



ASCEE

www.ascee.nl

info@ascee.nl

+31 6 189 71 622

Seminar technische akoestiek

12/13/18

Overzicht

- Introductie ASCEE (10 min)
- Kickstart workshop technische akoestiek (45 min)
- Pauze
- Simuleren van geluid (10 min)
- Meten van geluid (20 min)
- Akoestisch ontwerp van producten (15 min)
- Toepassingen van niet-lineaire akoestiek (5 min)



Introductie - ASCEE

- **A**COUSTICS
- **S**OFTWARE
- **C**ONSULTANCY
- **E**NGINEERING
- **E**DUICATION
- **ASCII**

Table of ASCII characters 0-127 (x0000-x007f)

000	--0	--1	--2	--3	--4	--5	--6	--7	010	--0	--1	--2	--3	--4	--5	--6	--7
00-	<u>N</u> <u>U</u> <u>L</u>	<u>S</u> <u>O</u> <u>H</u>	<u>S</u> <u>T</u> <u>X</u>	<u>E</u> <u>T</u> <u>X</u>	<u>E</u> <u>O</u> <u>T</u>	<u>E</u> <u>N</u> <u>Q</u>	<u>A</u> <u>C</u> <u>K</u>	<u>B</u> <u>E</u> <u>L</u>	10-	@	A	B	C	D	E	F	G
01-	<u>B</u> <u>S</u>	<u>H</u> <u>T</u>	<u>L</u> <u>F</u>	<u>V</u> <u>T</u>	<u>F</u> <u>F</u>	<u>C</u> <u>R</u>	<u>S</u> <u>O</u>	<u>S</u> <u>I</u>	11-	H	I	J	K	L	M	N	O
02-	<u>D</u> <u>L</u> <u>E</u>	<u>D</u> <u>C</u> <u>1</u>	<u>D</u> <u>C</u> <u>2</u>	<u>D</u> <u>C</u> <u>3</u>	<u>D</u> <u>C</u> <u>4</u>	<u>N</u> <u>A</u> <u>K</u>	<u>S</u> <u>Y</u> <u>N</u>	<u>E</u> <u>T</u> <u>B</u>	12-	P	Q	R	S	T	U	V	W
03-	<u>C</u> <u>A</u> <u>N</u>	<u>E</u> <u>M</u>	<u>S</u> <u>U</u> <u>B</u>	<u>esc</u>	<u>F</u> <u>S</u>	<u>G</u> <u>S</u>	<u>R</u> <u>S</u>	<u>U</u> <u>S</u>	13-	X	Y	Z	[\]	^	_
04-		!	"	#	\$	%	&	'	14-	`	a	b	c	d	e	f	g
05-	()	*	+	,	-	.	/	15-	h	i	j	k	l	m	n	o
06-	0	1	2	3	4	5	6	7	16-	p	q	r	s	t	u	v	w
07-	8	9	:	;	<	=	>	?	17-	x	y	z	{		}	~	<u>D</u> <u>E</u> <u>L</u>



ASCEE

www.ascee.nl

info@ascee.nl

+31 6 189 71 622

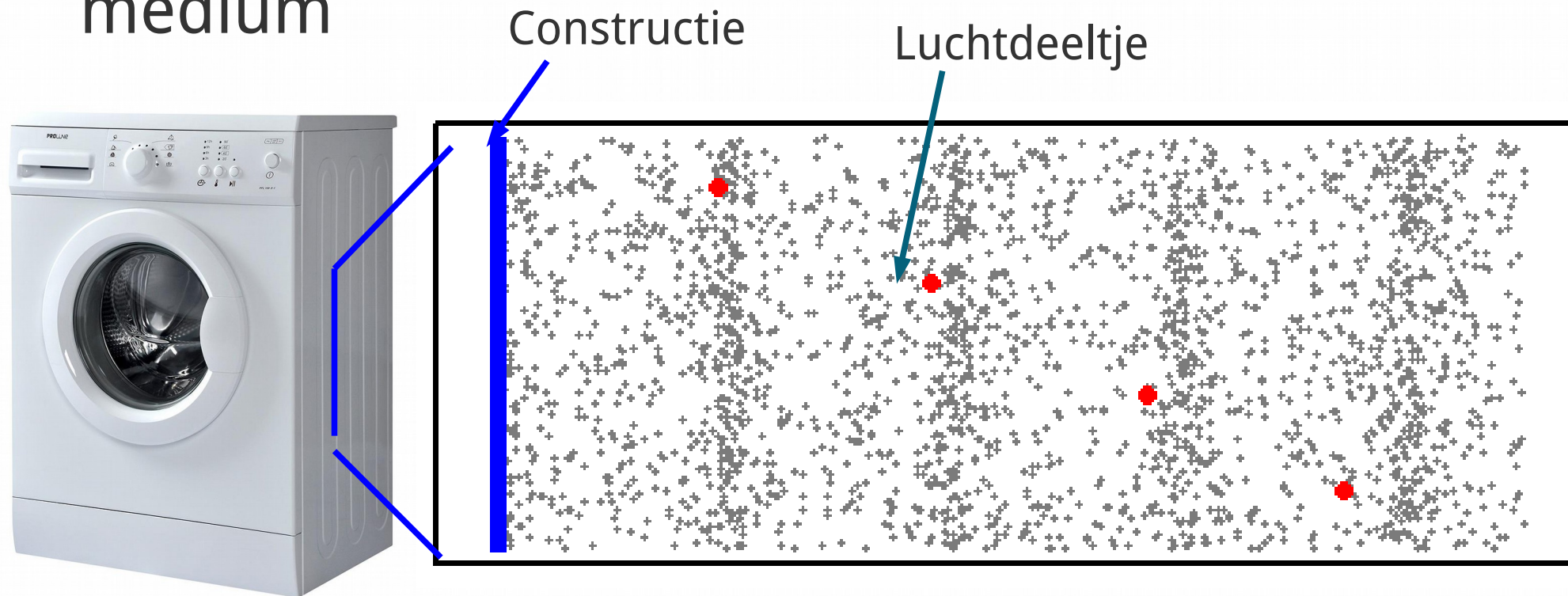
Kickstart workshop technische akoestiek

Deel 1: basisbegrippen



Wat is geluid?

- **Golven van** verstoringen in de druk en deeltjessnelheid van een samendrukbaar medium





Snelheid van geluid

- Geluidssnelheid in lucht: ~ 340 m/s ~ 1200 km/h
- Lichtsnelheid: ~ 300.000.000 m/s ~ 1,100,000,000 km/h
- Geluidssnelheid in water: ~ 1500 m/s ~ 5400 km/h



Vuistregel:

Afstand in km = tijd in sec. / 3

Vraag: waarom is van onweer op grote afstand slecht te horen waar het vandaan komt?



Geluidsdruk

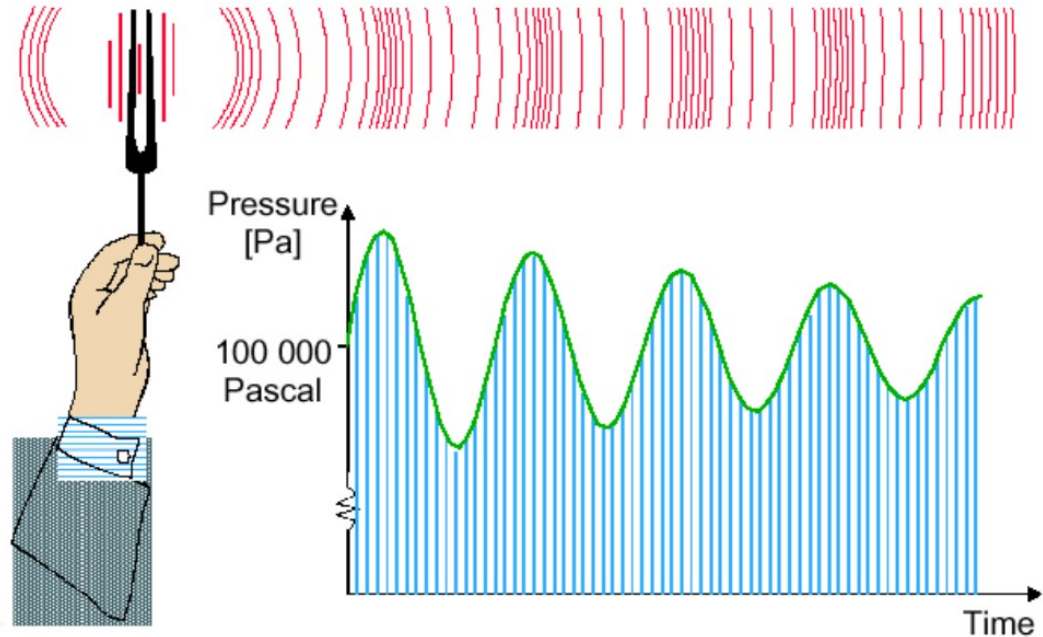
- Gemiddelde druk op zeeniveau: 100 kPa (1 bar)

- $p_{tot} = p_0 + p$ ← Kleine (akoestische) drukverstoring

↑
Totale druk

↑
Gemiddelde 10^5 Pa
(atmosferische) druk

Akoestische drukverstoring
 10^{-2} Pa



Geluidsdrukkniveau

$$p_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad [\text{Pa}]$$

Effectieve geluidsdruk

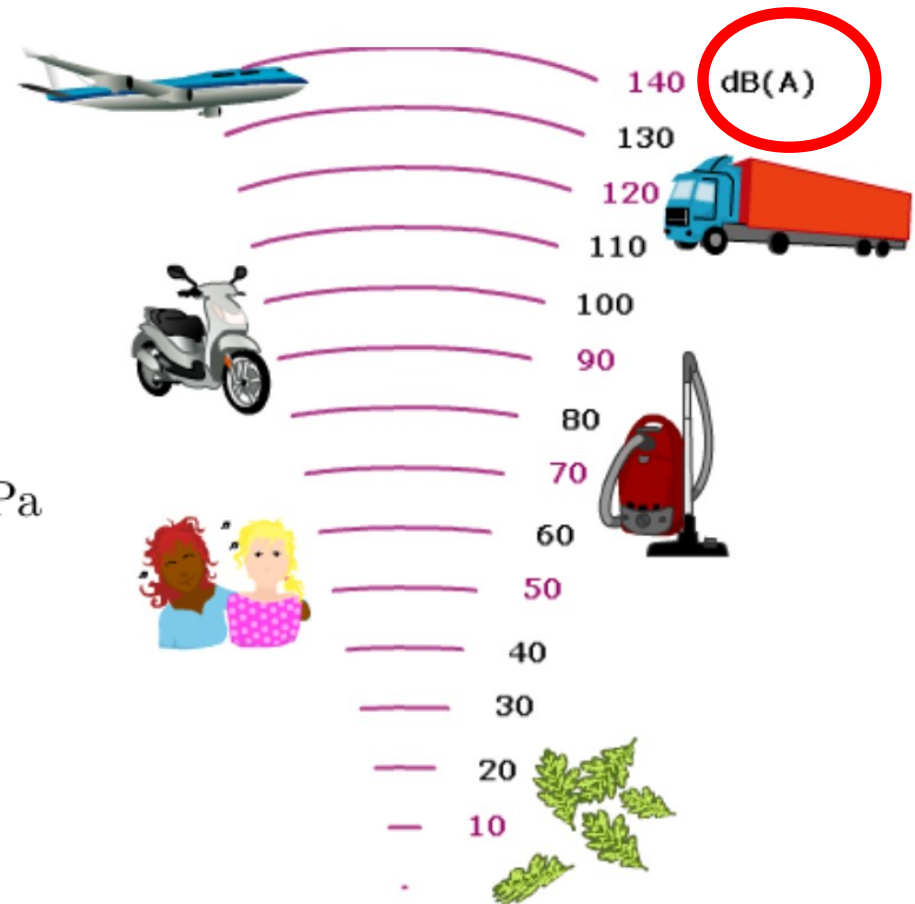


$$p_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{\text{rms}}}{p_{\text{ref}}} \right) \quad [\text{dB}]$$

Gehoorgrens: ~ 0 dB

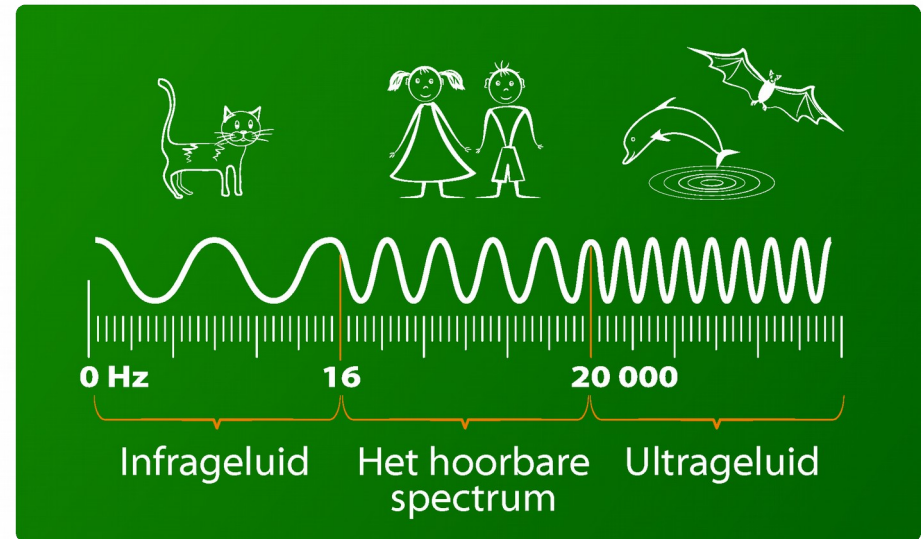
Pijngrens: ~ 135 dB



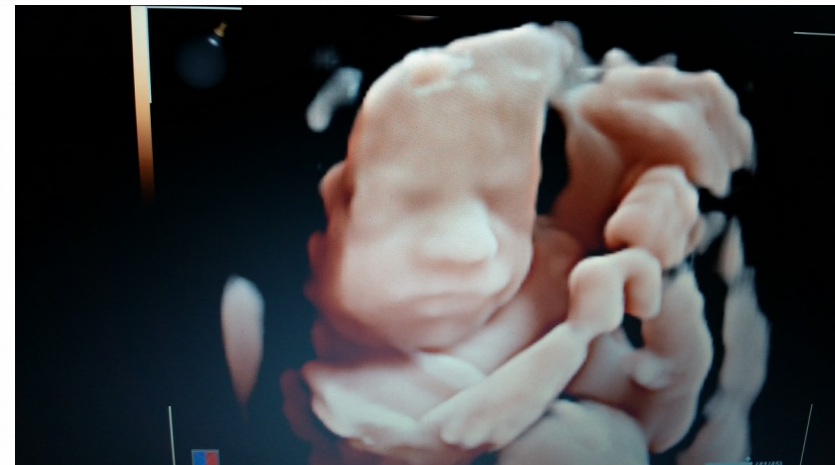


Frequentie

- Toonhoogte van geluid
- Infrageluid (< 20 Hz):
 - Aardbevingsgolven
 - Explosies (kernproeven)
 - Meteoren
- Hoorbaar geluid (20 Hz – 20 kHz)
 - Spraak (100 Hz – 2 kHz ++)
 - Muziek, verkeerslawaaai
 - Bovengrens zakt langzaam als je ouder wordt
- Ultrageluid (> 20 kHz)
 - Echoscopie
 - Dierengeluiden

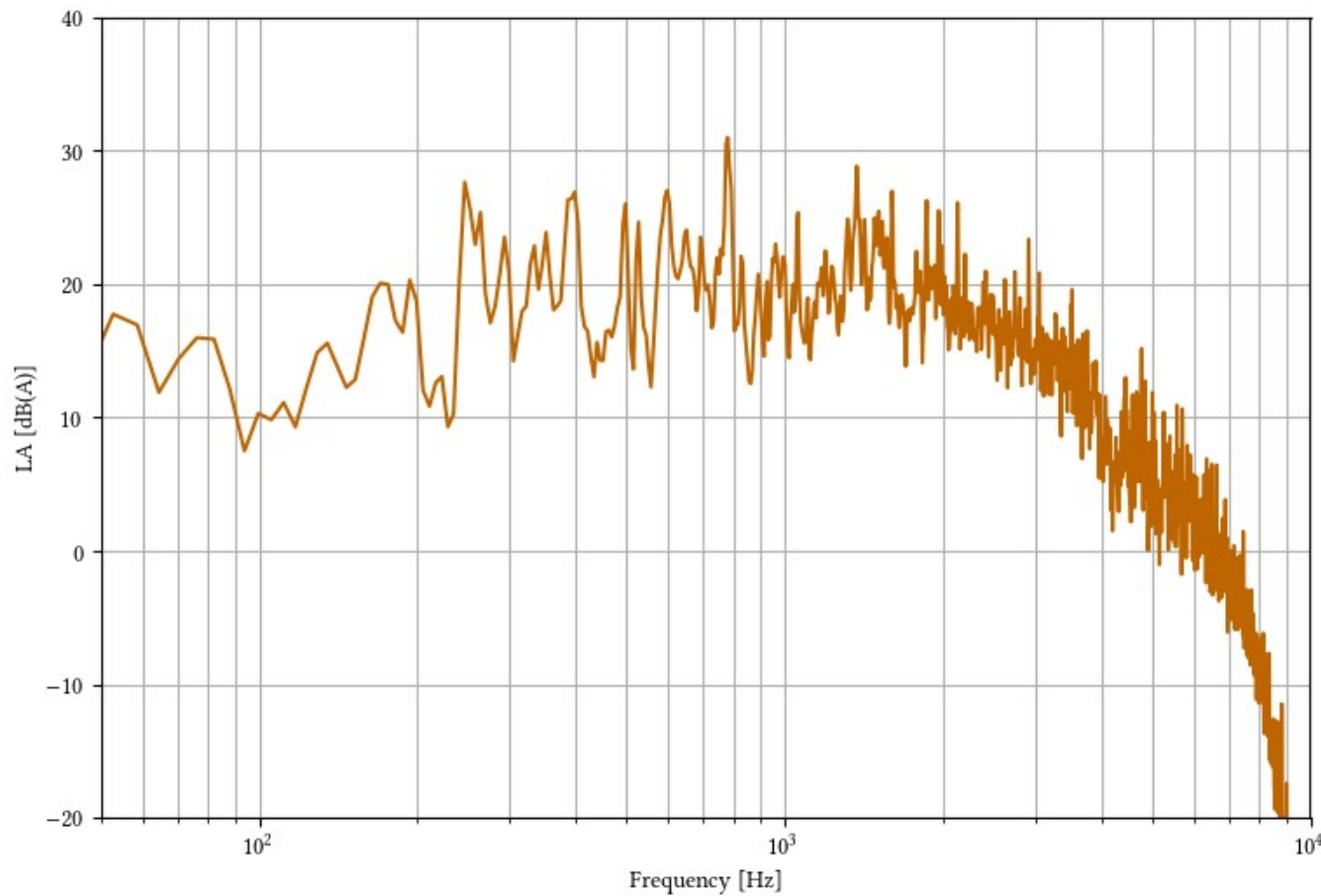


$$\text{Golflengte} = \lambda = \frac{\text{geluidssnelheid}}{\text{frequentie}} = \frac{c_0}{f} \quad [\text{m}]$$





Frequenzbanden



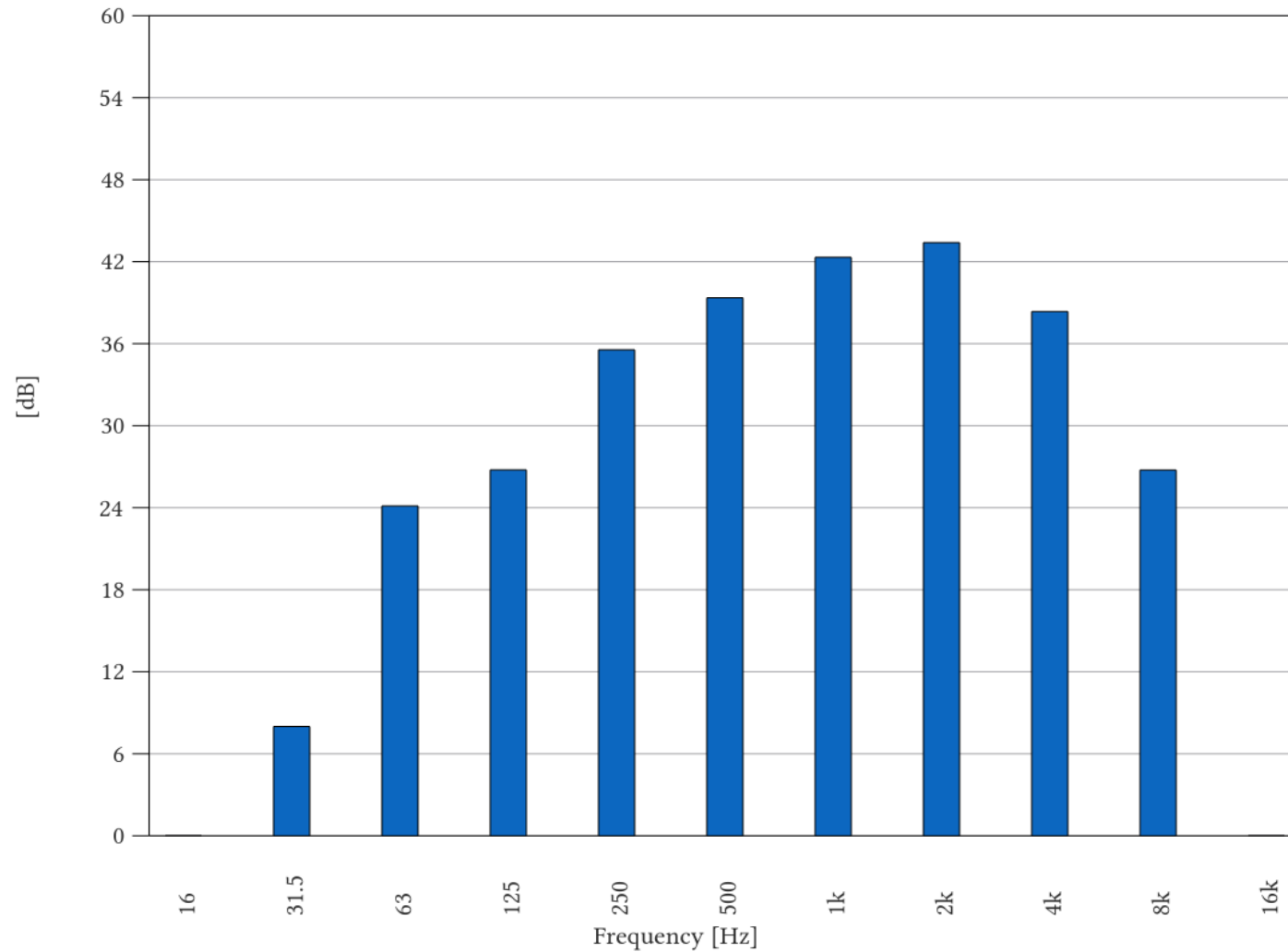


Frequentiebanden

- Geluidsenergie wordt gesommeerd in band
 - Octaafbanden
 - Tertsbanden (meest gebruikt)
 - Gecenterd op 1 kHz
- Logaritmisch equidistant
 - Elke verdubbeling in frequentie is octaaf hoger
 - Elke vermenigvuldiging met $\times \sqrt[3]{2} \approx \times 1.26$ is 1 tertsband hoger

