR

- Diffractor



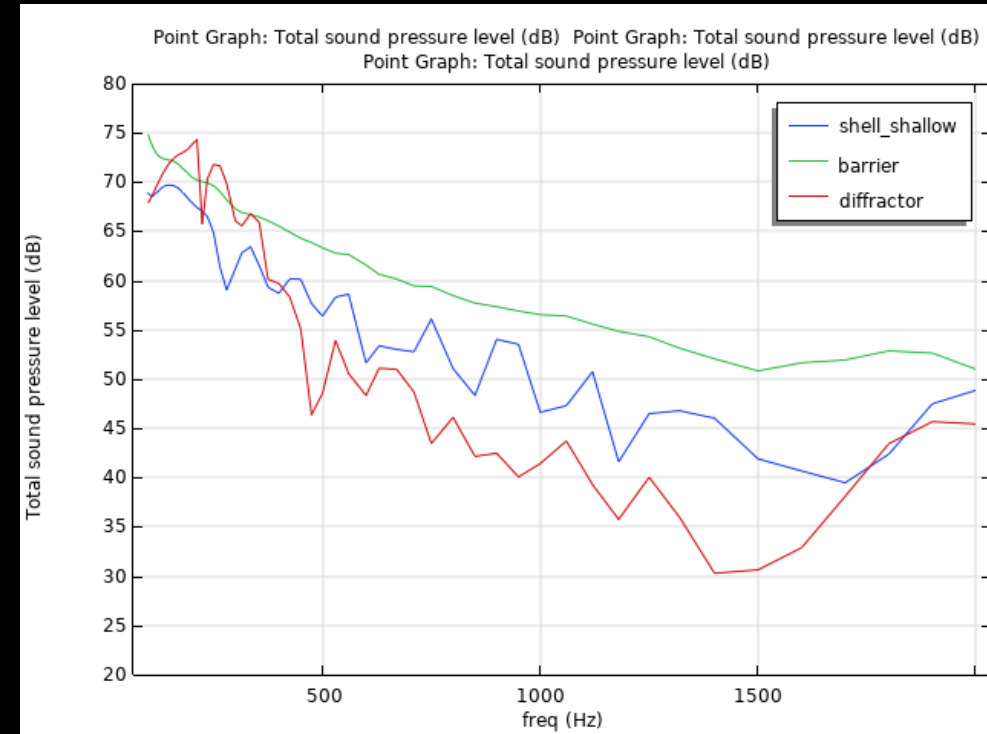
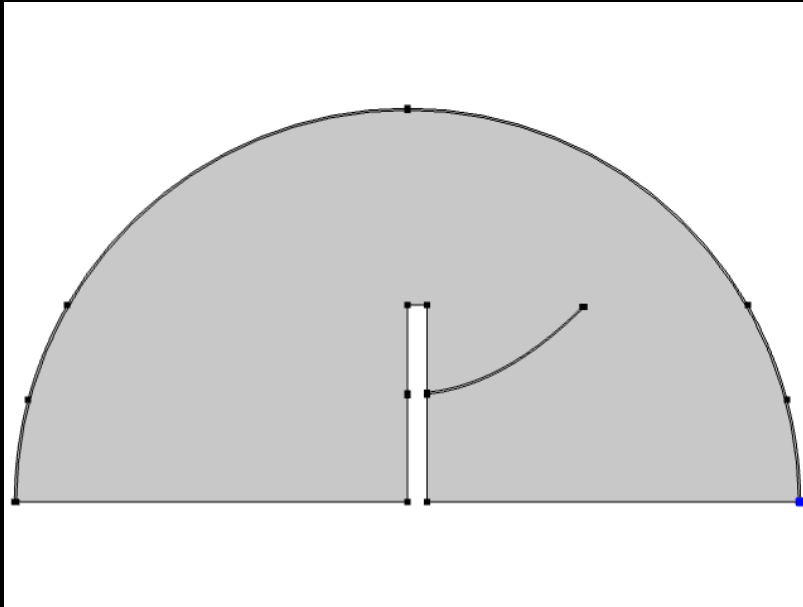
PARABOLISCHE REFLECTOR