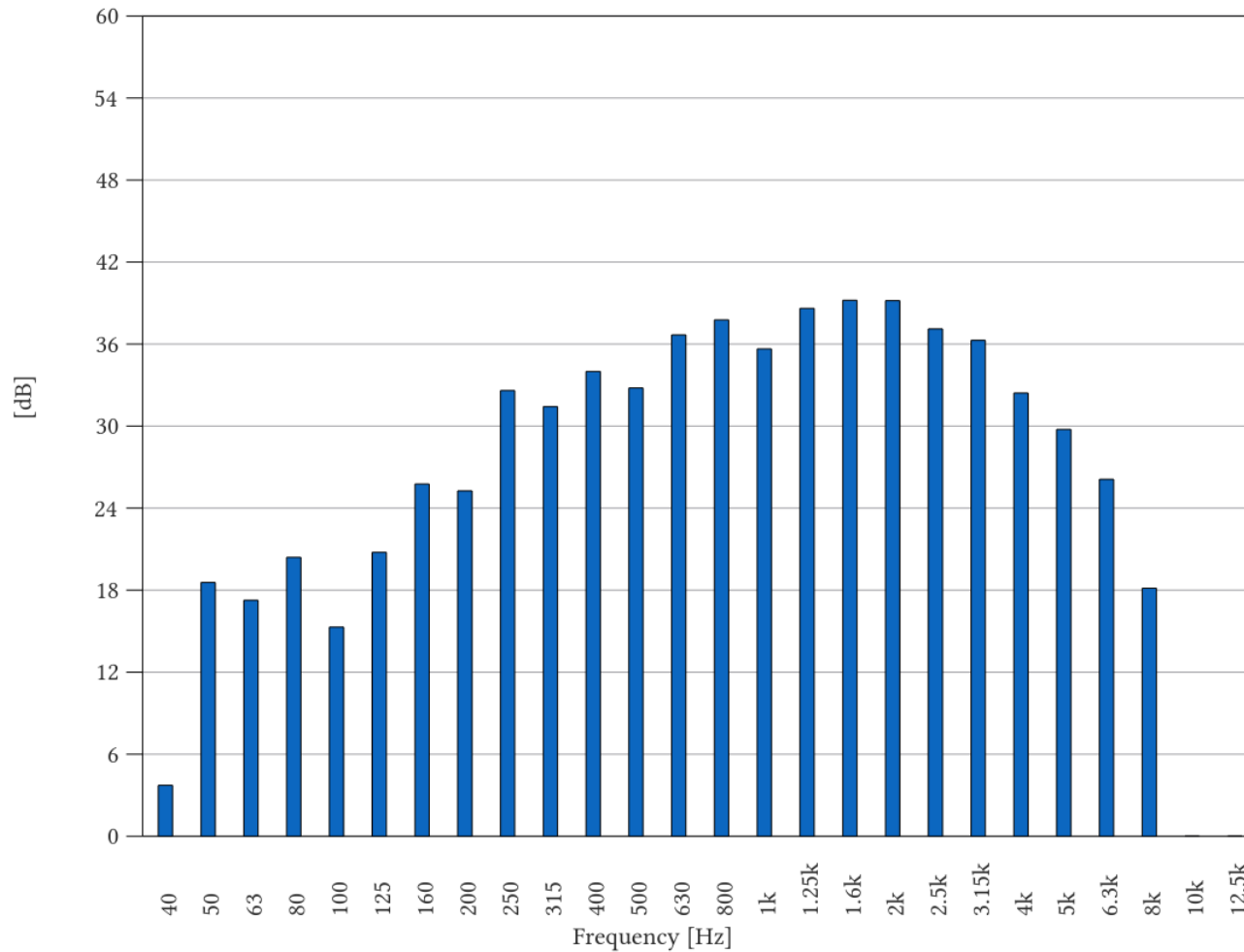


Frequenzbanden



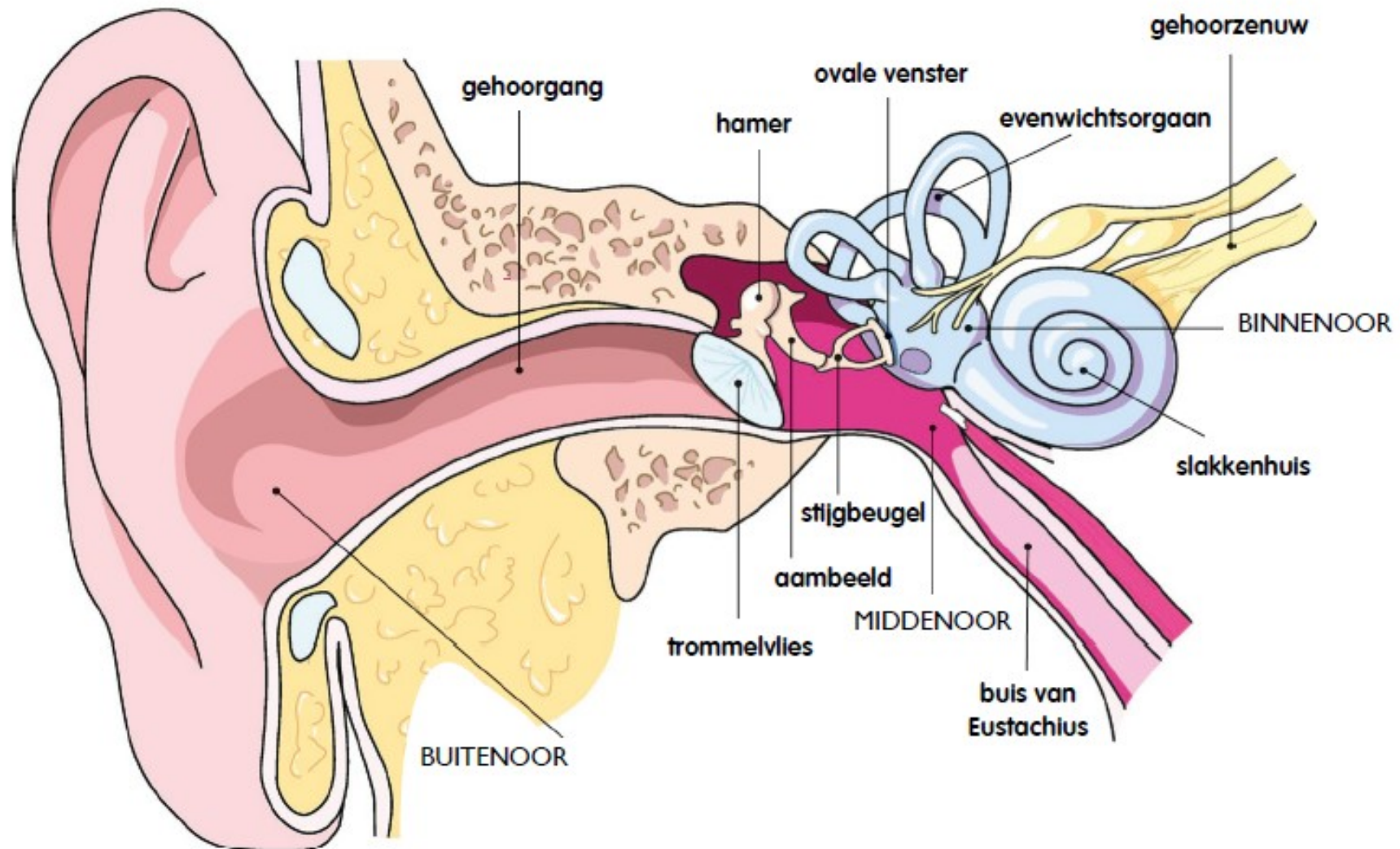


Frequenzbanden

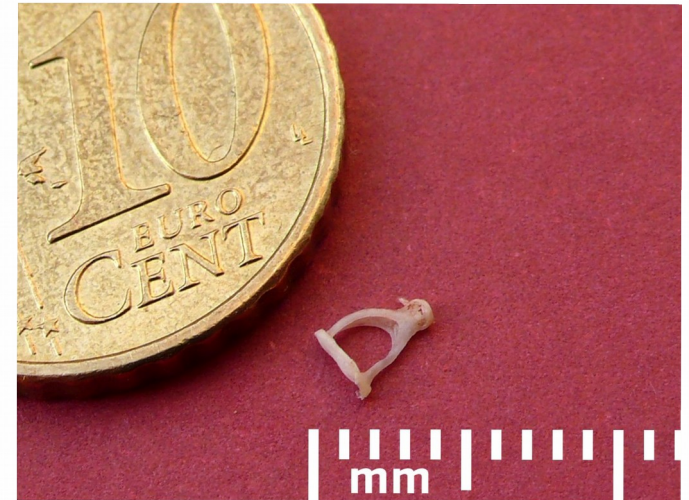
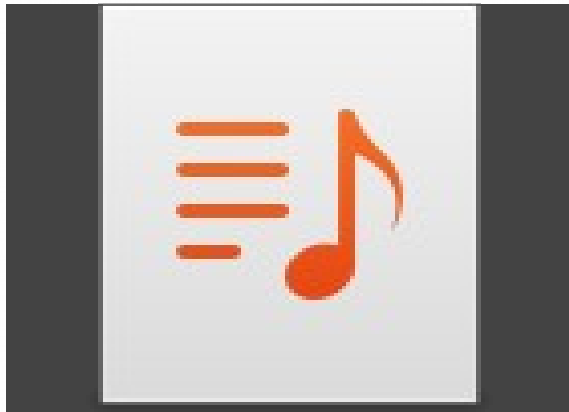




Het oor



Middenoor

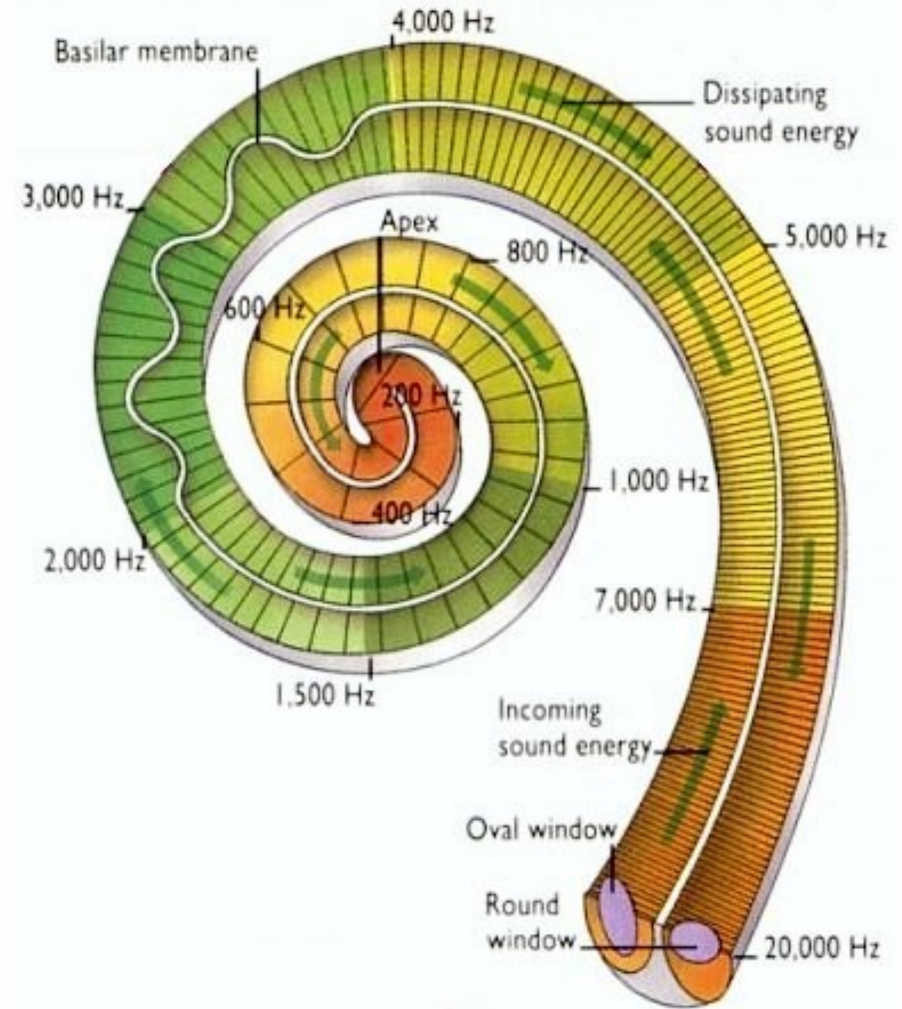




Het binnenoor

Basilaire membraan:
huisvester van haarcellen
(20.000 – 30.000)

Wees er zuinig op!



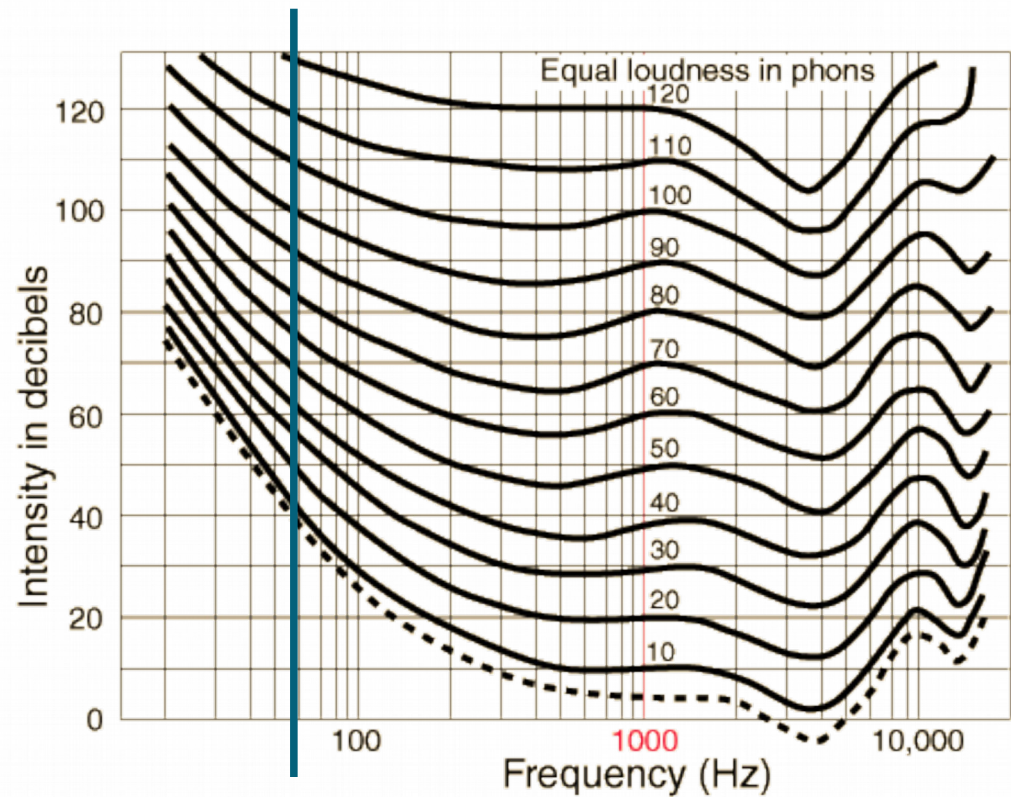
Geluidsgevoeligheid: luidheid

- Perceptie van luidheid: psychoakoestiek
- Luidheid van geluid is afhankelijk van
 - **Frequentie**
 - **Geluidsdrukkniveau**
 - Transiënten (turn-on, listener fatigue)
 - ...
- Luidheid: Foon (phon)
 - **Door het gehoor** waargenomen luidheid van een zuivere toon
 - Bij 1 kHz = 1 Foon gelijk aan 1 dB



Fonen (phons)

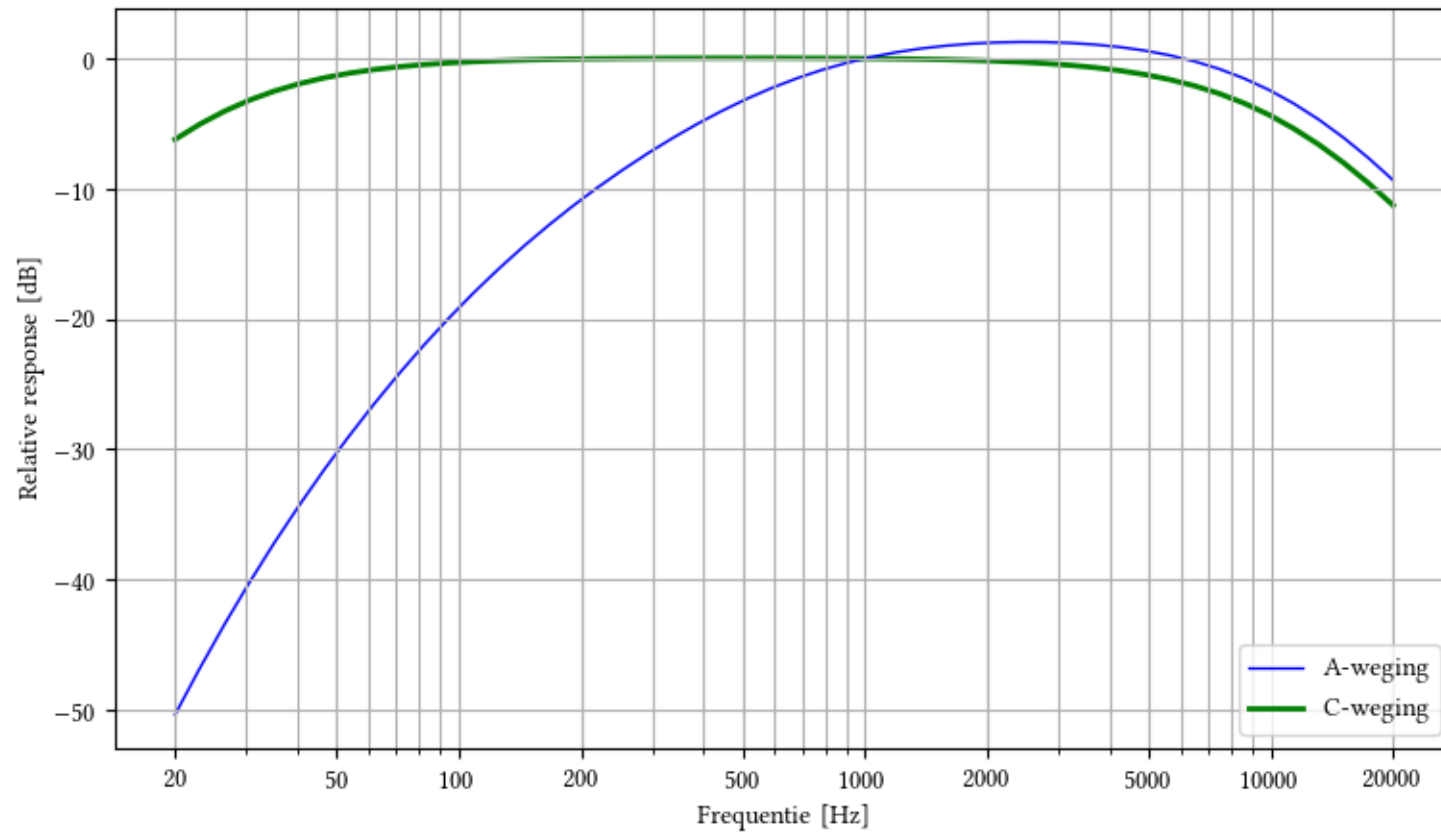
- 50 Hz
 - 75 dB => 50 foon
 - 80 dB => 60 foon
 - 85 dB => 70 foon
- **Gevoeligheid neemt laagfrequent toe met geluidsdrukkniveau!**



Weging

- Fonen worden weinig gebruikt
- Weging
 - Correctie op het geluidsdrukkniveau
 - Gestandaardiseerd
 - Frequentie-afhankelijk

Weging





Glazen Huis-buurman heeft 'serious geluidsoverlast'

René Sieders woont nabij het Marktpllein in Apeldoorn, waar tot kerstavond 3FM Serious Request plaatsvindt . Een feestje vindt hij prima. „Zeker ook als het om Serious Request gaat. Maar ik ervaar gewoon écht overlast. De kopjes trillen soms in de kast en de schilderijen dreigen van de wand te vallen.”

André Valkeman 22-12-17, 21:06

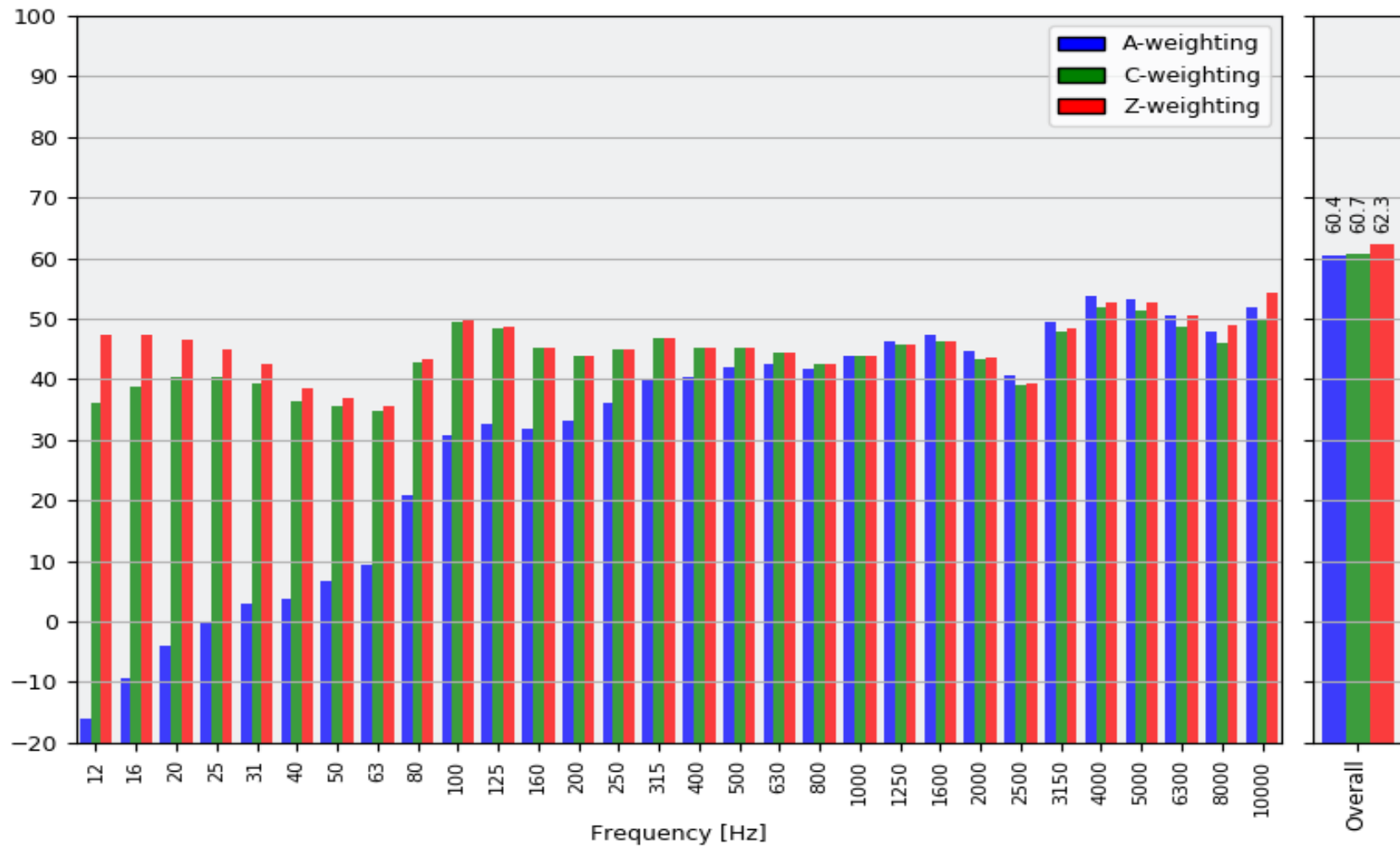


Sieders vindt dat de bastonen overdreven hard staan. „Natuurlijk hoort geluid erbij als je in het centrum woont. Maar de bastonen zijn deze dagen zo hard en worden niet gemeten.”

Meetwaardes

De gemeente zegt met Serious Request niet boven bepaalde meetwaardes van geluid uit willen komen. „Maar ze meten vooral de zogenoemde dBa en daarmee krijg je de bastonen niet in zicht. En daar heb ik vooral last van. Die tonen krijg je vooral goed in beeld met de zogenoemde dBc. Ja, ik heb me verdiept. Dbc gebruikt de gemeente Apeldoorn niet. Ze zeggen binnen de normen te blijven, dat zal vast kloppen, zolang je via dBa de bastonen maar niet meet”, aldus de buurman.

Weging





ASCEE

www.ascee.nl

info@ascee.nl

+31 6 189 71 622

Kickstart workshop technische akoestiek

Deel 2: geluidsbronnen en geluidsgolven

Geluidsbronnen

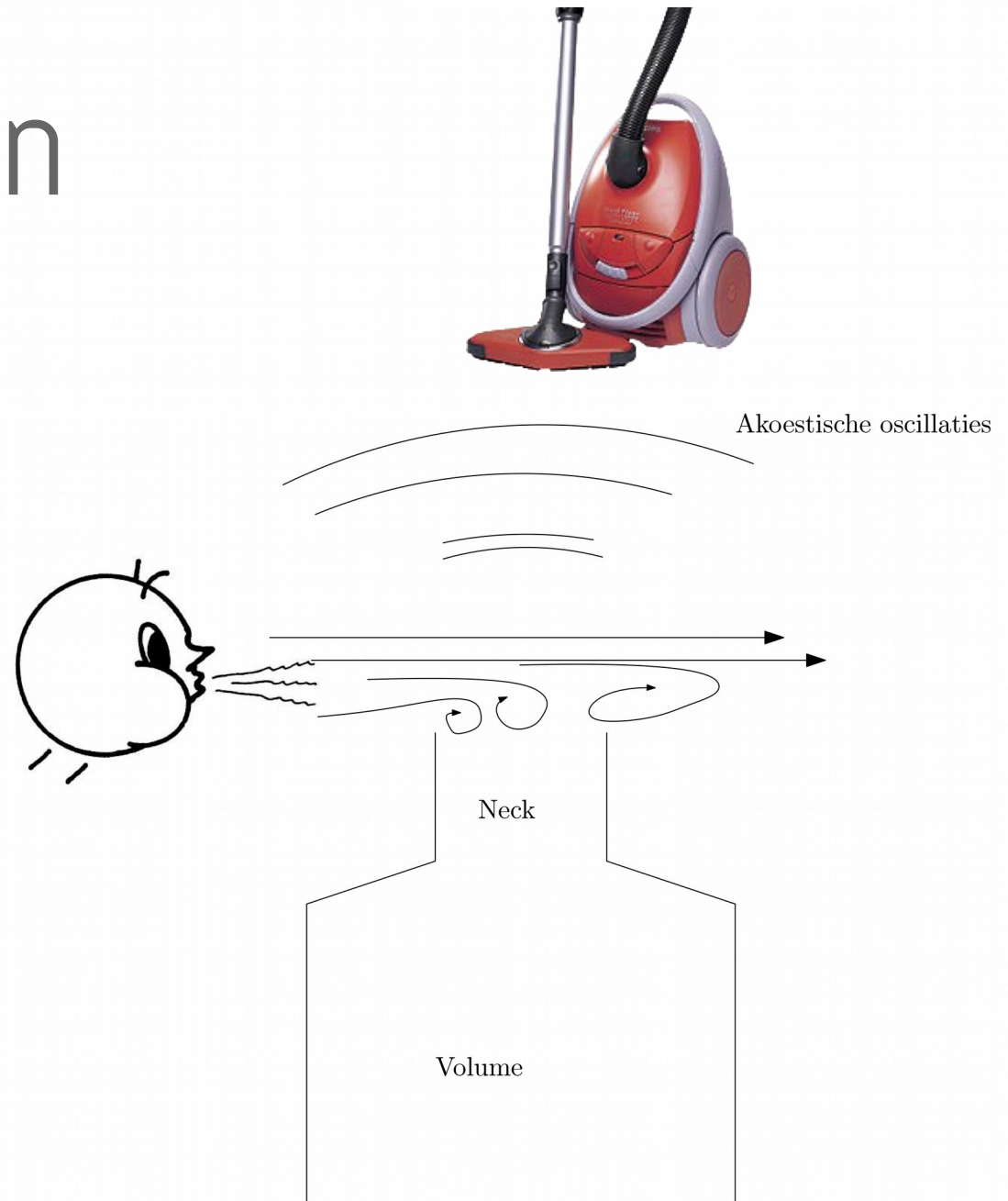
- Trillende oppervlakken



Geluidsbronnen

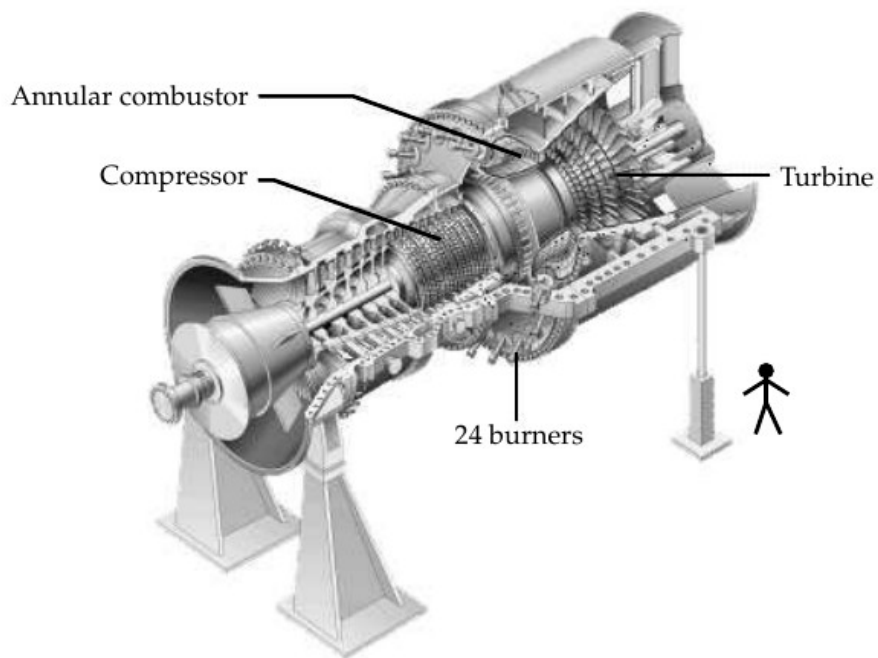
- Stroming
 - Vortex sound (Coriolis force)
 - Turbulente stroming (frictie)

Helmholtz resonator

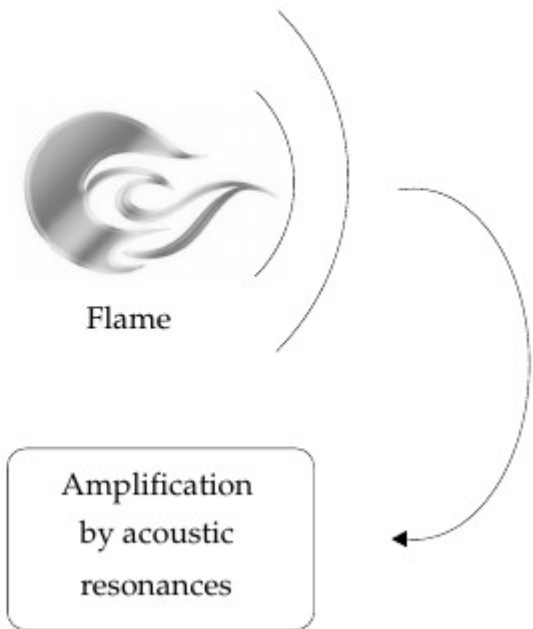


Geluidsbronnen

- Warmte / entropie
 - Vonken, bliksem
 - Thermische oscillaties (vlammen)



Modification of
inlet conditions
of flame





De akoestische golfvergelijking

- Aannames

- Stil medium, kleine verstoringen rondom evenwicht
- Adiabatische compressie/expansie
- Visceuze effecten verwaarloosbaar

Golfvergelijking

Navier-stokes ++

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\hat{\rho} \hat{\mathbf{u}}) &= 0 \\ \frac{\partial \hat{\rho} \hat{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\hat{\rho} \hat{\mathbf{u}} \otimes \hat{\mathbf{u}}) &= -\nabla \hat{p} + \nabla \cdot \hat{\underline{\underline{\tau}}} \\ \frac{\partial \hat{\rho} \hat{E}}{\partial t} + \nabla \cdot (\hat{\rho} \hat{\mathbf{u}} H) &= -\nabla \cdot \hat{\mathbf{q}} + \nabla \cdot (\hat{\underline{\underline{\tau}}} \cdot \hat{\mathbf{u}}) \\ d\hat{\rho} &= \frac{\gamma}{c^2} d\hat{p} - \hat{\rho} \alpha_P d\hat{T} \end{aligned}$$



$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 p = 0$$

Geluidsnelheid



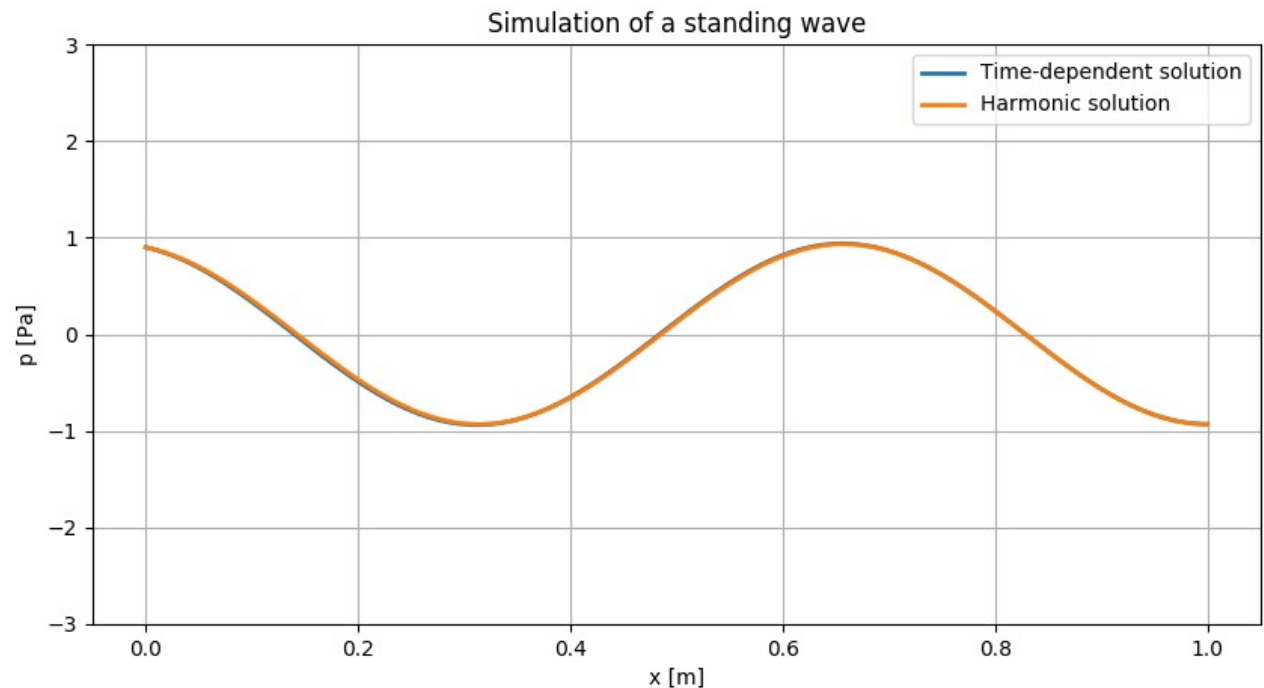
Oplossingen

- Vlakke golven:

- Lopende golf
- Staande golf

$$p(x, t) = \sin \left(2\pi f t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right)$$

$$p(x, t) = \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \sin (2\pi f t)$$

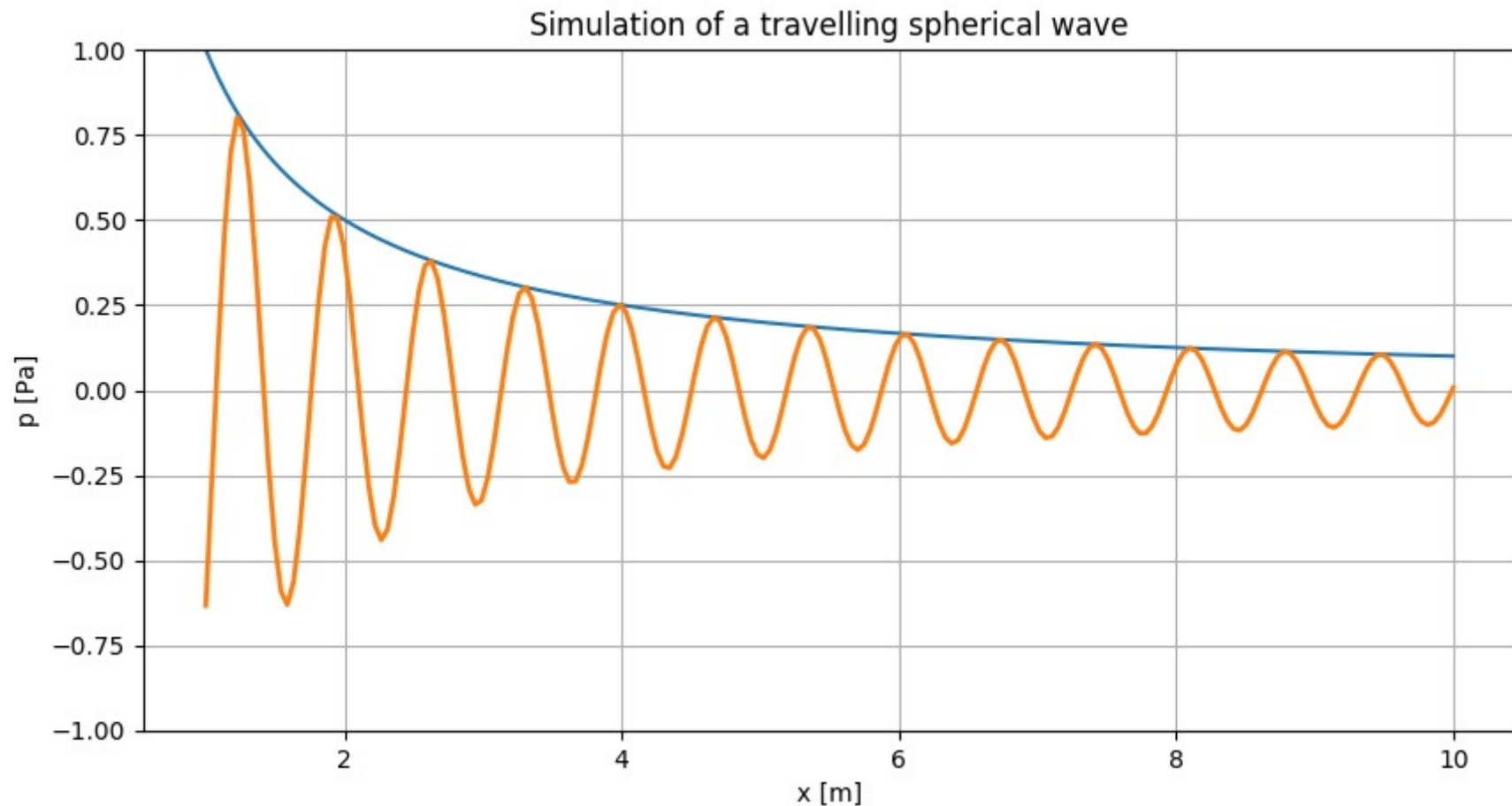




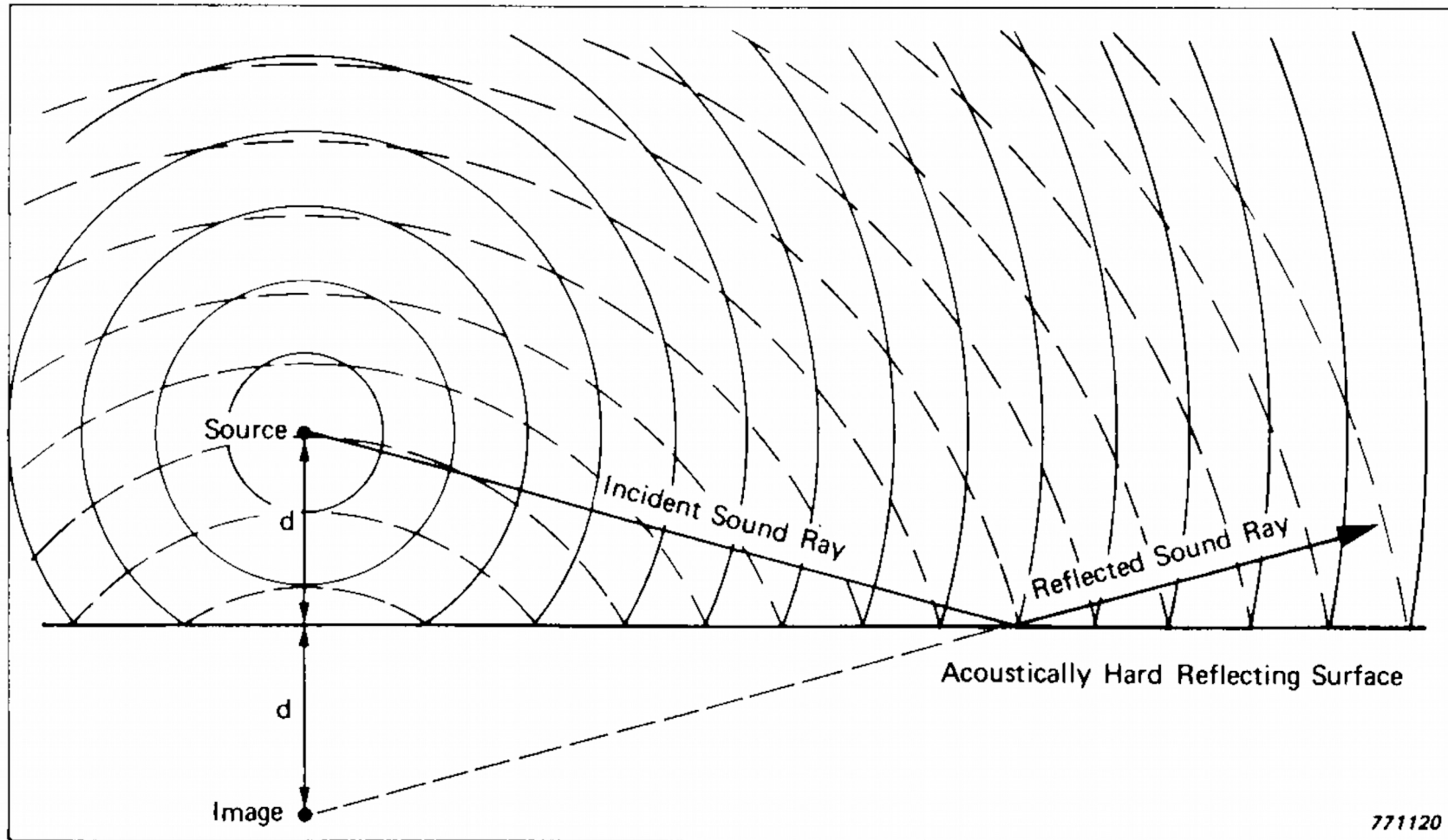
Oplossingen

- Bolgolf

$$p(x, t) = \frac{\sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{\lambda} r\right)}{r}$$