- Parabolische reflector



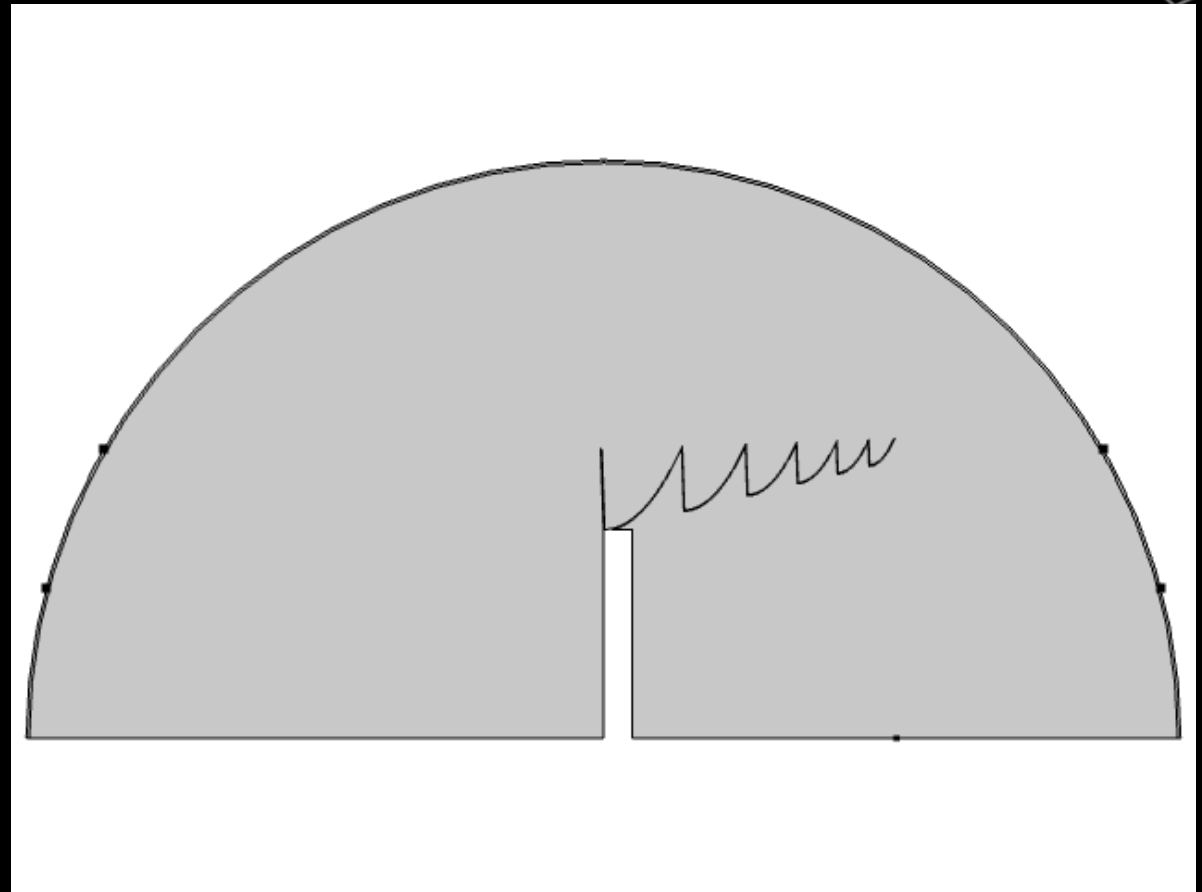
PARABOLISCHE REFLECTOR

- Reductie scherm/diffractor/reflector

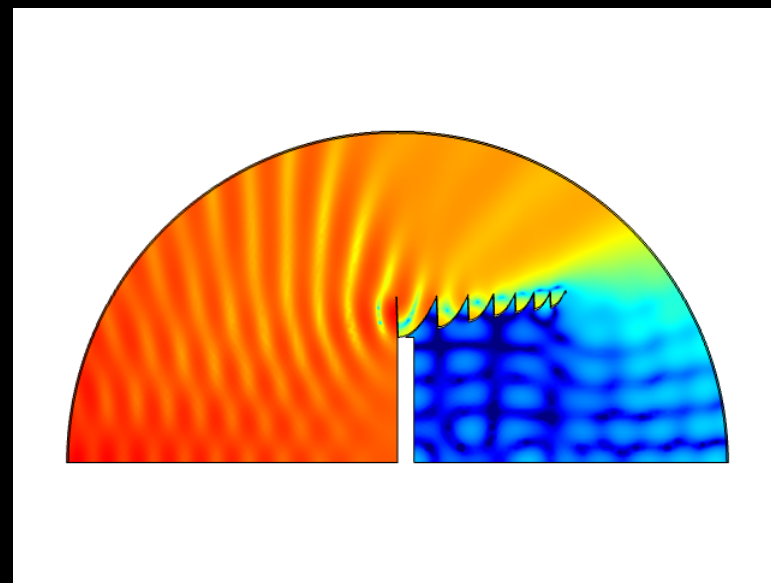
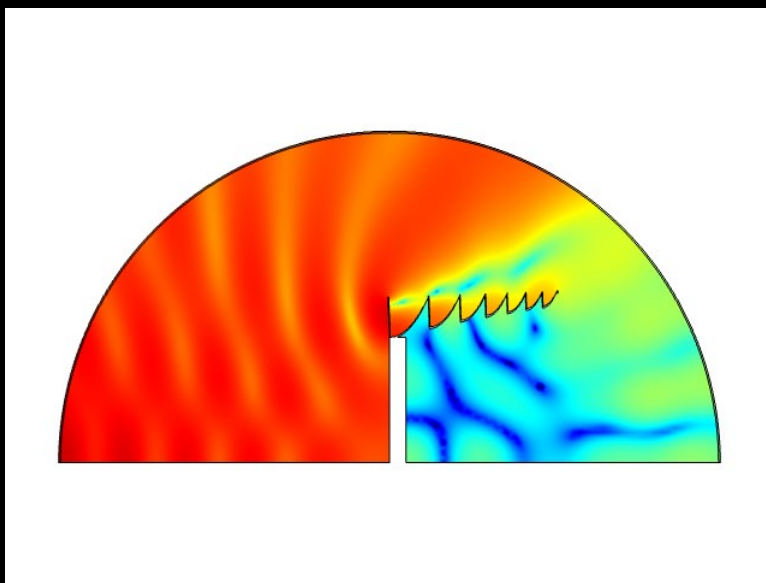
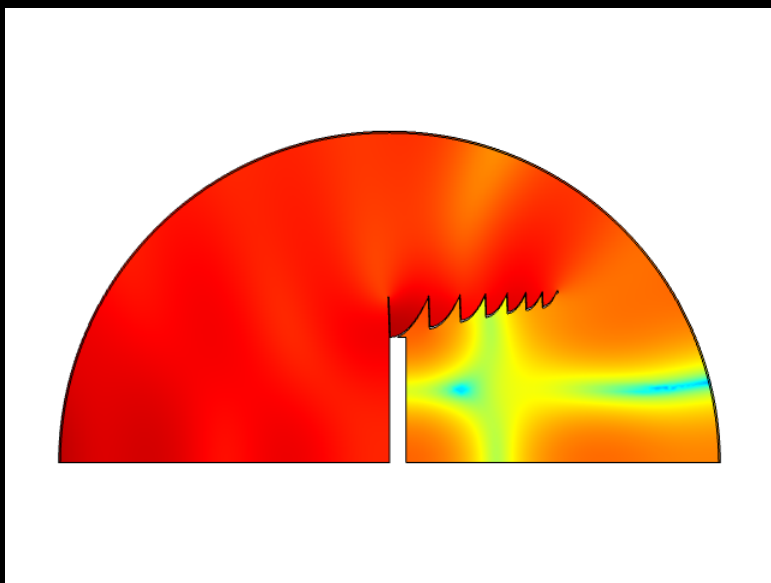
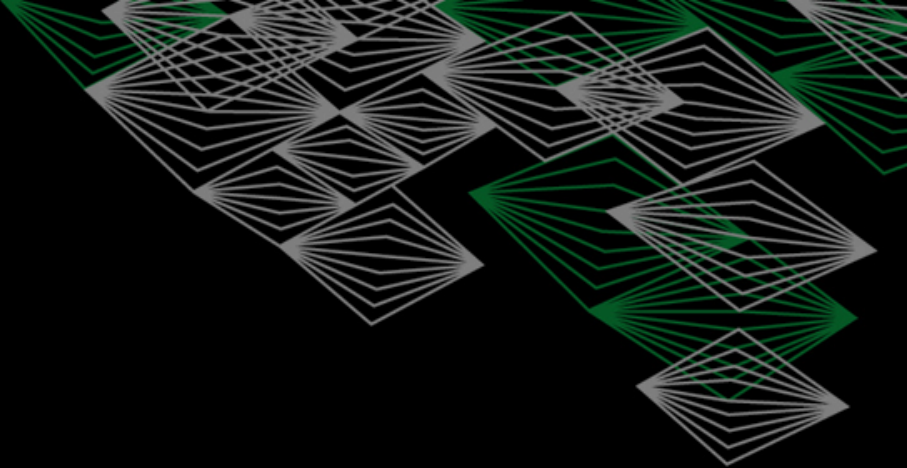


SCHELP-DIFFRACTOR

- Optimalisatie
 - meerdere reflectoren
 - optimalisatie van aantal reflectoren en de verschillende dieptes
- = Schelp-diffractor

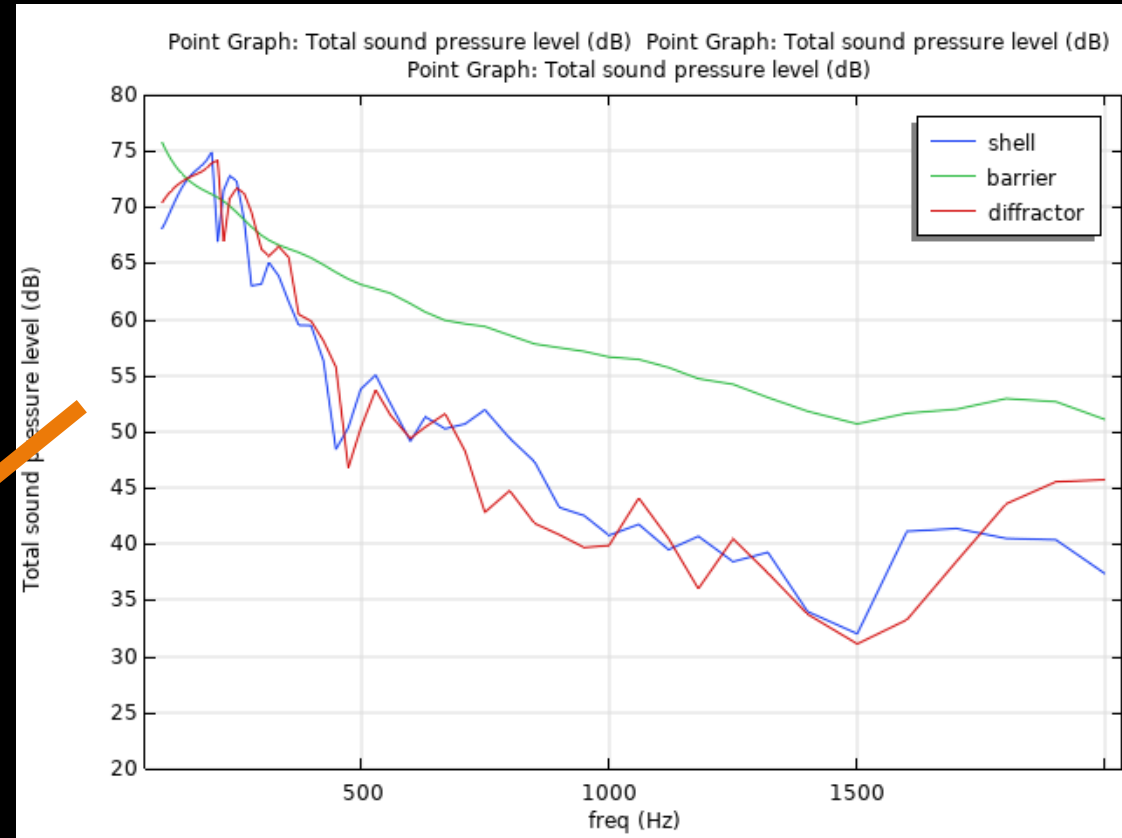
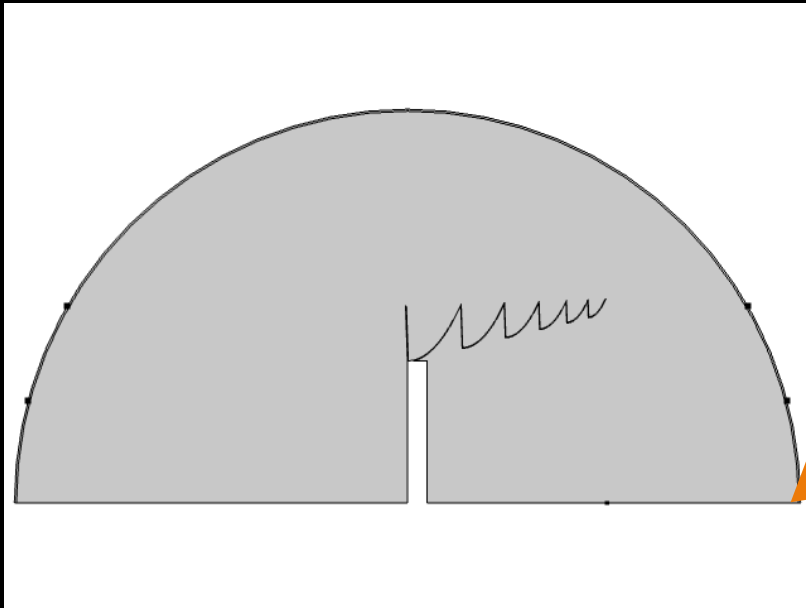