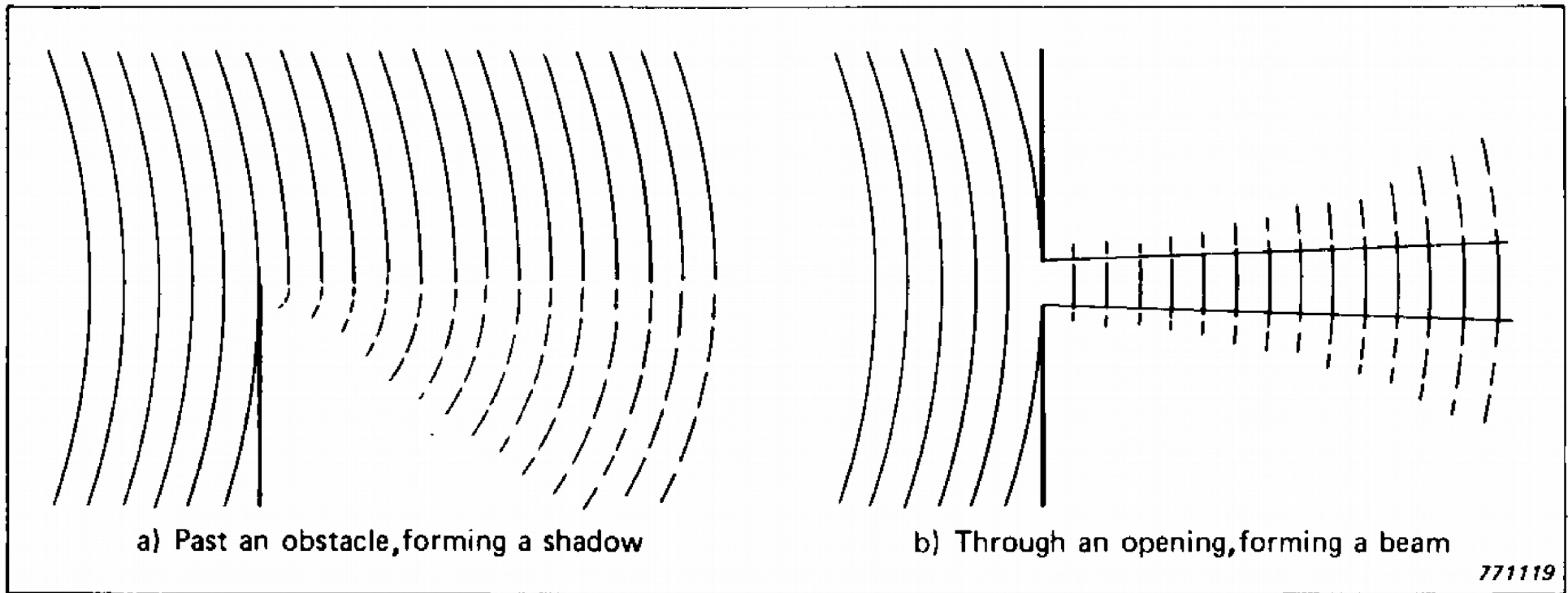


Golffronten





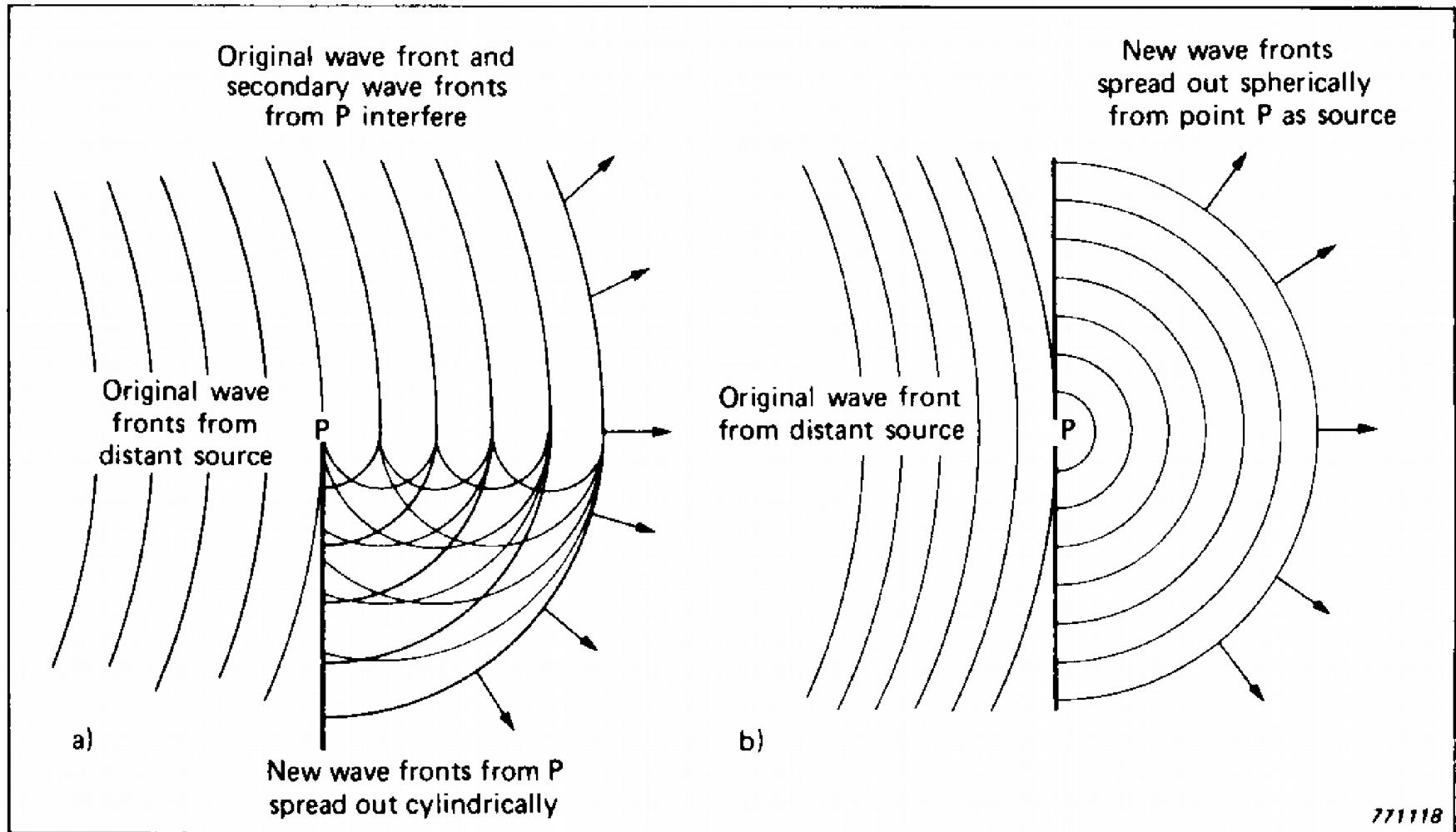
Golfvoortplanting



DiffRACTIE: golflengte kleiner dan object



Golfvoortplanting



DiffRACTIE: golflengte zelfde orde grootte als object

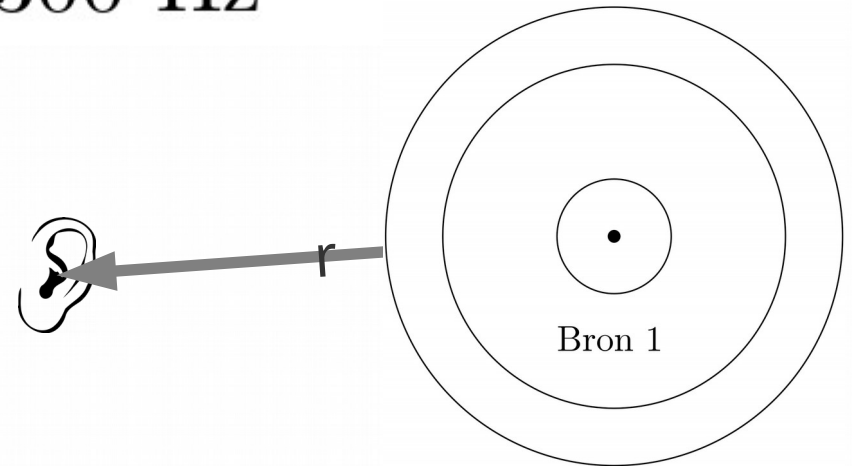
Geluidsniveau van meerdere bronnen

$$r = 1 \text{ m} \quad f_1 = 300 \text{ Hz}$$

$$p_1 = \frac{\sin(2\pi f_1 t - r/c_0)}{r}$$

$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_1^2(t) dt$$

Wat het niveau bij de ontvanger?



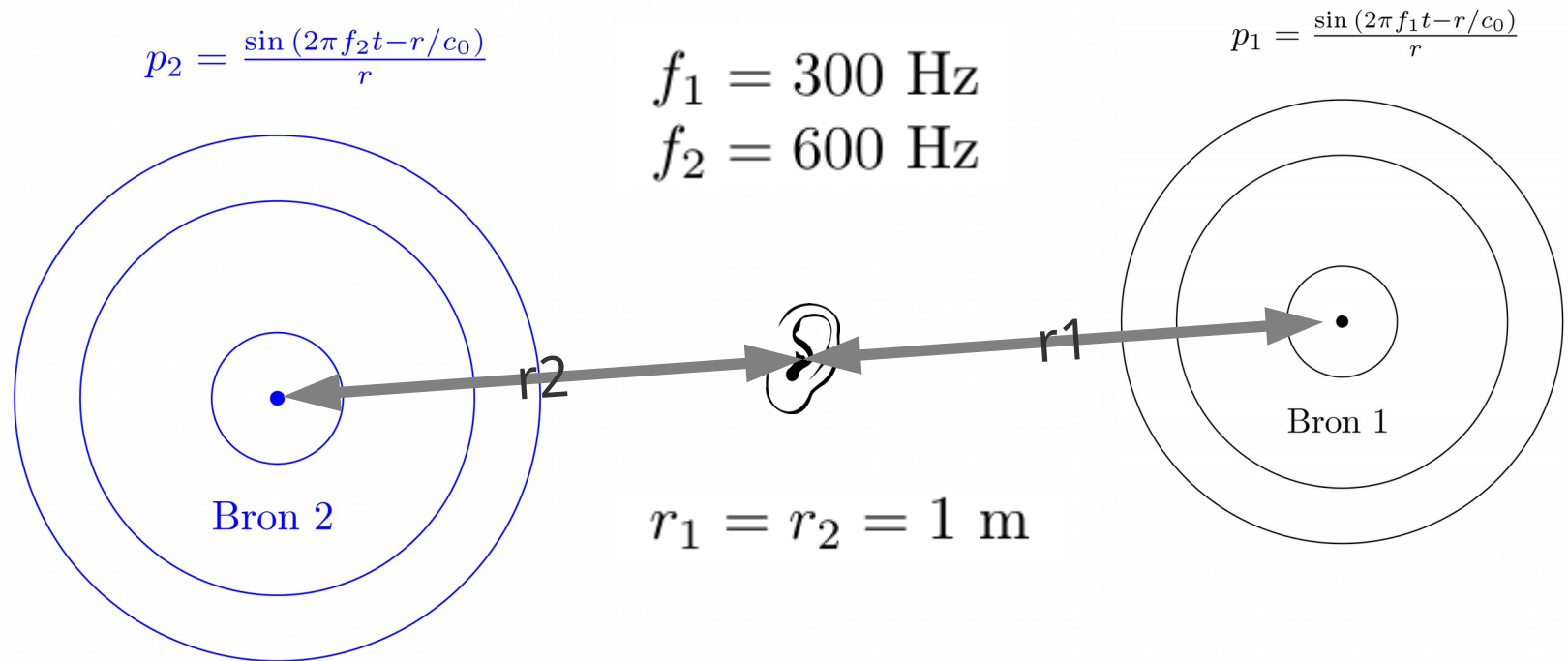
$$= \frac{1}{2} \int_0^{T_1} \frac{\sin^2\left(2\pi f_1 t - \frac{1}{c_0}\right)}{1} dt$$

$$= \frac{1}{T_1} \frac{1}{2} \frac{1}{2\pi f_1} \left(2\pi f_1 t - \frac{1}{c_0} - \frac{1}{2} \sin\left(4\pi f_1 t - \frac{2}{c_0}\right) \right) \Big|_0^{T_1}$$

$$= \frac{1}{T_1} \frac{1}{2} \frac{1}{2\pi f_1} (2\pi f_1 t) \Big|_0^{T_1}$$

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{0.5}}{2 \cdot 10^{-5}} \right) = 91 \text{ dB}$$

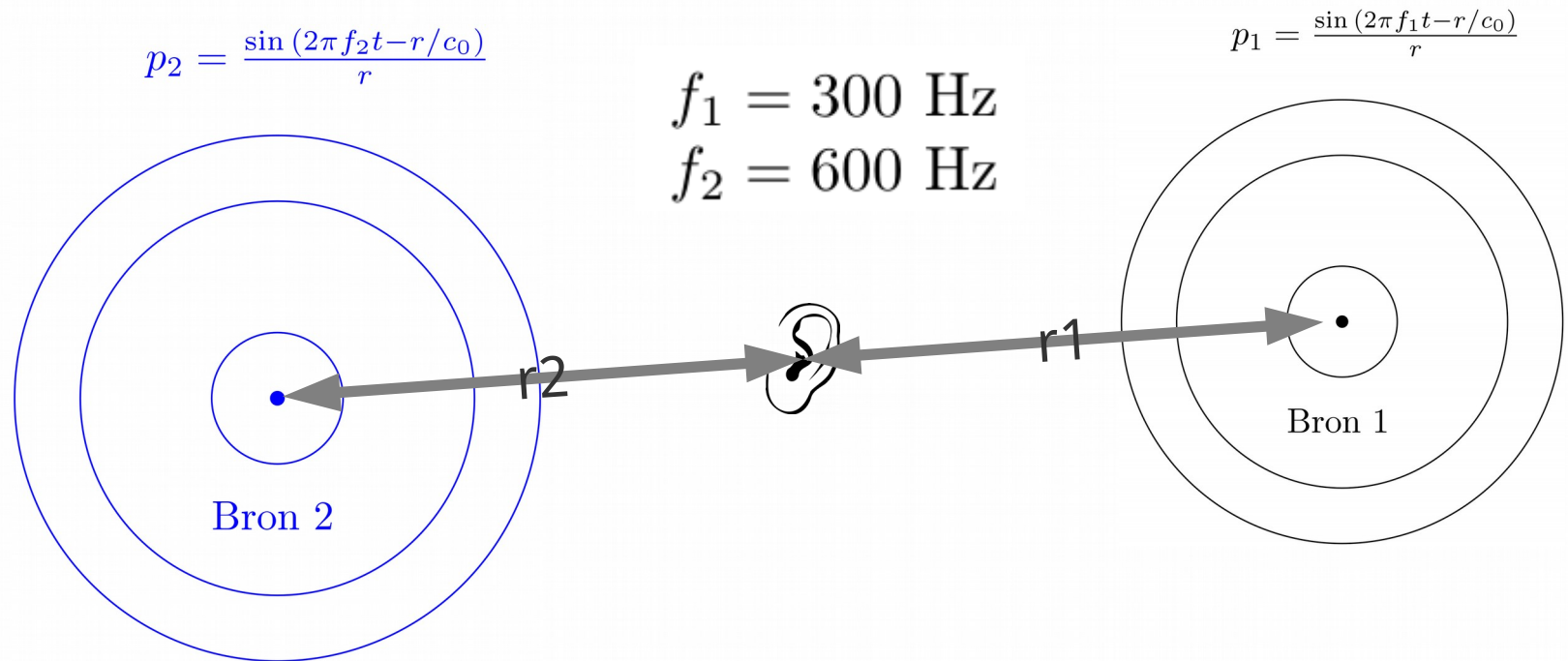
Geluidsniveau van meerdere bronnen



$$p_{\text{rms}}^2 = p_{\text{rms}1}^2 + p_{\text{rms}2}^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{1}}{2 \cdot 10^{-5}} \right) = 94 \text{ dB}$$