SCHELP-DIFFRACTOR

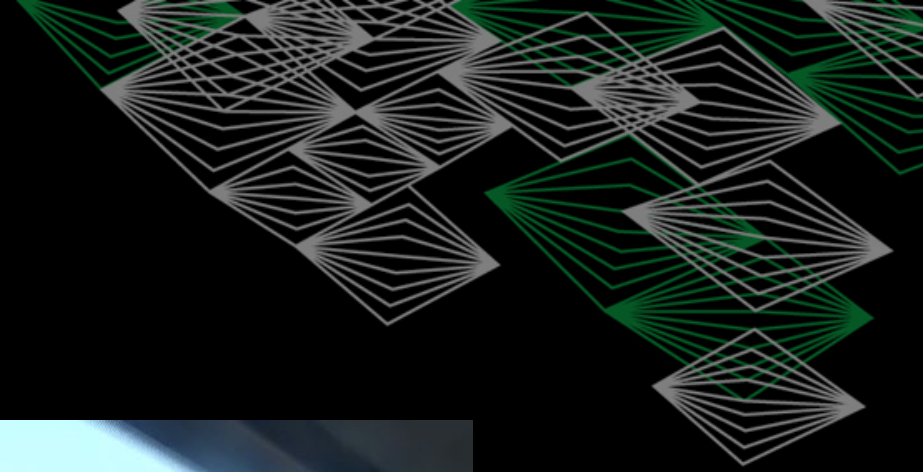


SCHELP-DIFFRACTOR

- Reductie scherm/diffractor/schelp-diffractor



DIFFRACTOR



CONCLUSIE

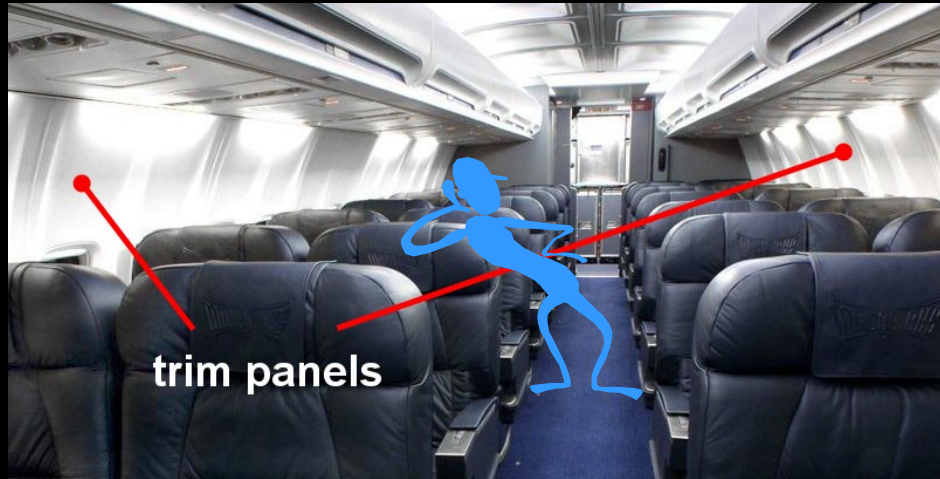
- Je kunt met **diffractoren** geluid reduceren achter de diffractor

ABSORBEREN MET RESONATOREN

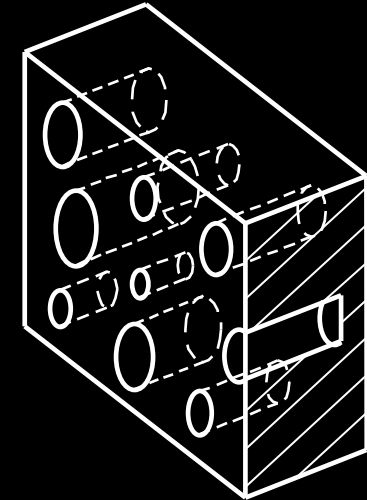
- **FACE** (Friendly Aircraft Cabin Environment)



ABSORBEREN MET RESONATOREN

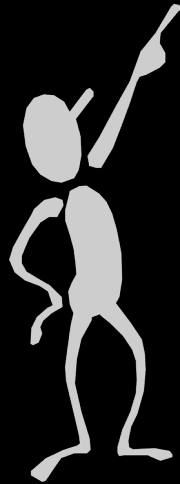


inkomende
geluidsgolven



ABSORBEREN MET RESONATOREN

- $\lambda/4$ -resonatoren



shear wave number $s = 1$



shear wave number $s = 3$



shear wave number $s = 5$



shear wave number $s = 10$

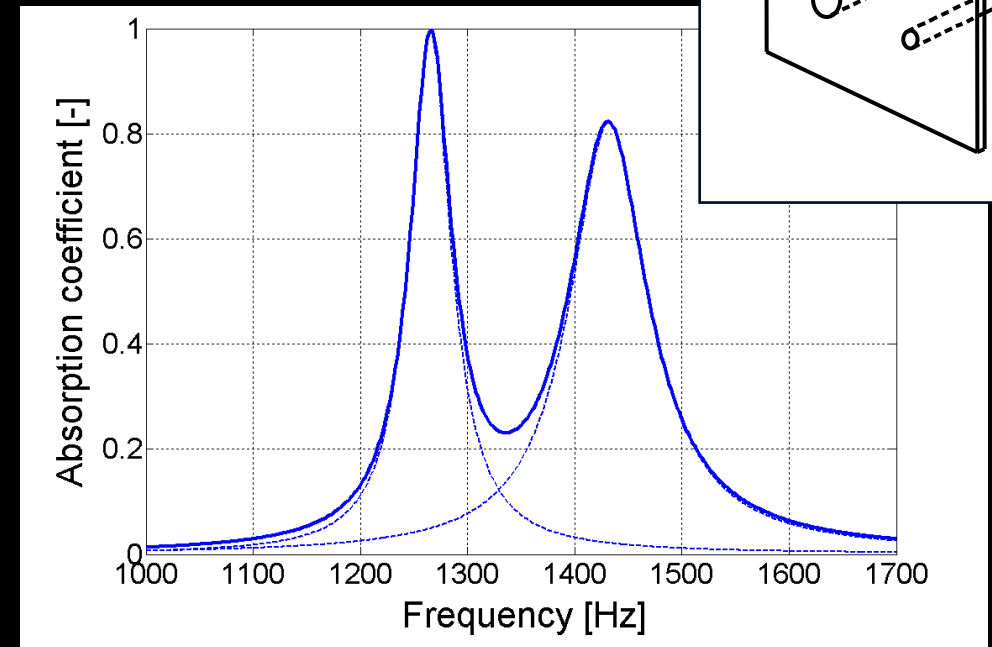
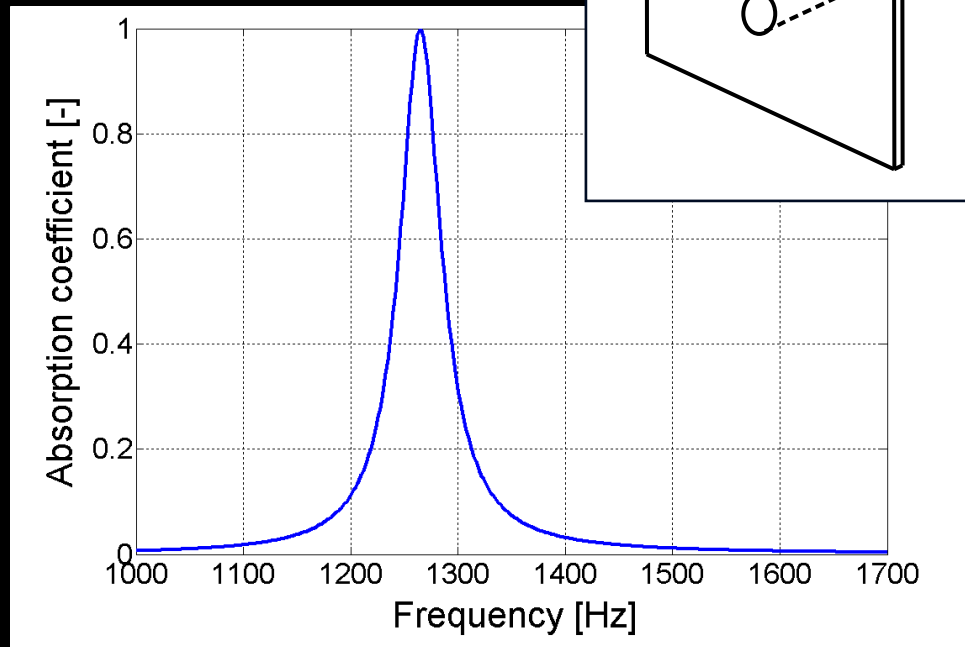


shear wave number $s = 50$



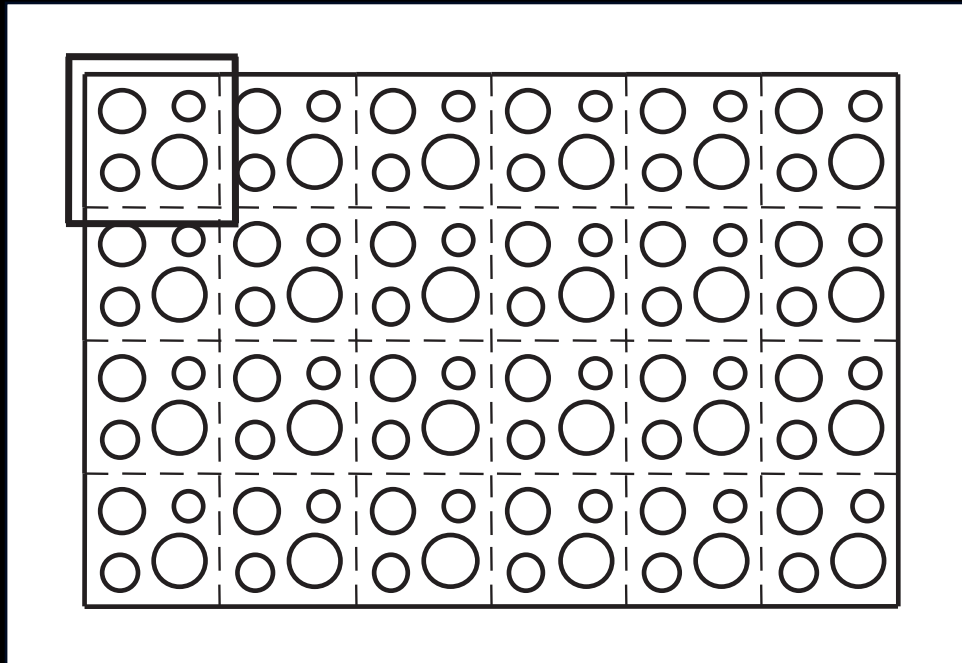
ABSORBEREN MET RESONATOREN

- Absorptie-coefficient



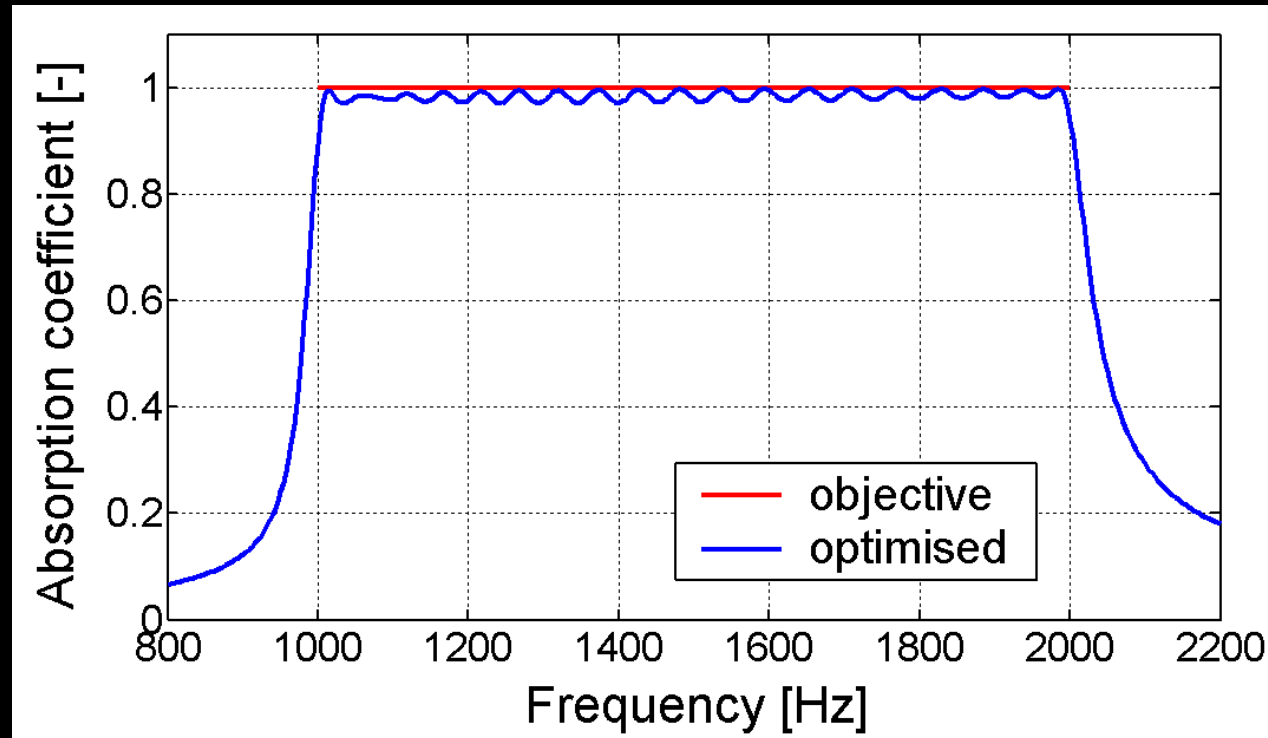
ABSORBEREN MET RESONATOREN

- Oppervlak vol met **resonatoren** (identieke 'patches')