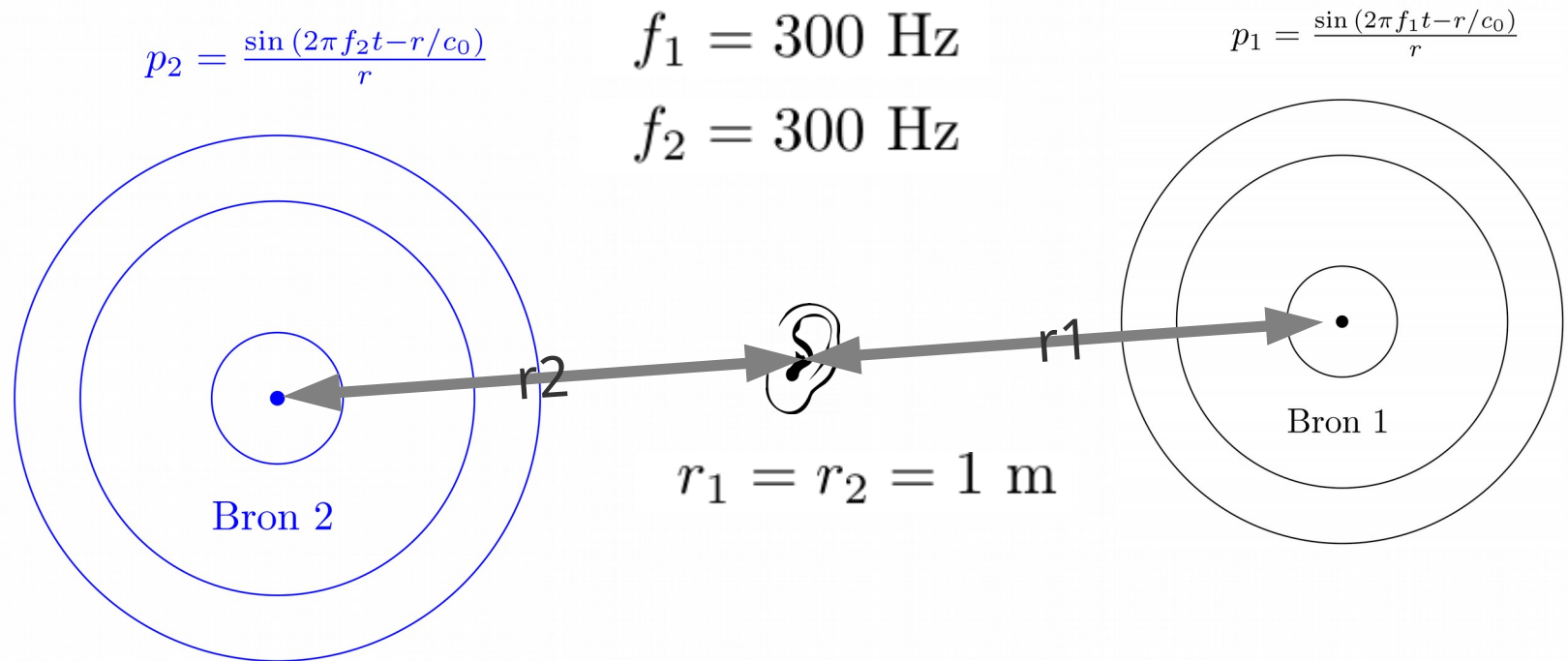
Geluidsniveau meerdere bronnen



Ongecorreleerde geluidsvelden met niveaus L_A en L_B :

$$L_{\text{tot}} = 10 \log_{10} (10^{L_A/10} + 10^{L_B/10})$$

Luidheid van meerdere bronnen



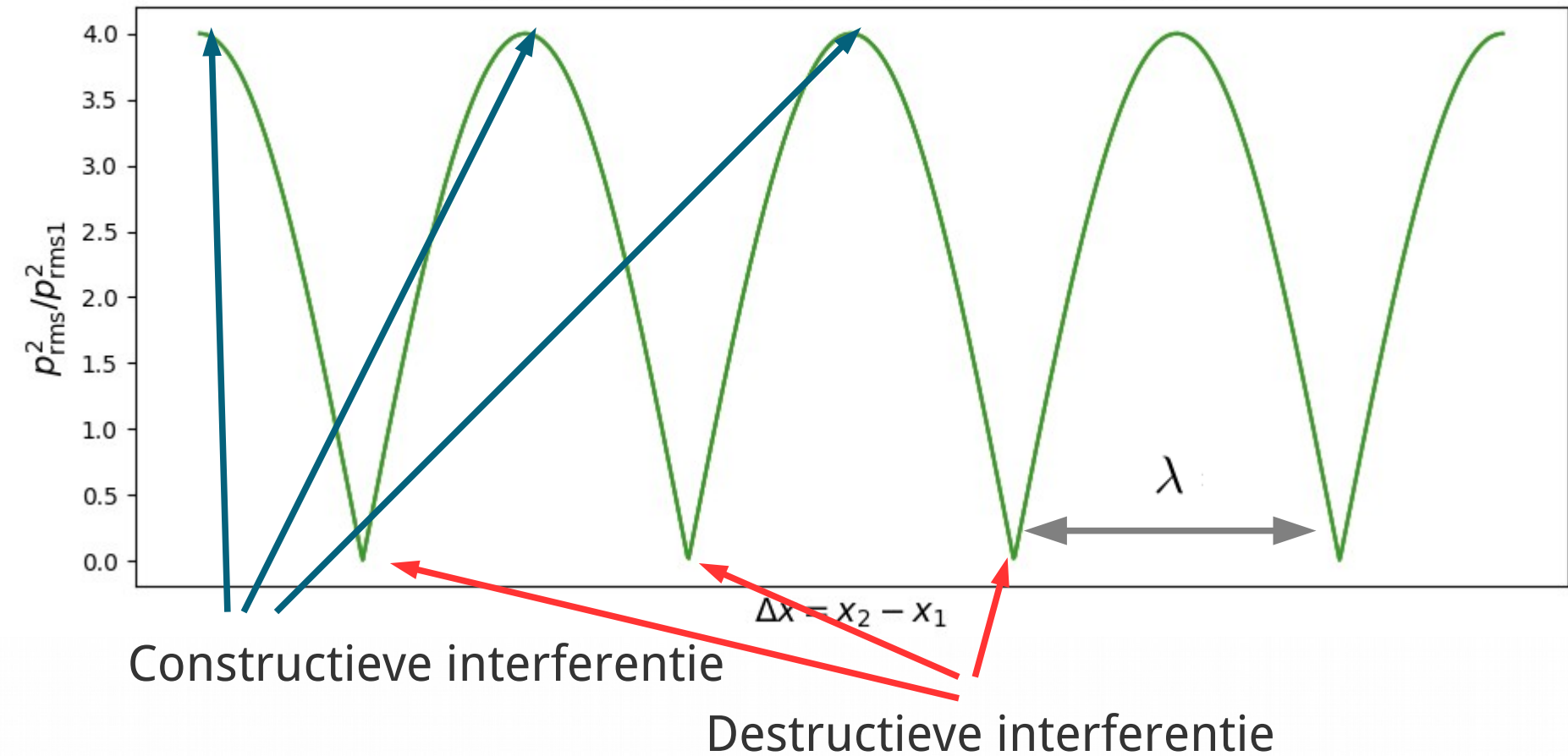
$$p_{\text{rms}}^2 = p_{\text{rms}1}^2 + p_{\text{rms}2}^2 + \frac{2}{T} \int_0^T p_1 p_2 dt$$

Correlatieterm!



Luidheid van meerdere bronnen

Geluidsdruk vs afstandsverschil tussen twee bronnen





ASCEE

www.ascee.nl
info@ascee.nl
+31 6 189 71 622

Korte pauze



De golfvergelijking

- Superpositie
 - Geluidsvelden mogen opgeteld worden
 - Ook handig om oplossingen te vinden
- Reciprociteit
 - Uitwisselbaarheid van (punt)bron en (punt)ontvanger

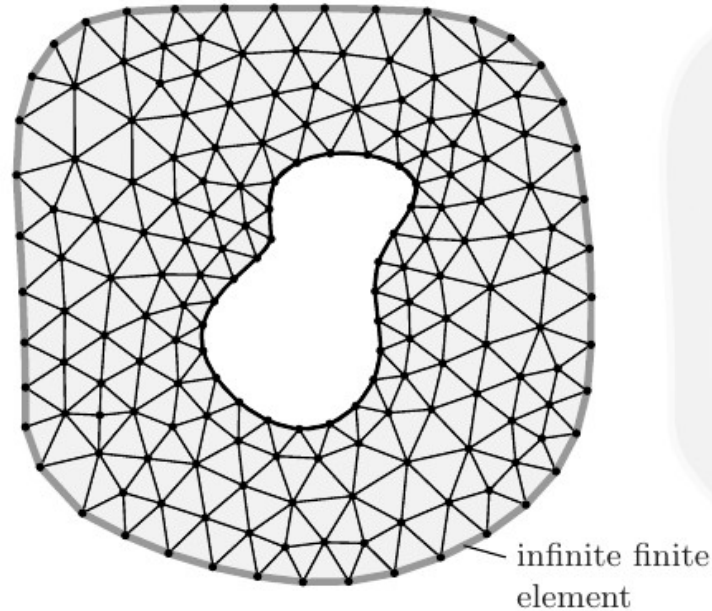


ASCEE

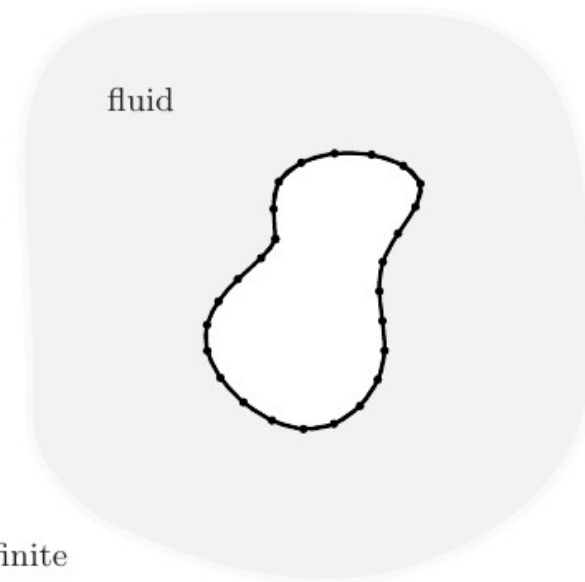
www.ascee.nl
info@ascee.nl
+31 6 189 71 622

Geluid simulieren

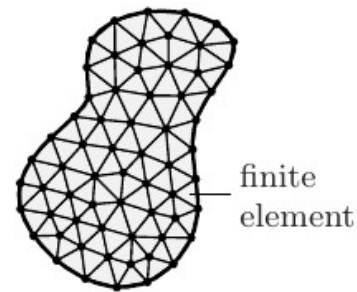
FEM en BEM



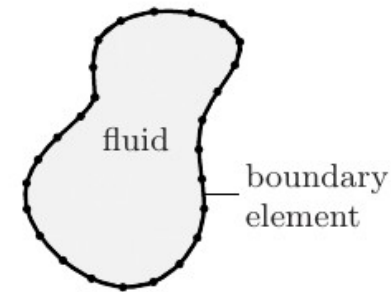
(a) Exterior problem, FEM approach.



(b) Exterior problem, BEM approach.



(c) Interior problem, FEM approach.

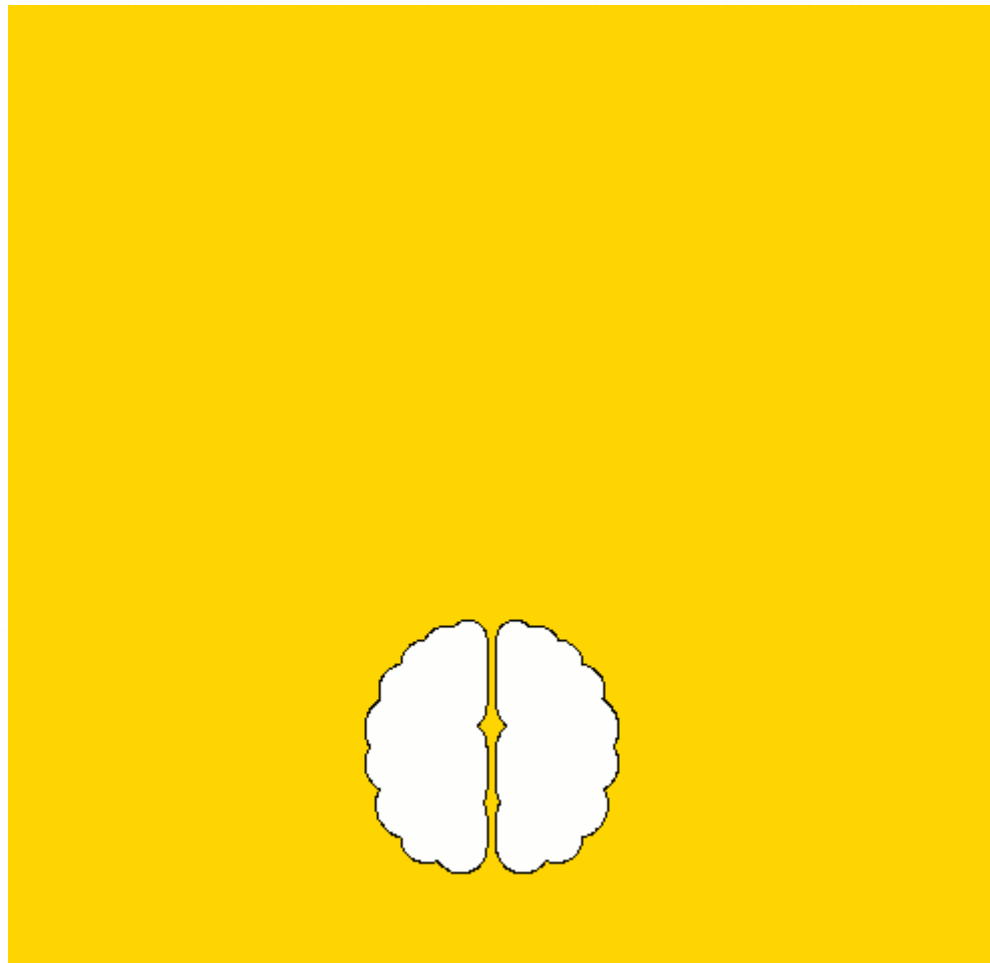


(d) Interior problem, BEM approach.

FEM

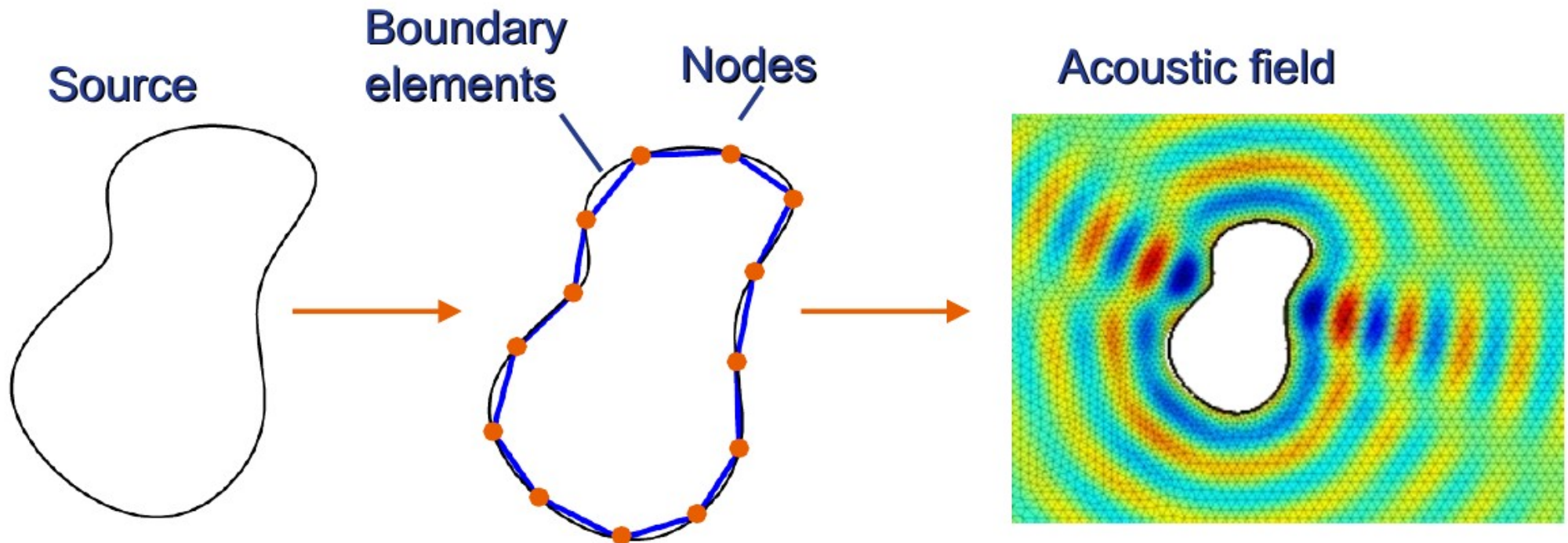
- Tijddomein
 - Golfvergelijking
 - $\mathbf{M} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \cdot \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{f}(t)$
- Frequentiedomein
 - Helmholtzvergelijking
 - $(\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}) \cdot \mathbf{p} = \mathbf{f}(\omega)$

FEM Voorbeeld



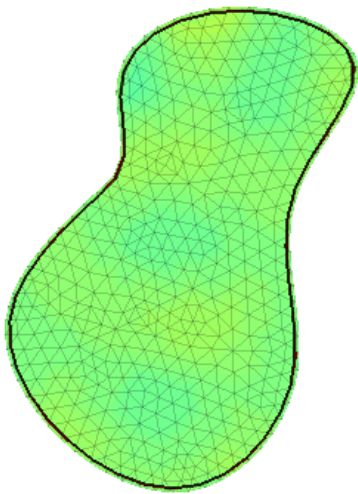
BEM

- Golfvergelijking \rightarrow integraalformulering

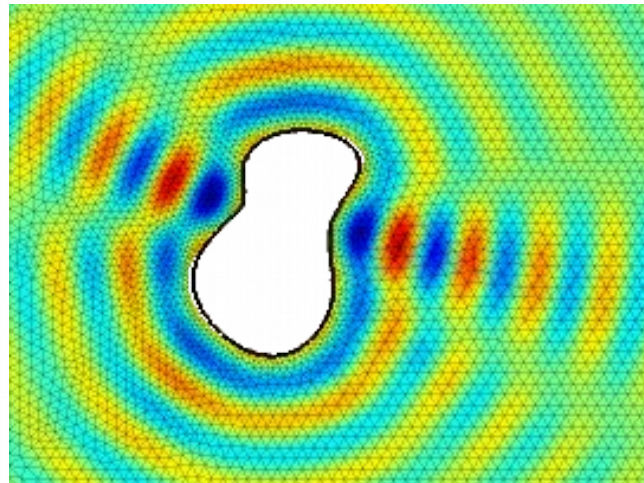


BEM

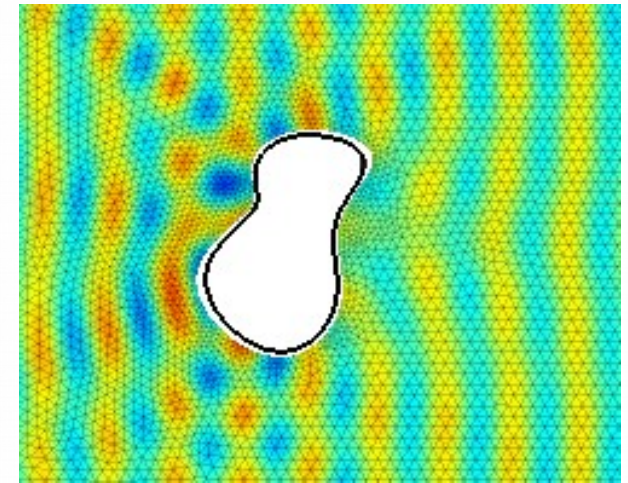
Intern



Afstraalprobleem

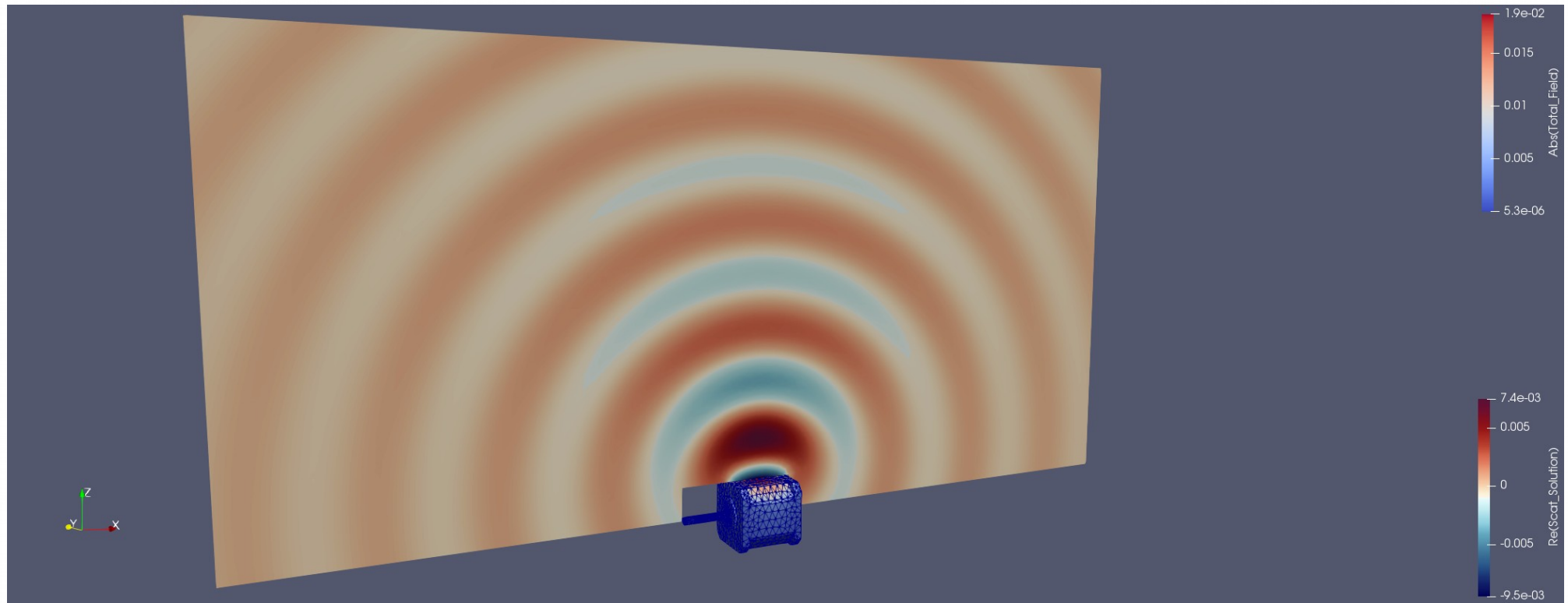


Verstrooiing

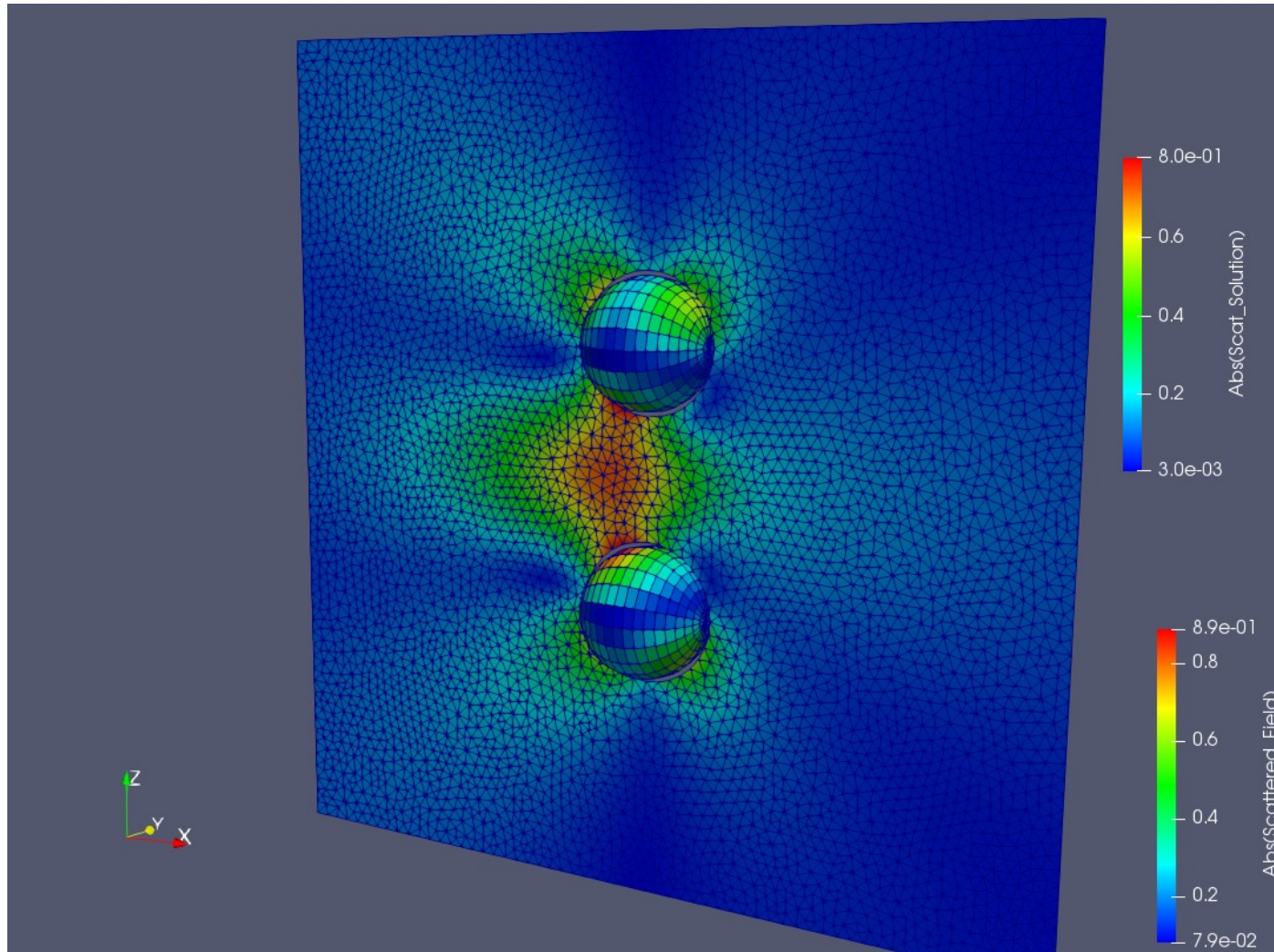


BEM Voorbeeld

- Stapmotor







BEM Voorbeeld









FEM vs BEM

- FEM:
 - Sparse matrix 
 - Min. 6 à 10 elementen per golflengte far field 
 - Radiatie b.c. 
 - Makkelijker met fluid-structure interactie 