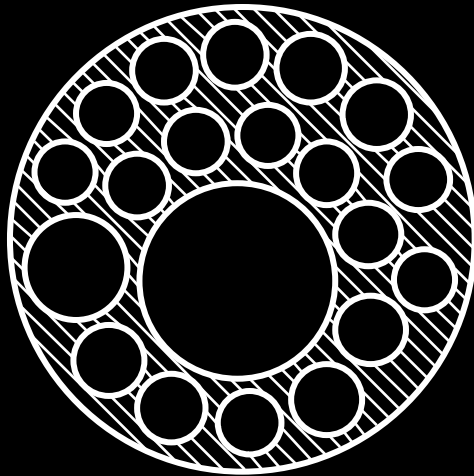
ABSORBEREN MET RESONATOREN

- Optimaliseren met 20 resonatoren

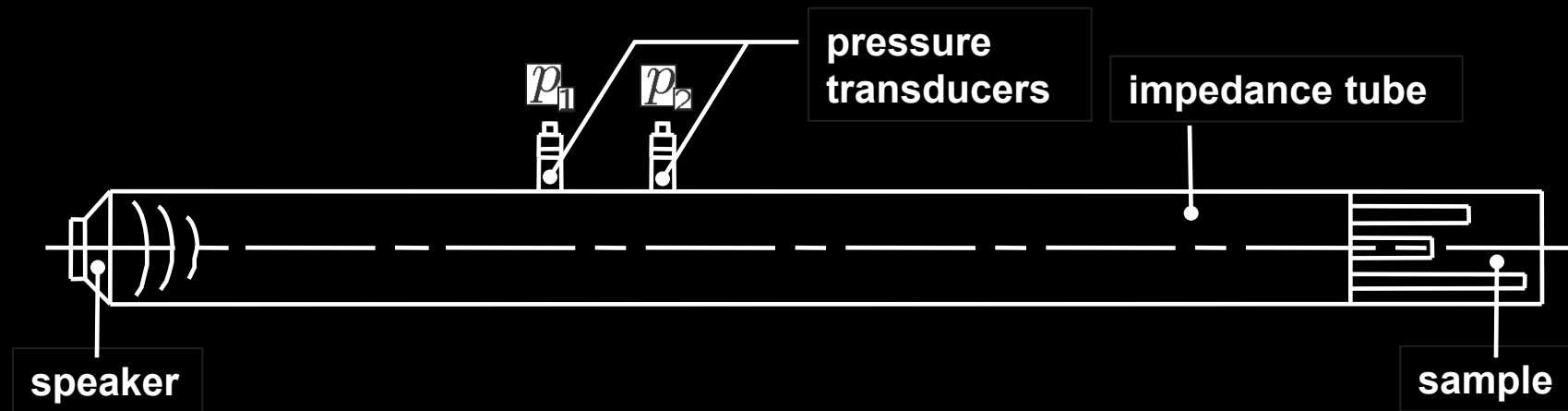


ABSORBEREN MET RESONATOREN

- Optimaliseren met 20 resonatoren



ABSORBEREN MET RESONATOREN



transfer function

$$H_{21} = \frac{p_2}{p_1}$$

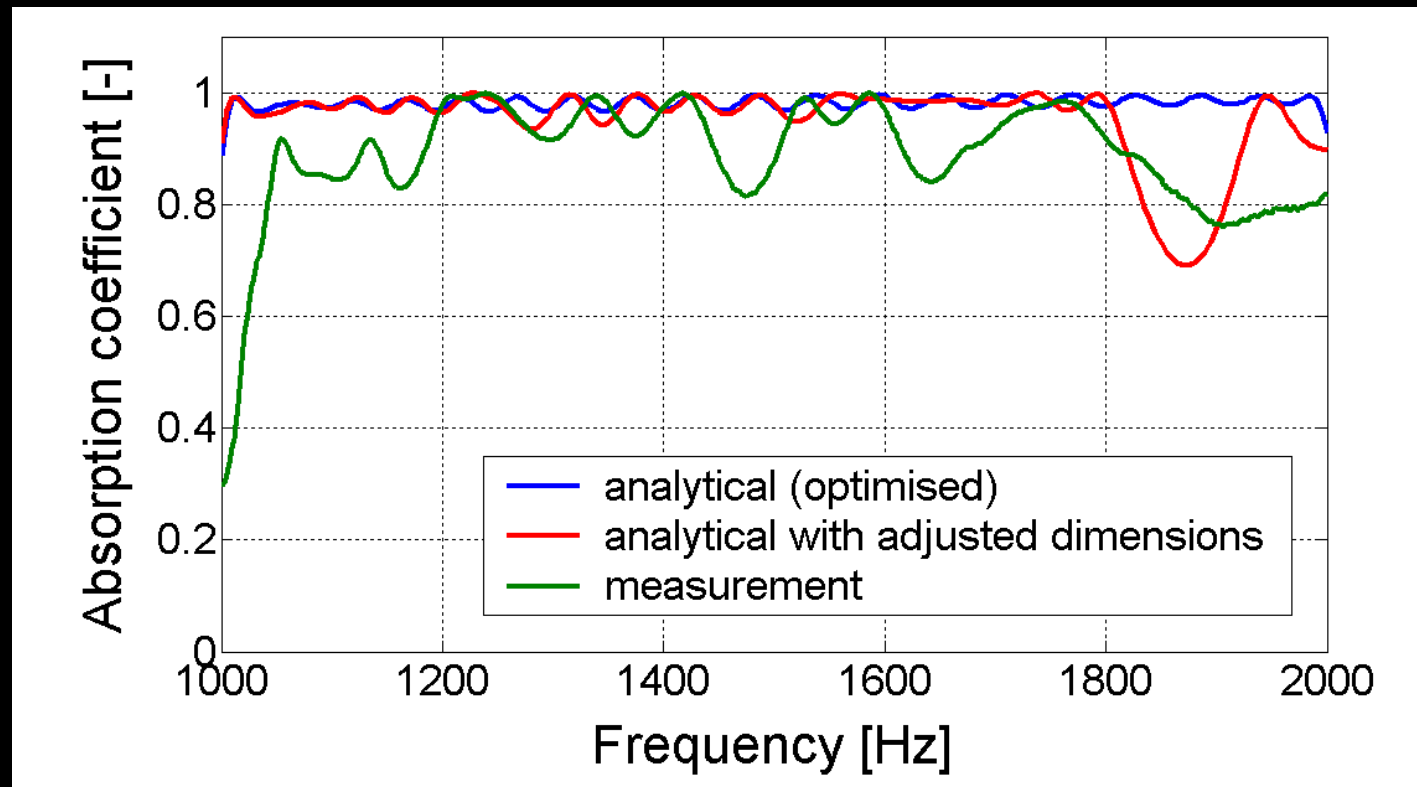
reflection coefficient

$$\mathcal{R}$$

absorption coefficient

$$\alpha = 1 - |\mathcal{R}|^2$$

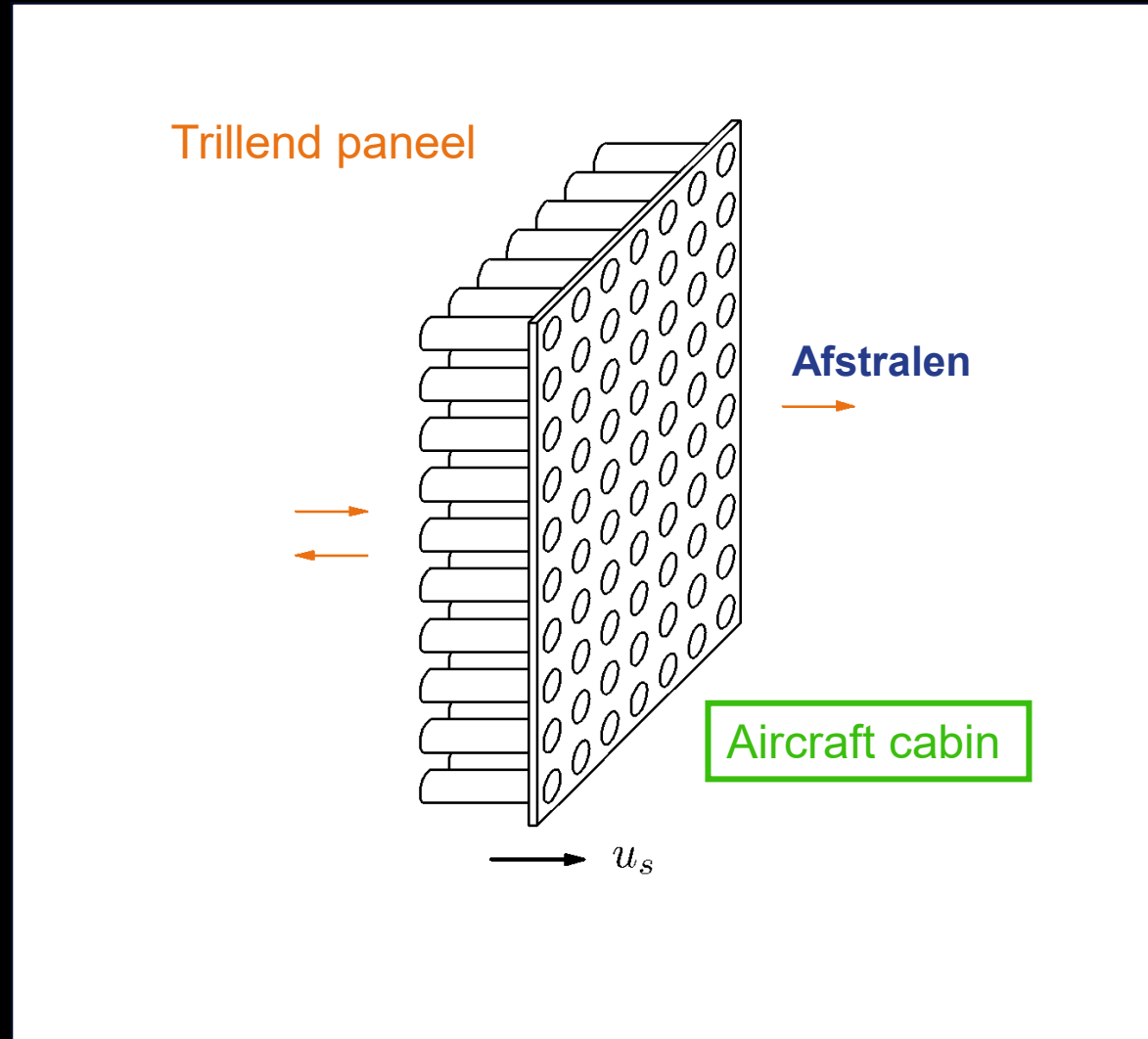
ABSORBEREN MET RESONATOREN



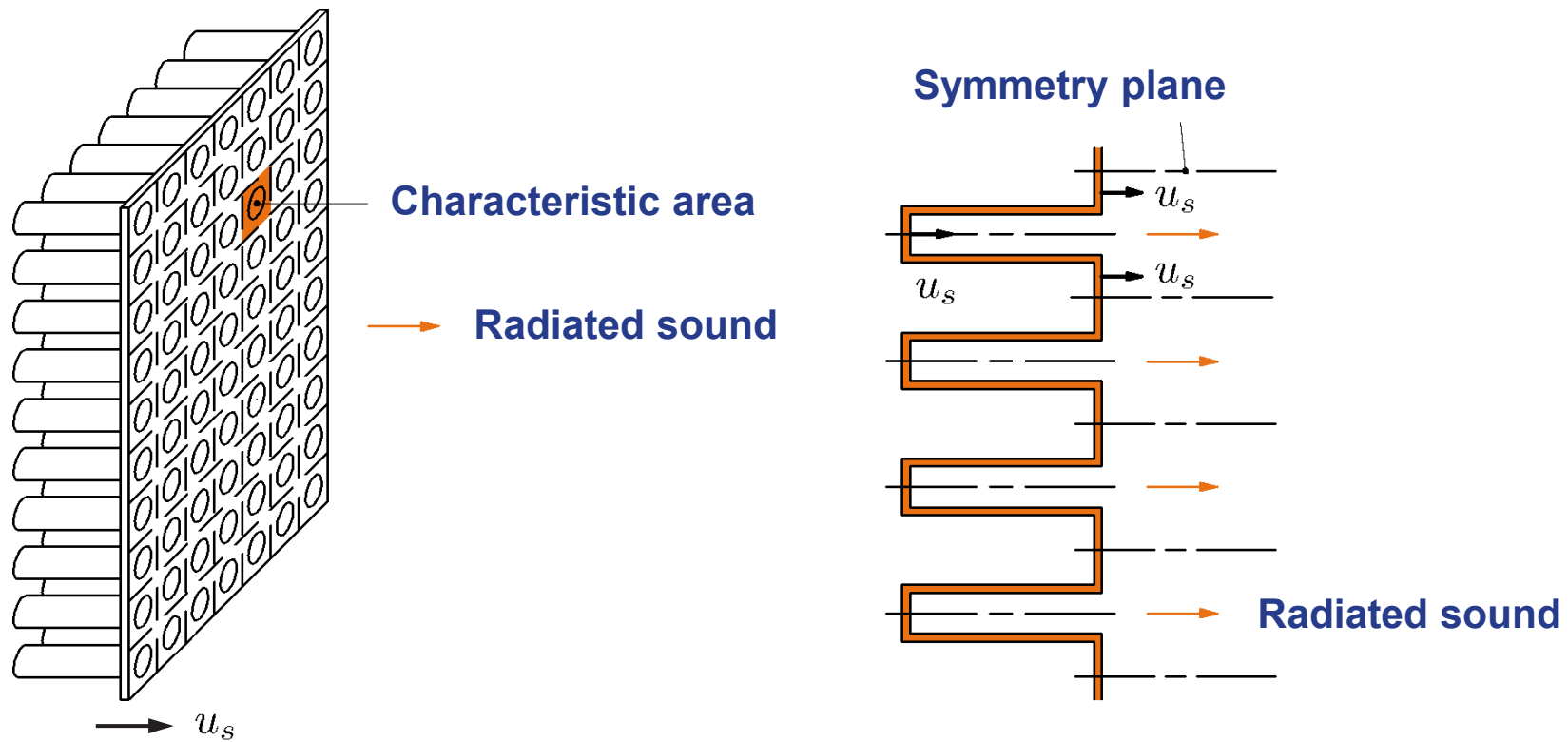
CONCLUSIE

- Je kunt met $\lambda/4$ -resonatoren geluid heel goed absorberen!

REDUCTIE **GELUIDSAFSTRALING** MET RESONATOREN



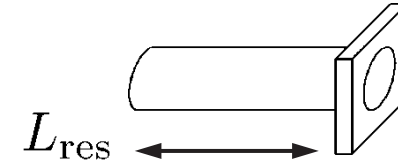
REDUCTIE **GELUIDSAFSTRALING** MET RESONATOREN



REDUCTIE **GELUIDSAFSTRALING** MET RESONATOREN

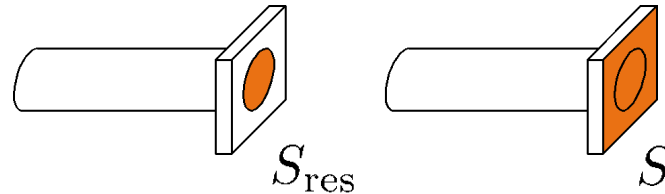
- Lengte van de resonator → centrale frequentie