FEM vs BEM

- BEM:

- Volle matrix 
- Radiatie b.c. impliciet voldaan 
- DOFS BEM = DOFS FEM ^{$\frac{2}{3}$}
- 1.000 = 1.000.000 ^{$\frac{2}{3}$} 
- Veldoplossing is postprocessing 



ASCEE

www.ascee.nl
info@ascee.nl
+31 6 189 71 622

Geluid meten

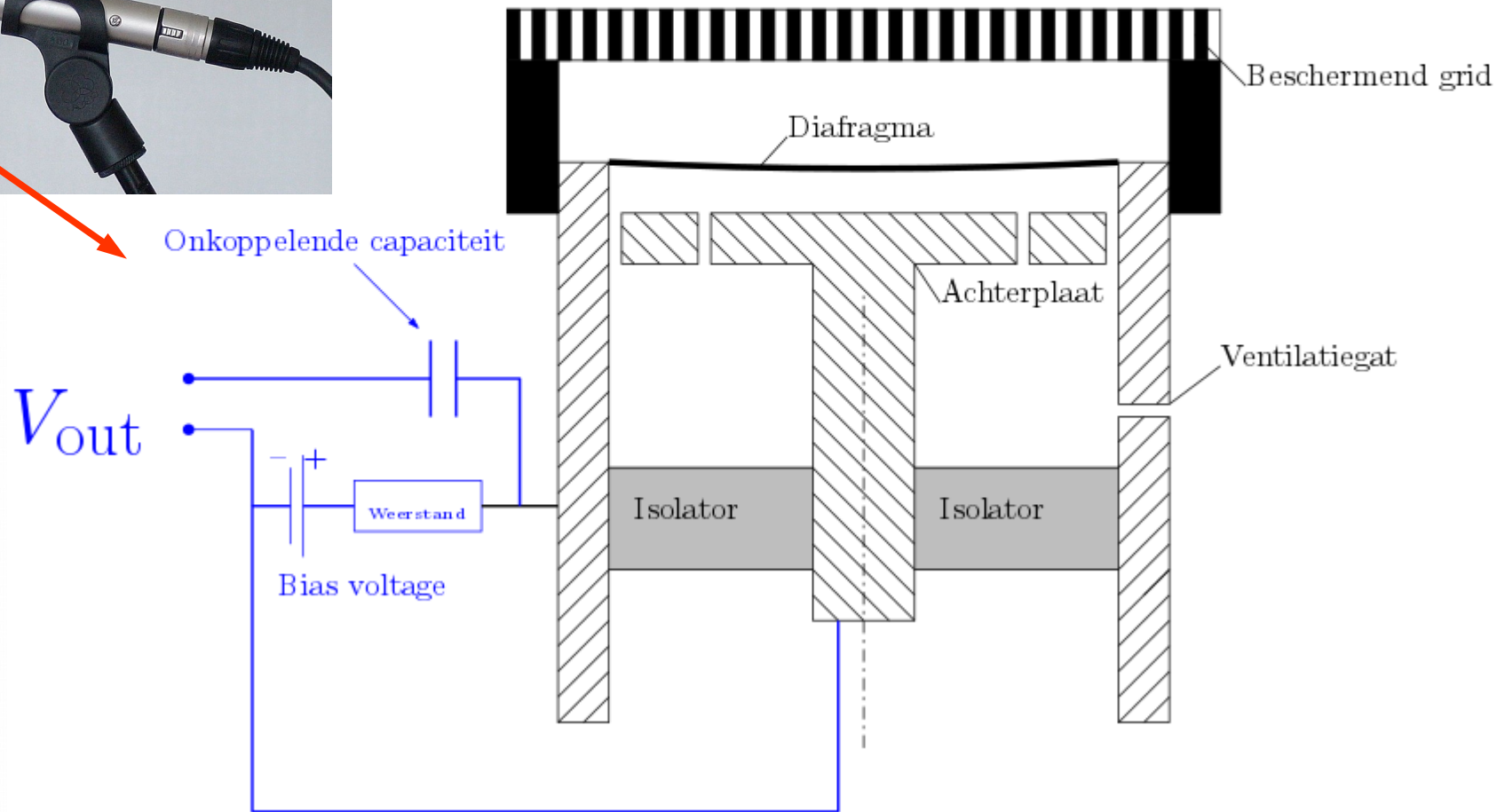
De microfoon

- Meten van geluid
 - Opnemen van geluid
 - Geluidsniveau in octaafbanden
- Types
 - **Condensormicrofoon**
 - Dynamische microfoon
 - MEMS microfoon
 - Piezo-microfoon
 - Fiber-optic microphone





Condensator microphone



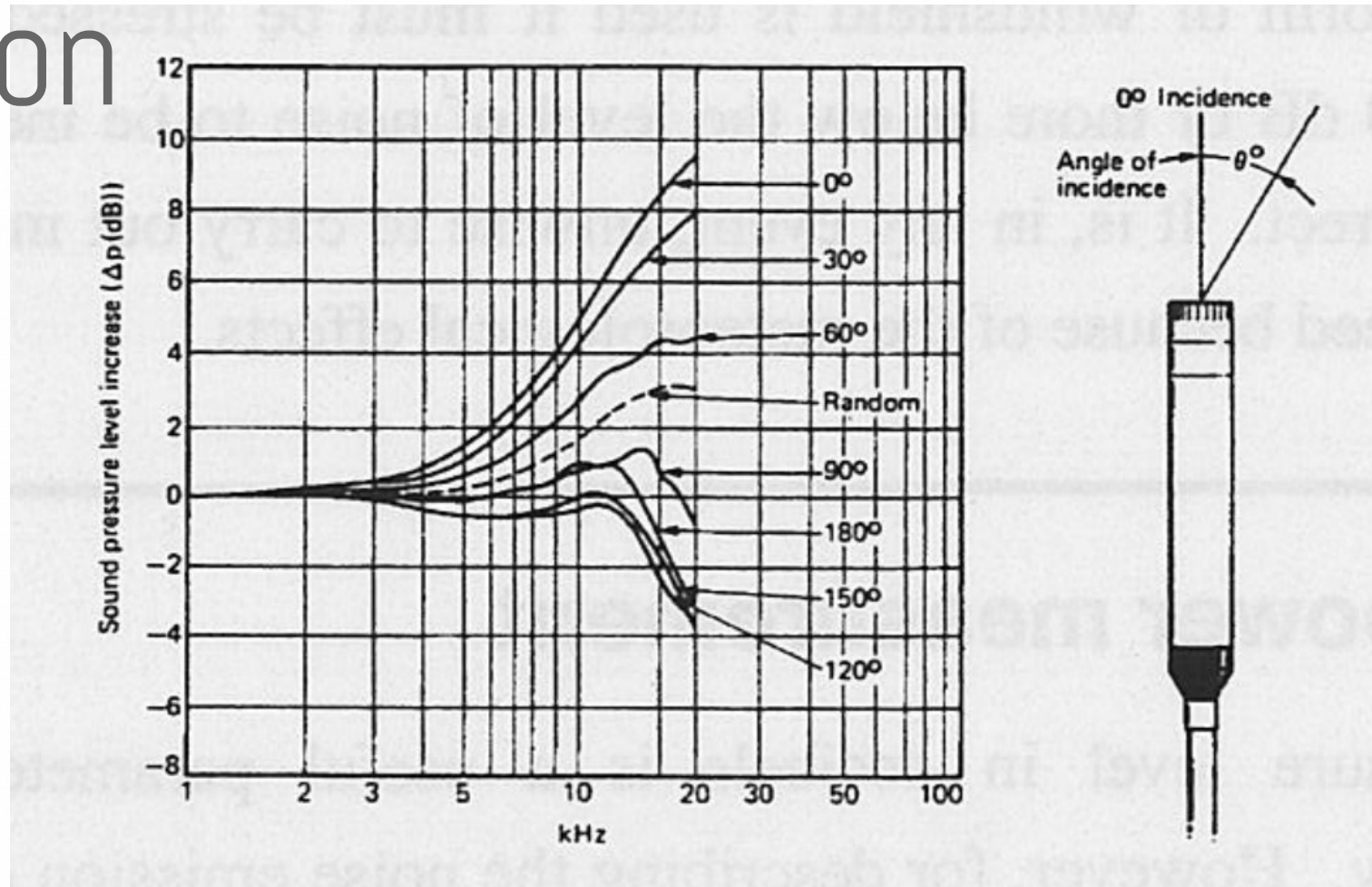
De microfoon

- Gewenste eigenschappen voor meetmicrofoons
 - Platte frequentierespons
 - Hoog dynamisch bereik
 - Hoge SNR
 - Lage THD (Total harmonic distortion)
 - (Omni)directionaliteit
 - Repeatability
- Microfoonklassen: genormeerd



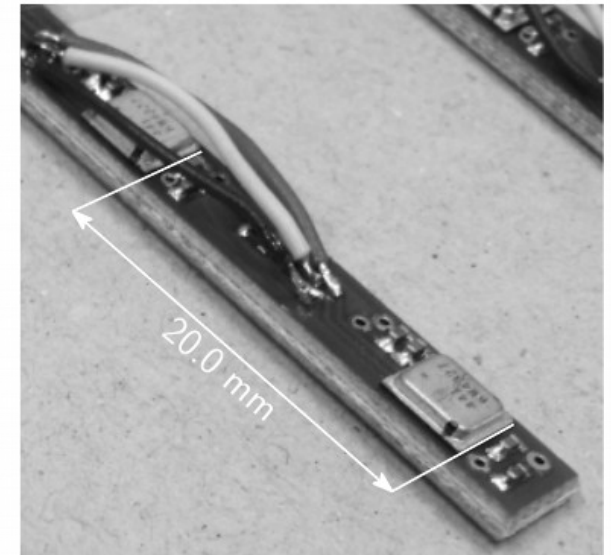
Microfoon

- Grootte:
 - 1"
 - 1/2"
 - 1/4"



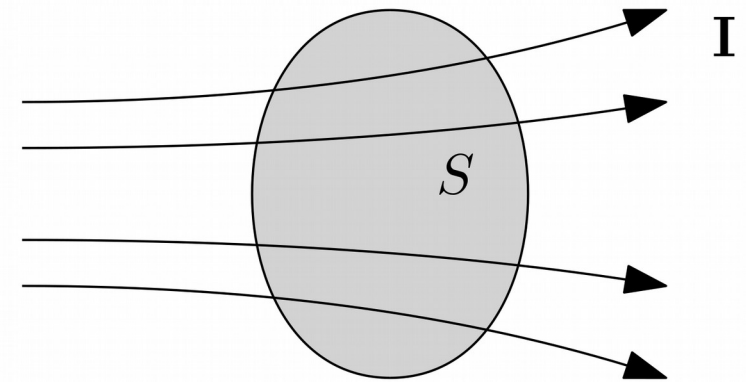
MEMS microfoons

- Klein
- Kosteneffectief (< € 3,- , vs. ~ € 1.000,-)
- Lage ruisniveaus
- Mogelijk direct digitale output (I2S)
- Goede prestaties



Akoestische intensiteit

- Vermogen = kracht x snelheid
- Intensiteit
 - Vermogen per oppervlak
 - = druk x snelheid



- $$W(t) = \int_S p(t) \mathbf{u}(t) \cdot \mathbf{n} dS \equiv \int_S \mathbf{I}(t) \cdot \mathbf{n} dS$$
- Vermogen is intensiteit x oppervlak
- Intensiteit verplaatsing van akoestische energie



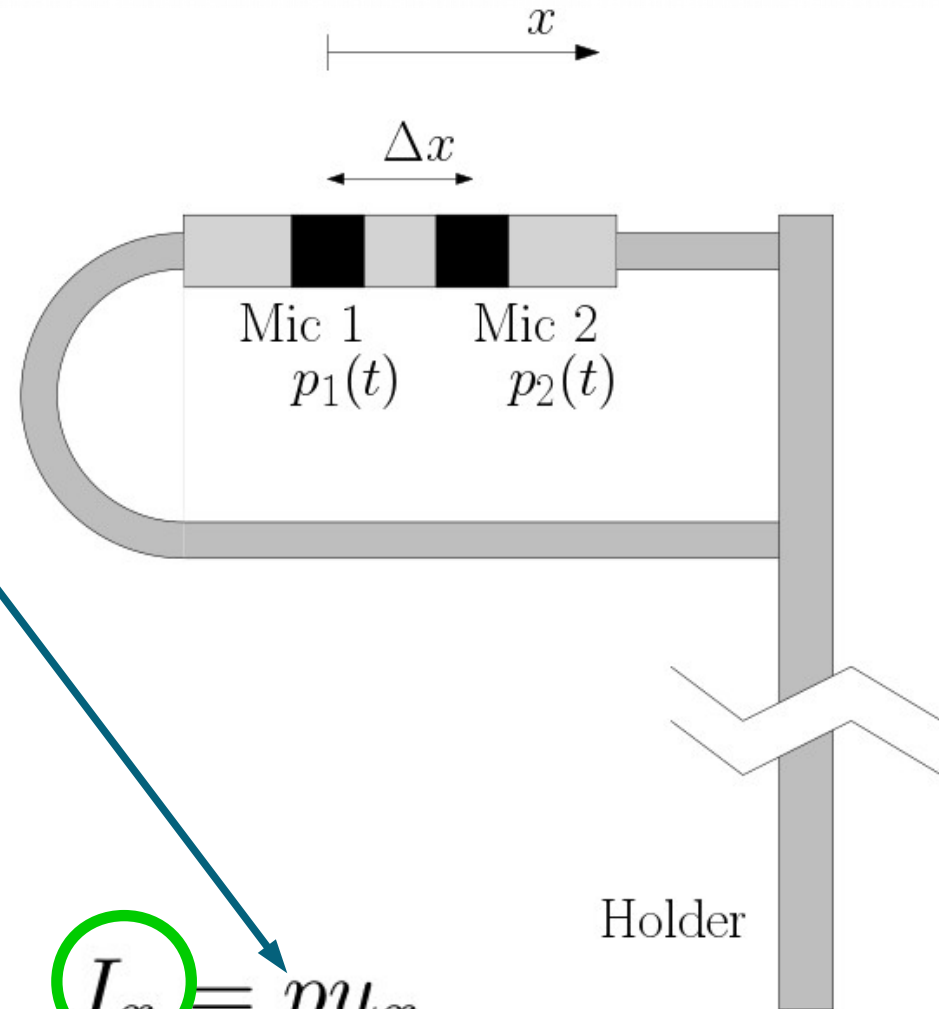
Intensiteit meten

Sound wave

$$p(t) \approx \frac{1}{2} (p_1(t) + p_2(t))$$

$$\rho_0 \frac{\partial u_x}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x}$$

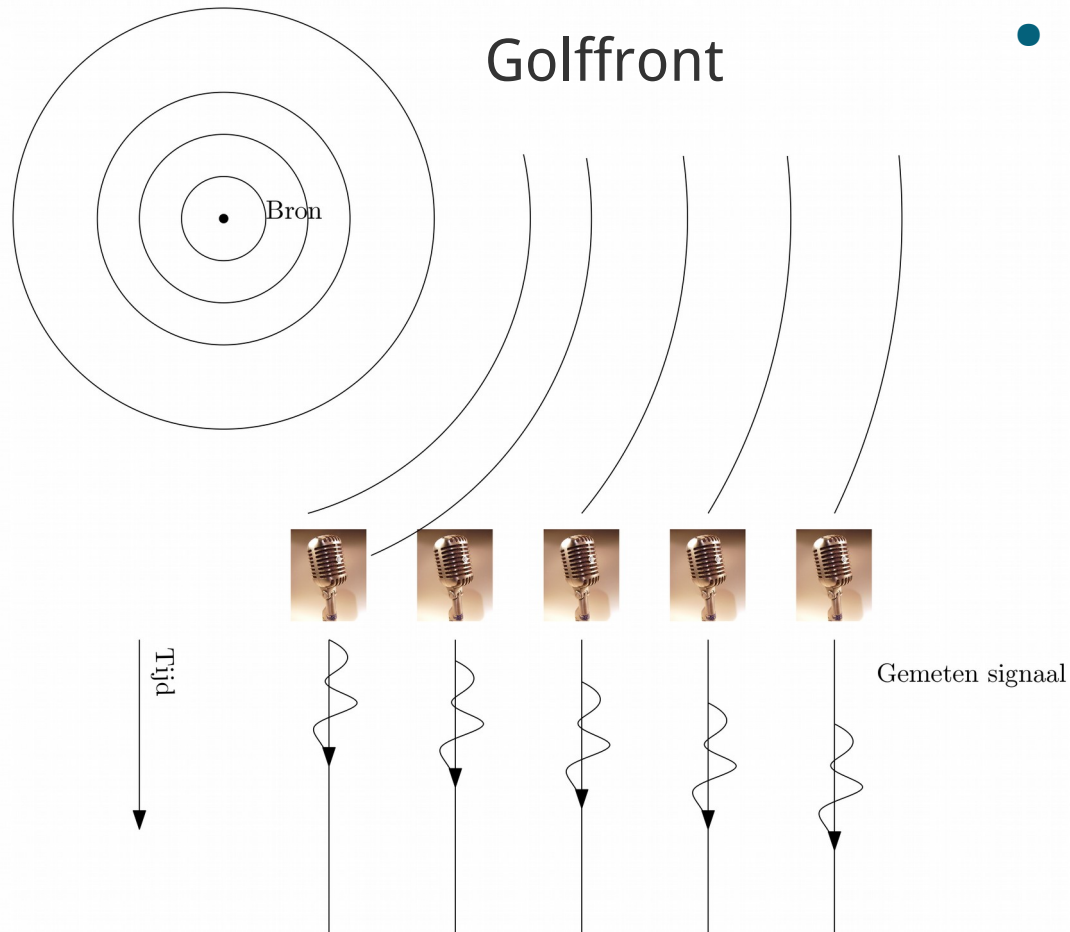
$$\frac{\partial u_x(t)}{\partial t} \approx \frac{1}{\rho_0} \frac{(p_2(t) - p_1(t))}{\Delta x}$$



$$I_x = p u_x$$

The equation $I_x = p u_x$ is circled in green, with a blue arrow pointing from the $\frac{\partial u_x(t)}{\partial t}$ term in the equation above to it.