$$L_{\text{res}} = \lambda/2$$

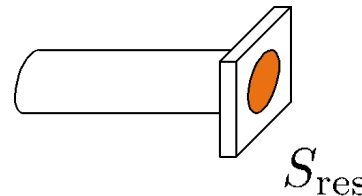


- Porositeit

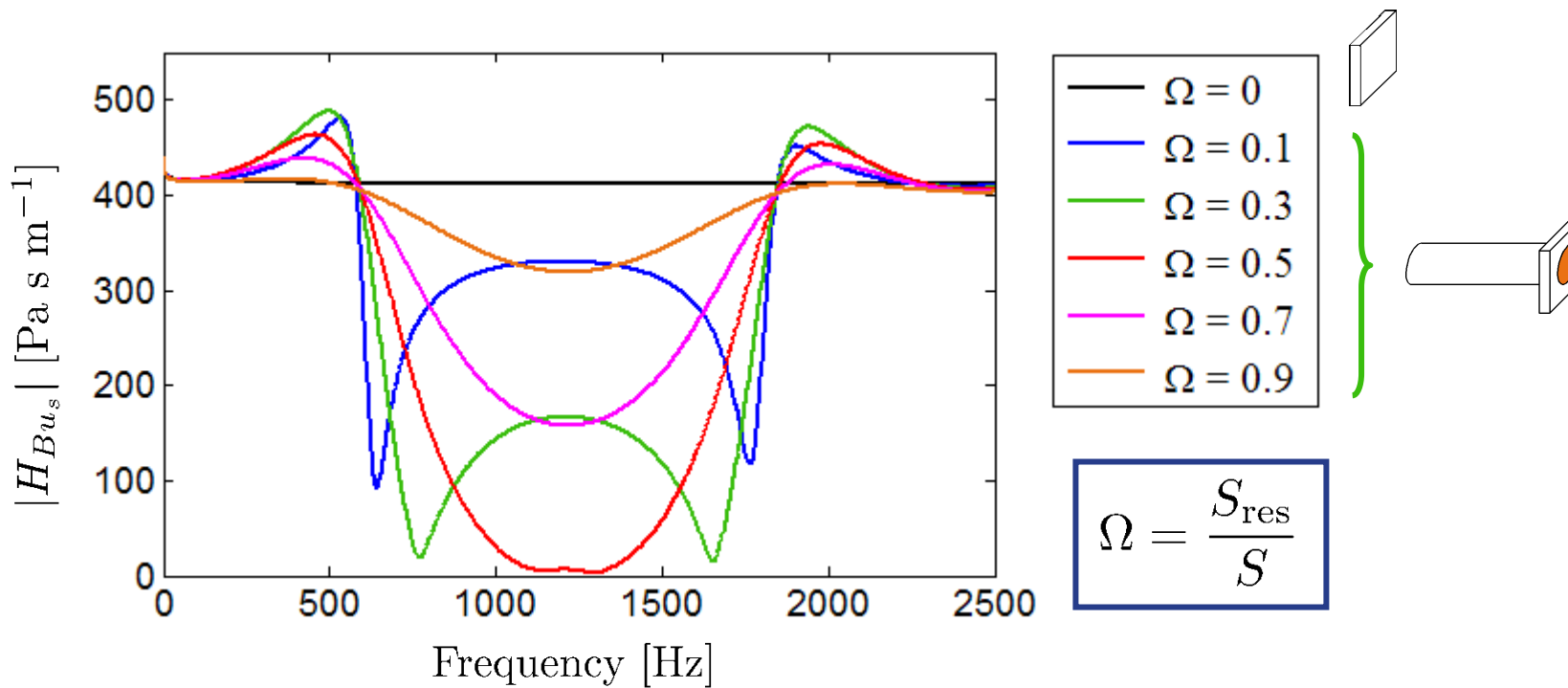
$$\Omega = \frac{S_{\text{res}}}{S}$$



- Visco-thermische effecten



AFGESTRAALD GELUID ALS FUNCTIE VAN FREQUENTIE

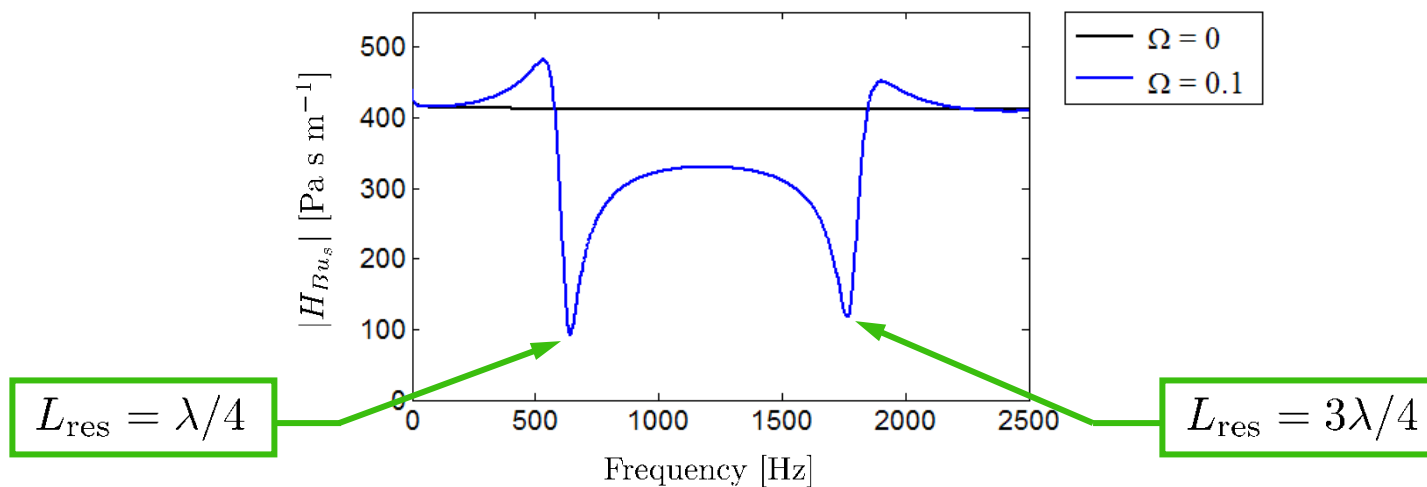
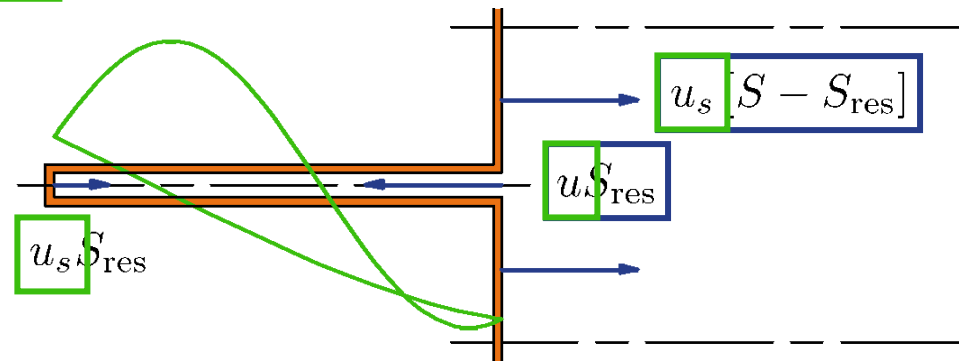


$$\Omega \ll 1 \longrightarrow S_{\text{res}} \ll S$$

Minimum sound radiation

$$|u_s [S - S_{\text{res}}]| = |u S_{\text{res}}|$$

$$u \gg u_s$$

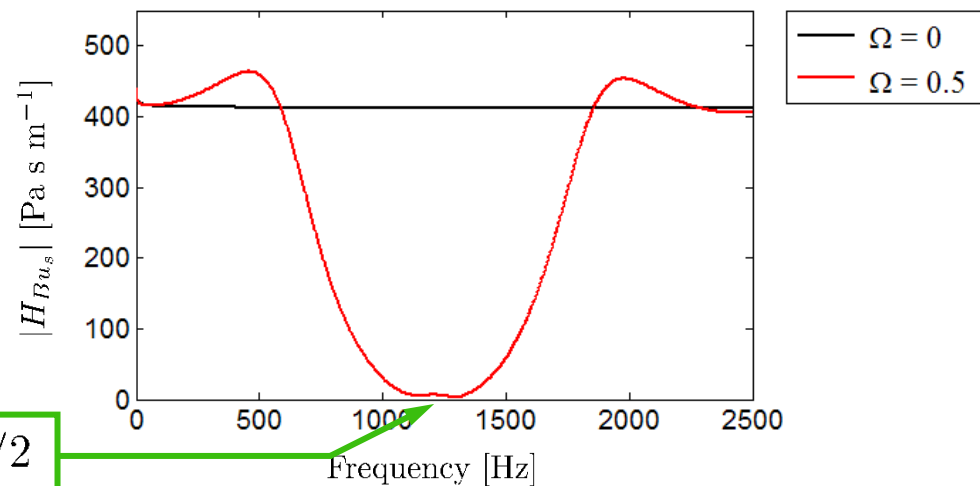
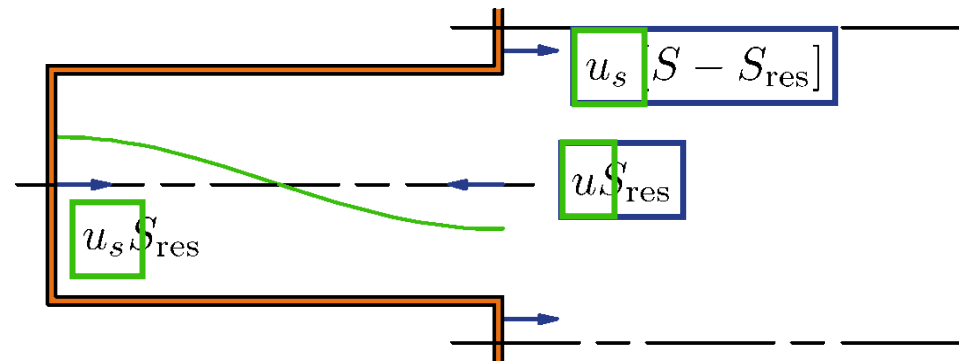


$$\Omega = 0.5 \longrightarrow S_{\text{res}} = 0.5S$$

Minimum sound radiation

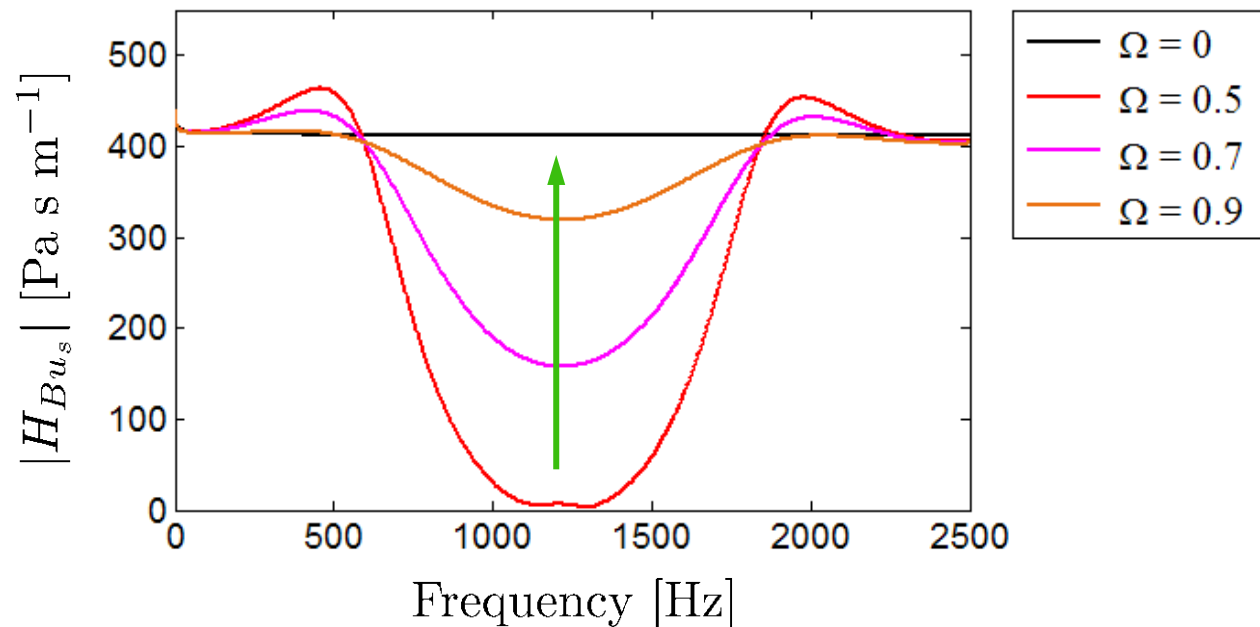
$$|u_s [S - S_{\text{res}}]| = |u S_{\text{res}}|$$

$$u = u_s$$

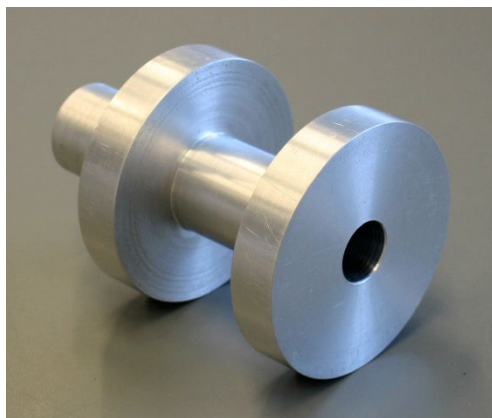


$$L_{\text{res}} = \lambda/2$$

AFGESTRAALD GELUID ALS FUNCTIE VAN FREQUENTIE

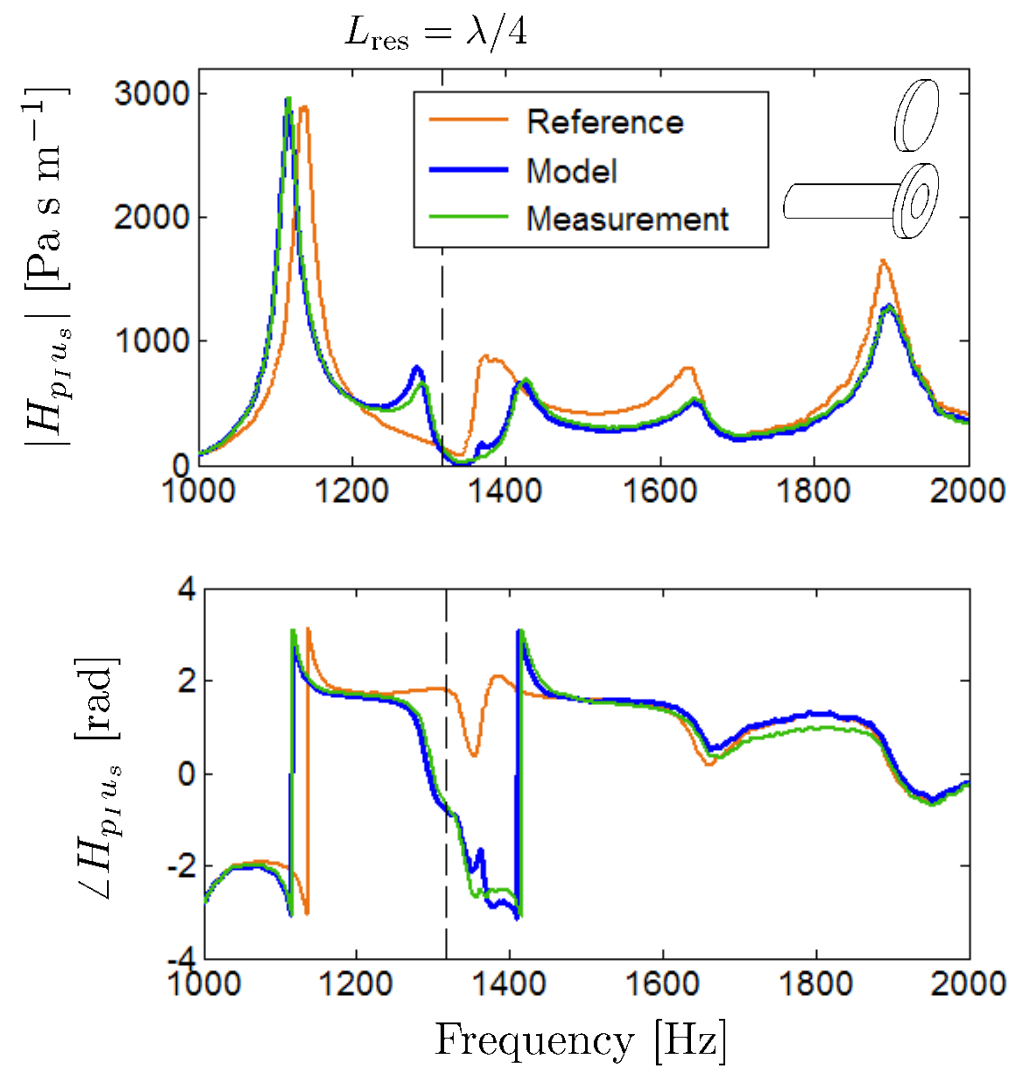


Sample 1

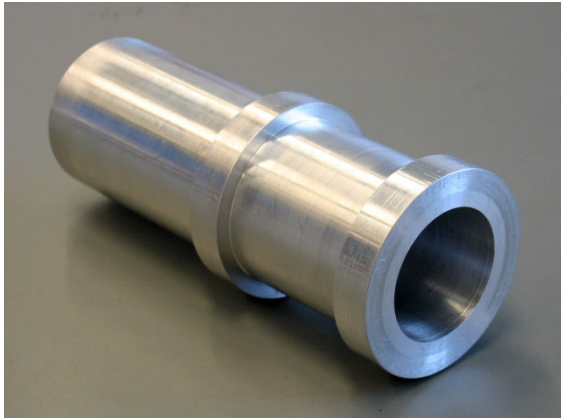


$$R_{\text{res}} = 6.0 \text{ mm}$$
$$L_{\text{phy}} = 61.5 \text{ mm}$$

$$\Omega = 0.06$$



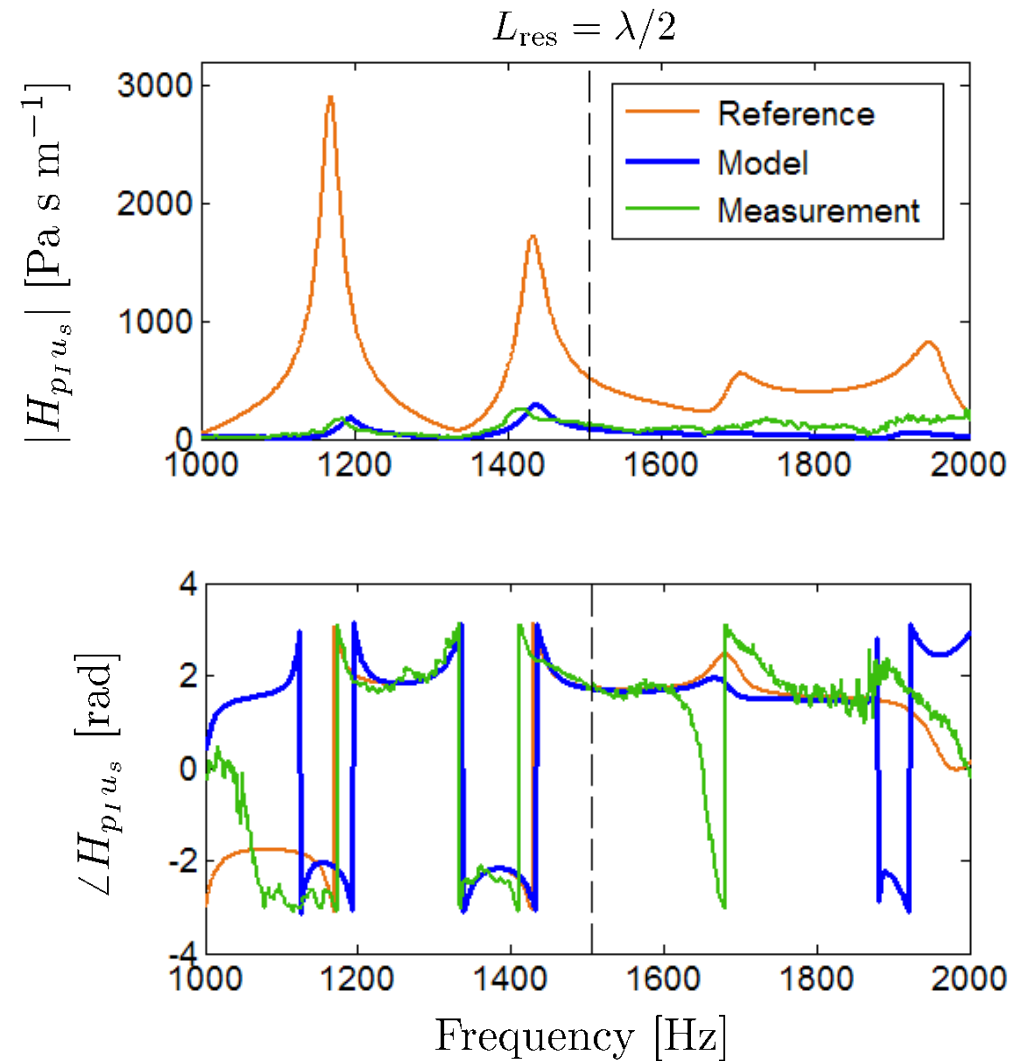
Sample 2 - Optimised



$$R_{\text{res}} = 16.1 \text{ mm}$$
$$L_{\text{phy}} = 111.2 \text{ mm}$$

$$\Omega = 0.41$$

15 dB reductie voor de frequentie
range van 1000-2000 Hz!



CONCLUSIE

- Je kunt met $\lambda/2$ -resonatoren hele hoge reducties realiseren voor het afgestraalde geluid!

CONCLUSIE

- **Fysische begrip** is essentieel voor het stiller maken van de omgeving
- Er is nog steeds ruimte voor nieuwe **geluidsreducerende maatregelen**, gebaseerd op dit fysische begrip (het vakgebied is nog niet klaar ...)
- Het kan **stiller** in Nederland!

Dank voor de aandacht!
Zijn er vragen?

y.h.wijnant@utwente.nl