De microfoonarray



- Verschil in
 - Amplitude
 - Tijd

Intermezzo richtinghoren

- ITD: Interaural Time Difference
- ILD: Interaural Level Difference
- Oorschelp: voor/achter/boven/onder
 - Bewegen van hoofd: verlies symmetrie

- Benc

- Lev

- Fas

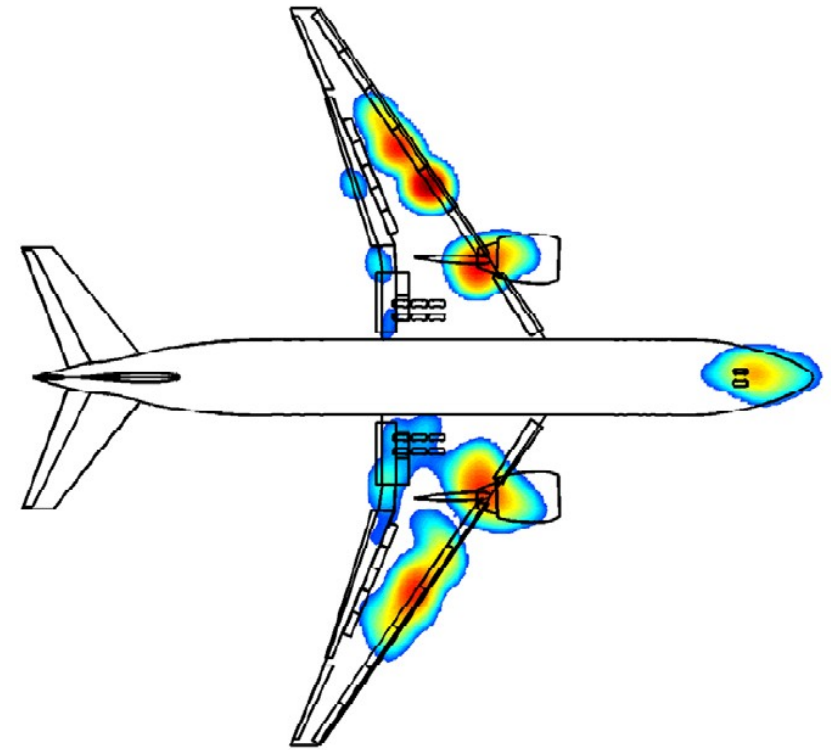
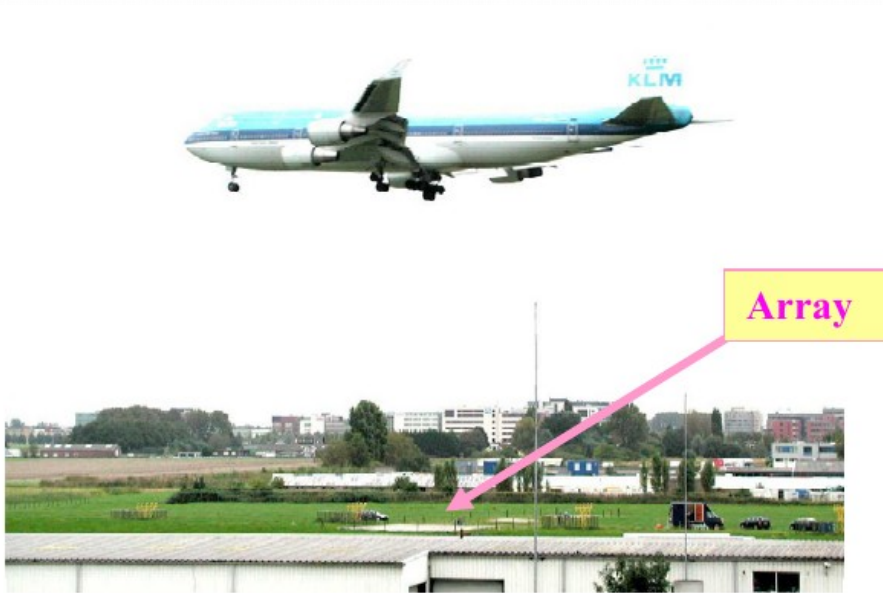


klein





De microfoonarray

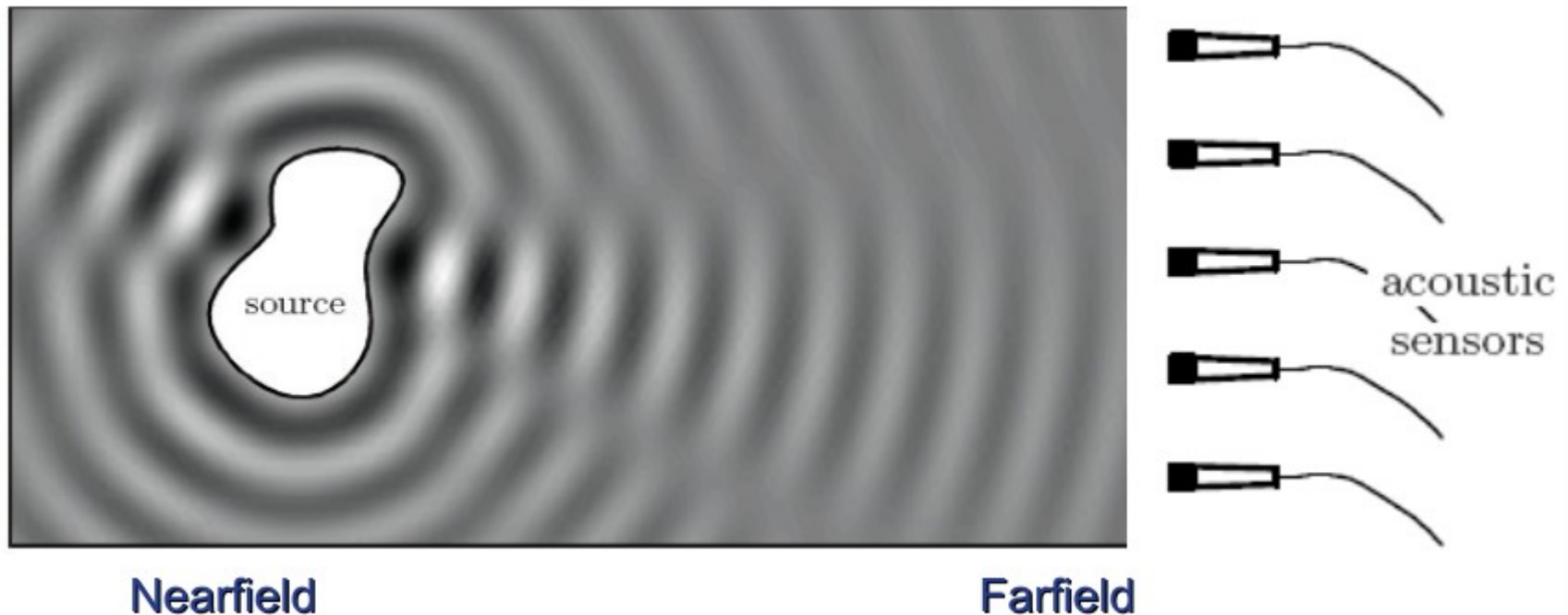


Akoestisch beeld van de Boeing 777 tijdens landingaanvang (bron: NLR)

Akoestische holografie

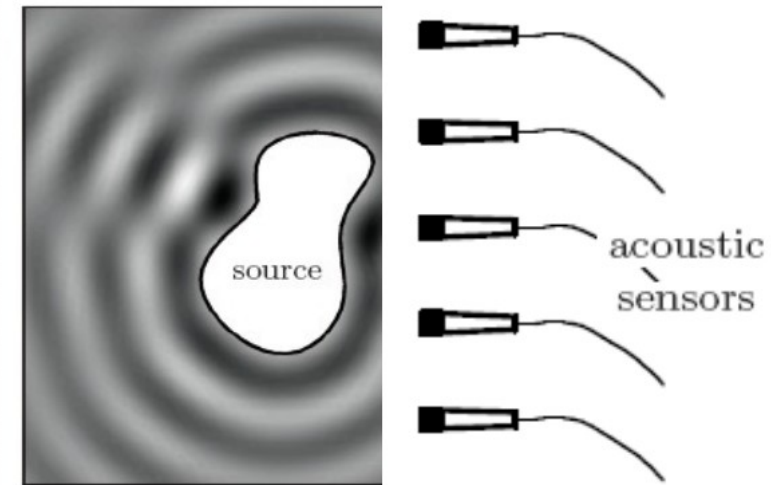
- Bronlokalisatie in het nabije veld
 - Holos = volledig
 - Grafein = schrijven

Verre veld: geen detail < golflengte

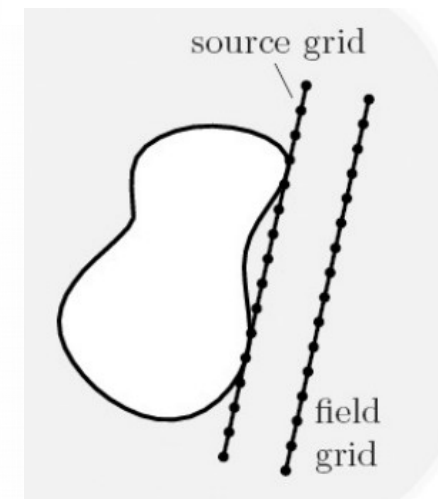


Akoestische holografie

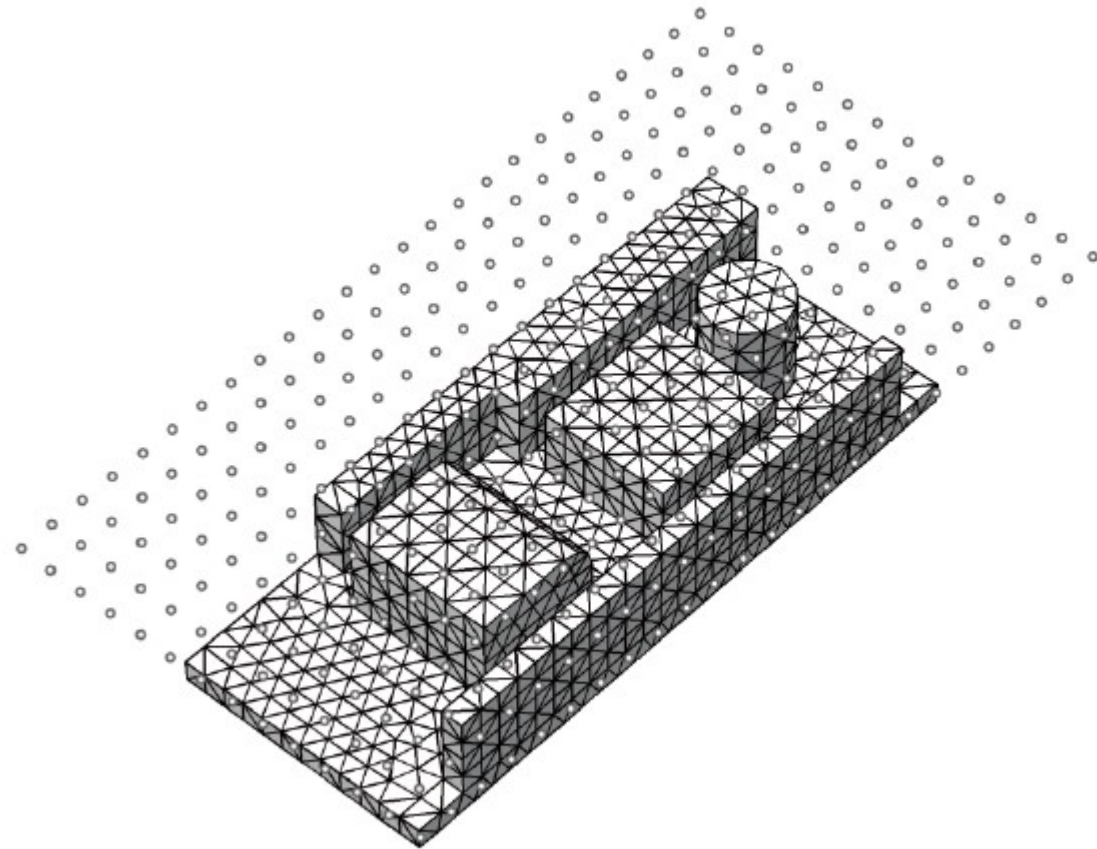
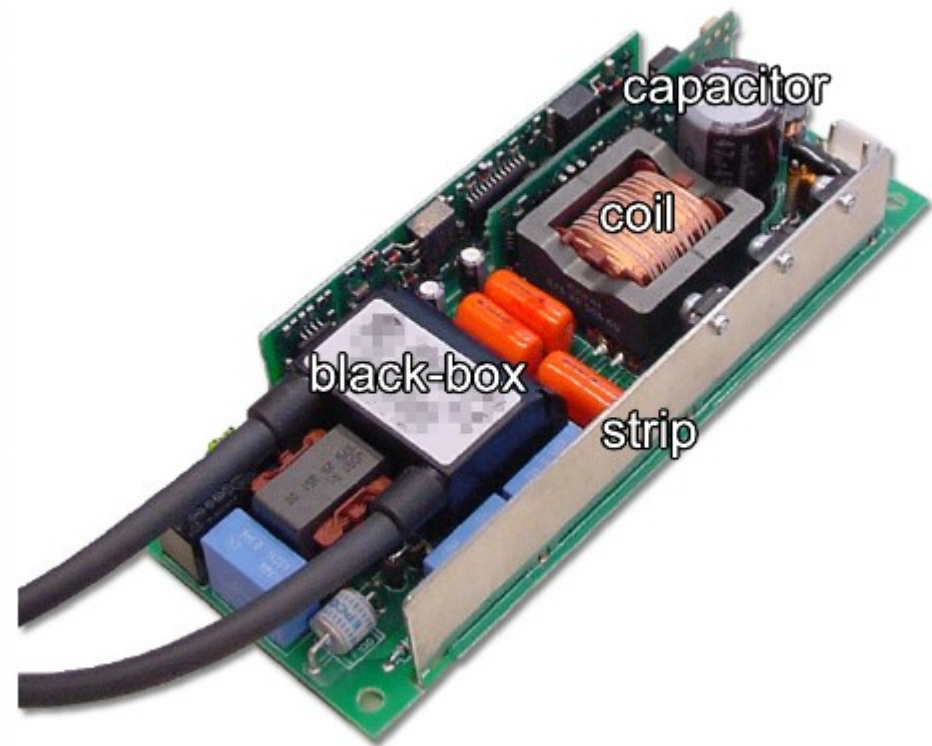
- PNAH
 - Nabije veld: meer detail (evanescent waves)
 - Reconstructie in het golf-getal domein
 - Teruggerekend naar een vlak als bron



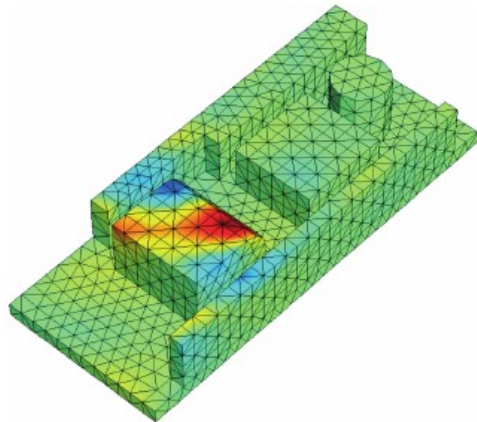
Nearfield



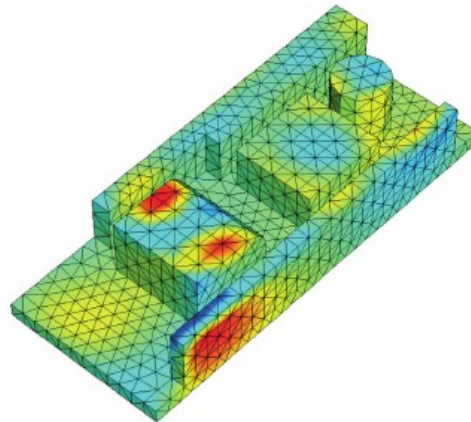
Bronlokalisatie - IBEM



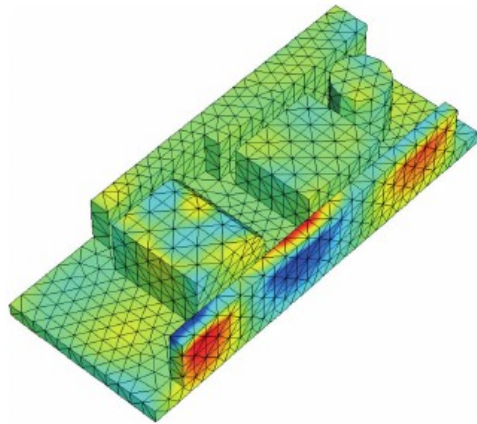
Bronlokalisatie - IBEM



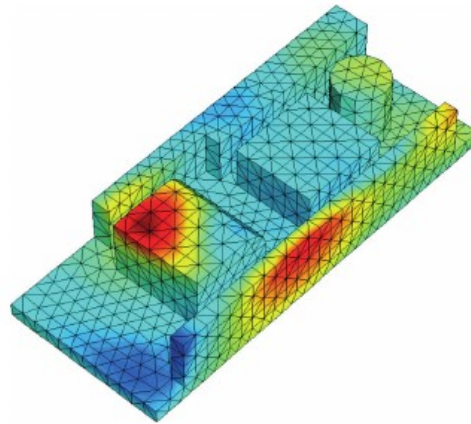
(a) 'Black-box' vibration at odd multiples of f_b .



(b) Excitation of second bending mode of cooling strip, $f = 6f_b$.



(c) Excitation of third bending mode of cooling strip, $f = 12f_b$.



(d) At higher frequencies, $f = 28f_b$, more complex vibration shapes are found.

Source: René Visser
(2004)



ASCEE

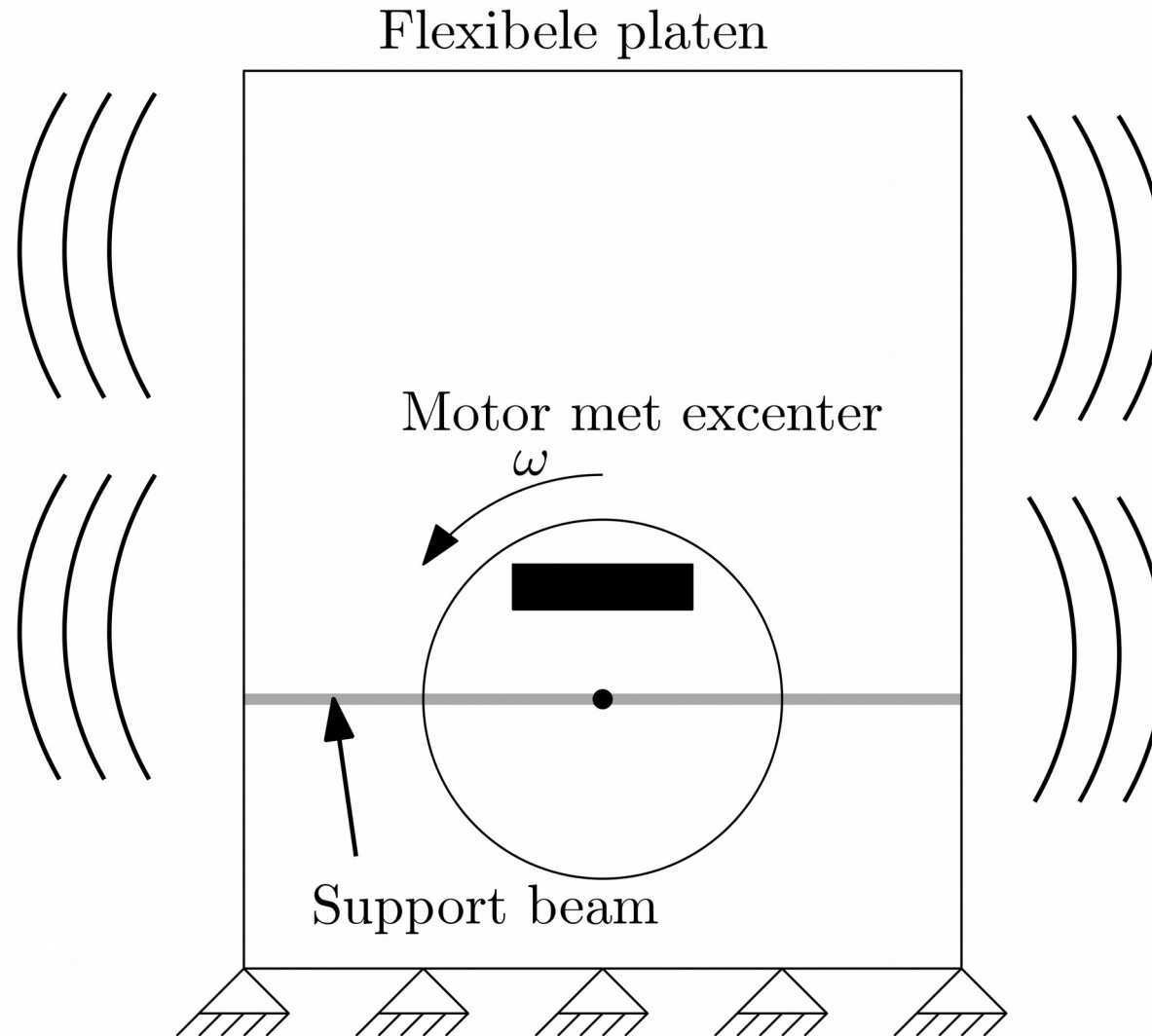
www.ascee.nl

info@ascee.nl

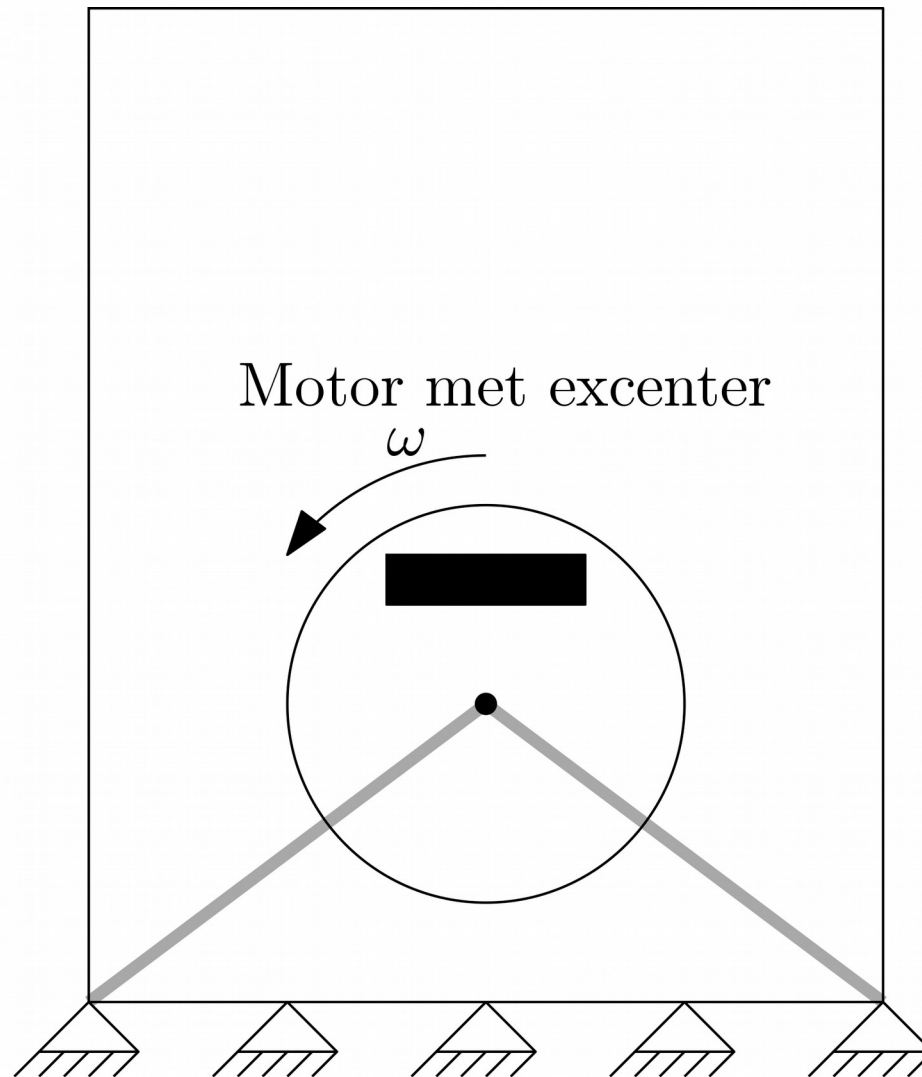
+31 6 189 71 622

Akoestisch ontwerp van producten

Voorbeeld

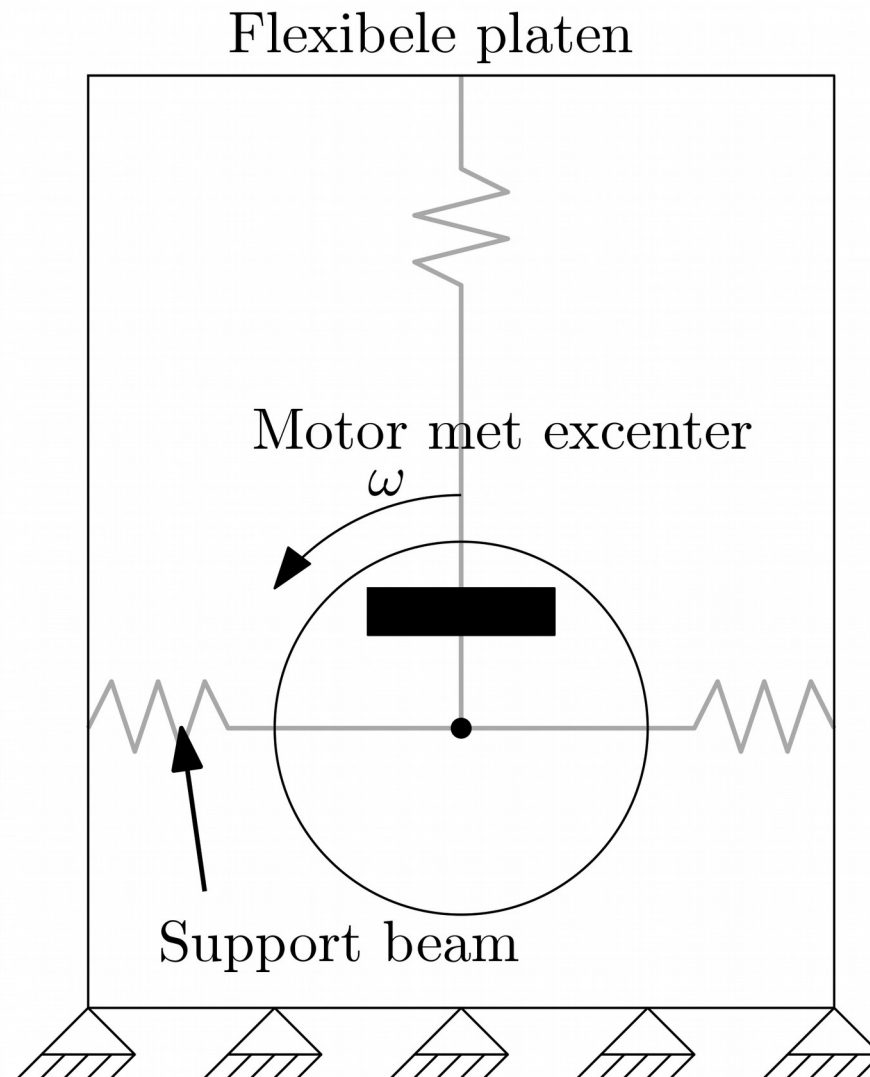


Voorbeeld



Structurele trillingen
ondervangen

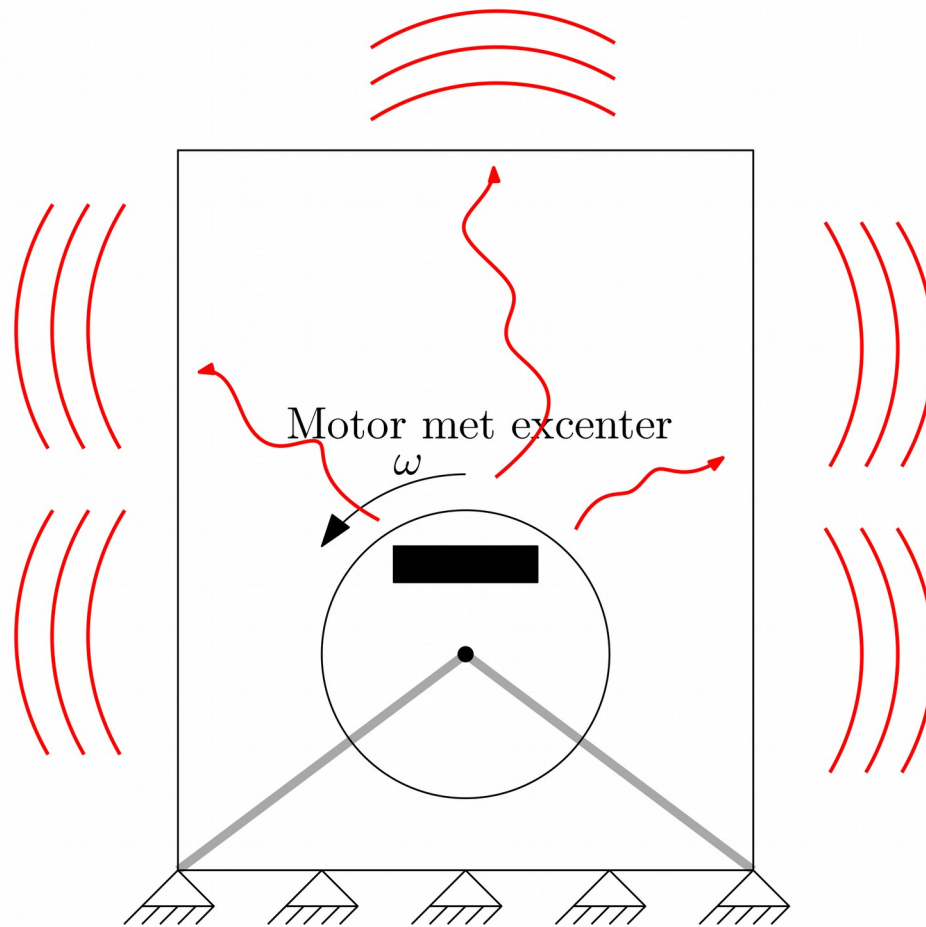
Voorbeeld



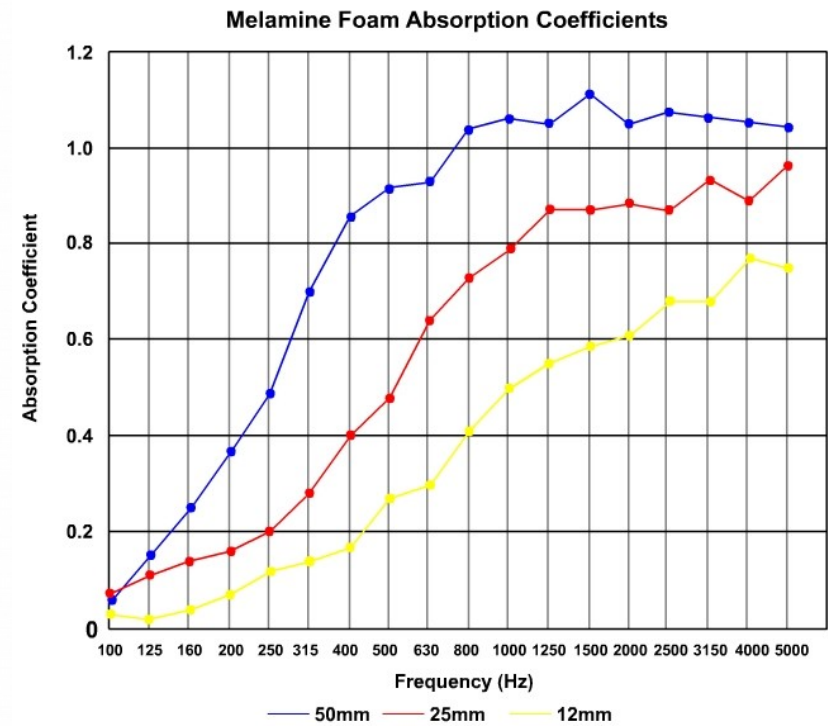
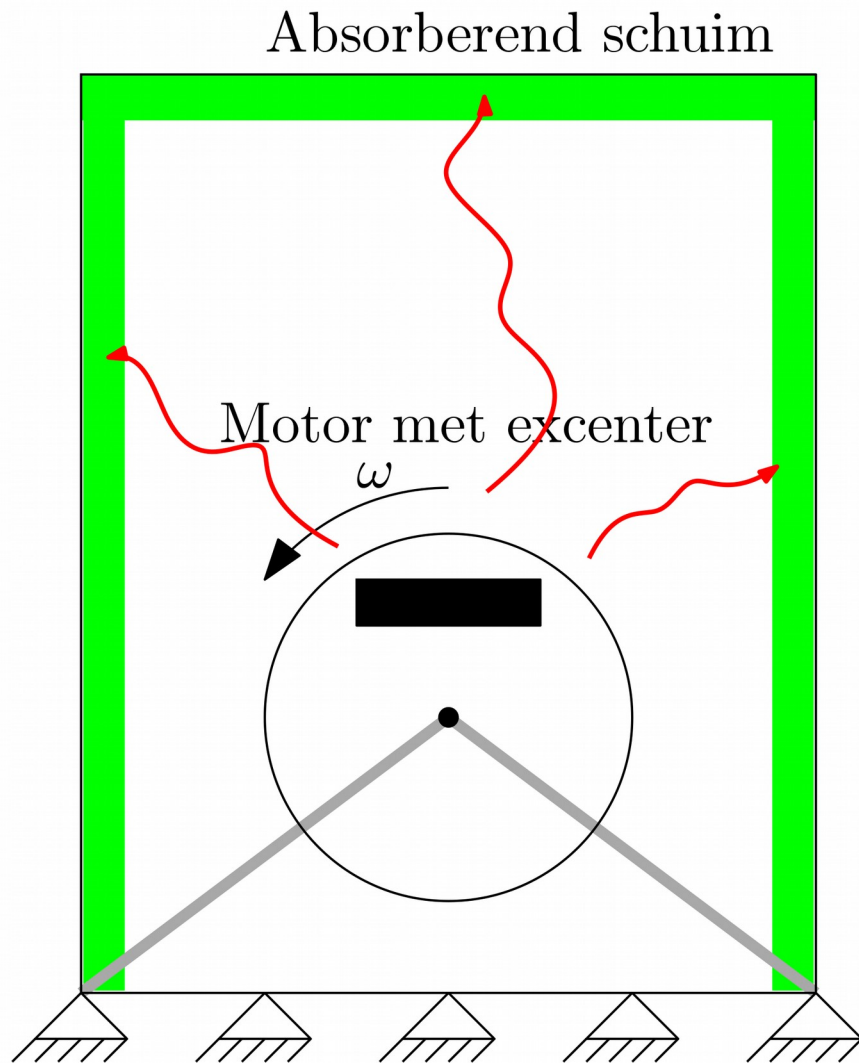
Structurele trillingen
ondervangen
**Denk aan
resonantiefrequentie!**

Voorbeeld

Intern pad zorgt nog steeds voor te veel afstraling



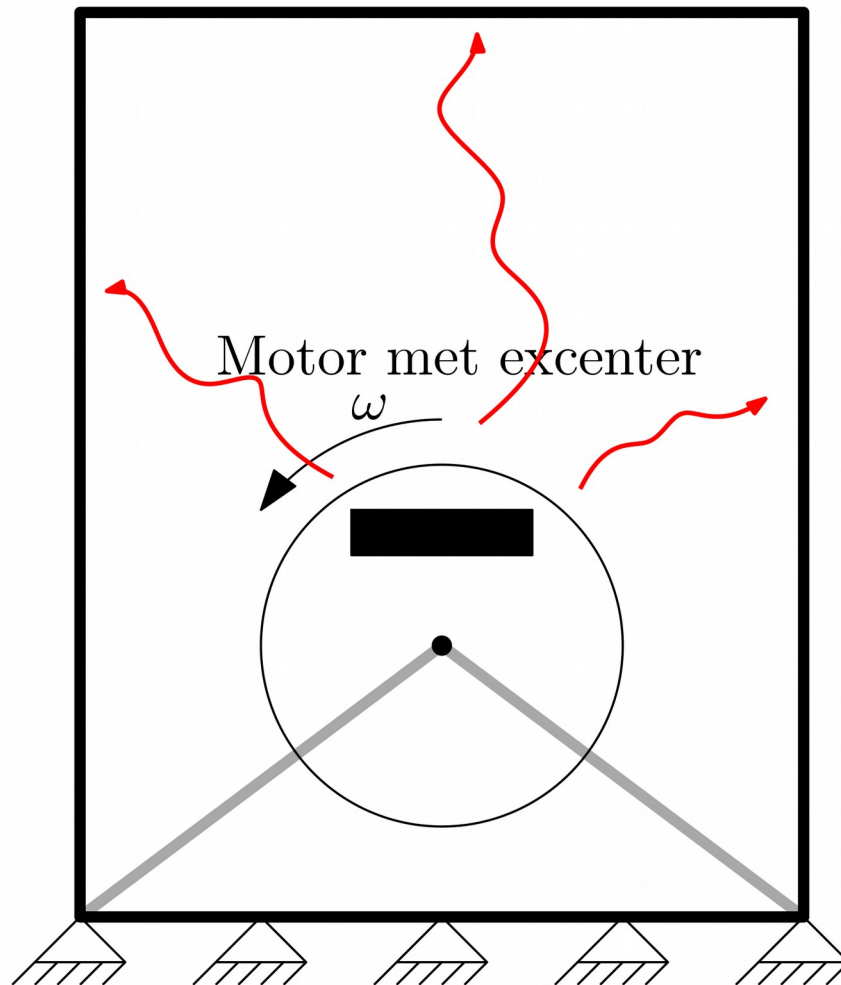
Voorbeeld



Dikte absorptiemateriaal
 \sim golflengte / 4

Voorbeeld

Dikkere wand



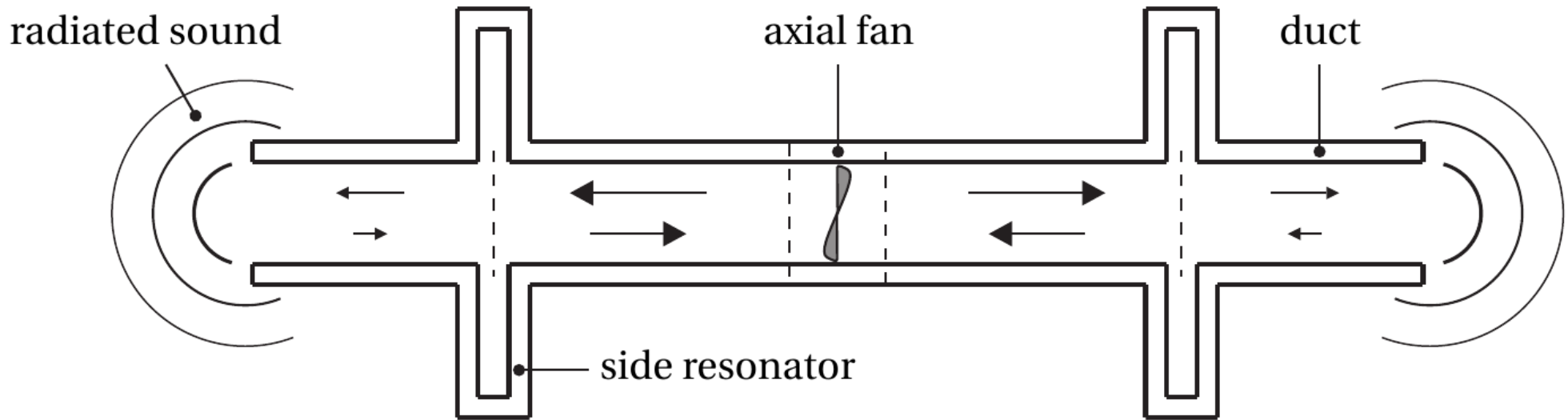
Transmissieverlies:
akoestische massawet

$$TL = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{(\omega \rho_s t_s)^2}{4z_0^2} \right) \text{ dB}$$

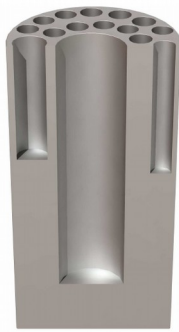
Transmissieverlies neemt toe met
6 dB per octaaf (verdubbeling van
frequentie)

Pas op voor lekkage!

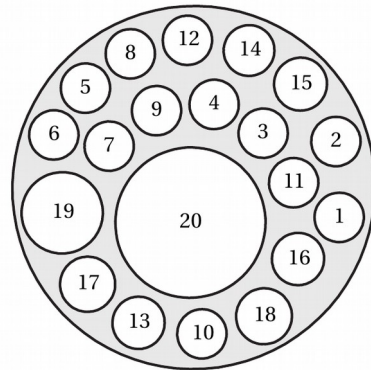
Resonante absorbers



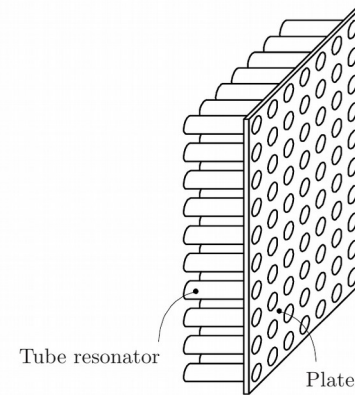
(a)



(b)

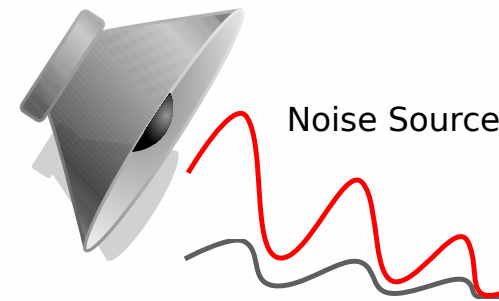


(c)



Active noise control

- “Antigeluid”
- Principe zeer simpel
- Implementatie lastig



Ontwerpregels

- Zet de bron op grotere afstand
- Maak de bron stiller
- Vibratie-isolatie
- Vermijd resonanties (klankkasten)
 - “Radiatiemodes!”
- Blokkeer het geluidspad
- Maak gebruik van absorberend materiaal
- Maak gebruik van resonante absorbers
- Maak gebruik van antigeluid/antitrillingen

Implementatiegemak



Vernuftigheid / kosten





ASCEE

www.ascee.nl

info@ascee.nl

+31 6 189 71 622

Toepassingen van niet-lineaire akoestiek



Toepassingen van nietlineaire akoestiek

- Akoestische levitatie
 - Akoestische radiatiedruk
- Akoestische streaming / propulsie
- Thermo-akoestiek





ASCEE

www.ascee.nl
info@ascee.nl
+31 6 189 71 622

Einde

