

# Meten van akoestische eigenschappen in doorstroomde leidingsystemen

NAG masterclass: meten van geluid  
1 december 2021

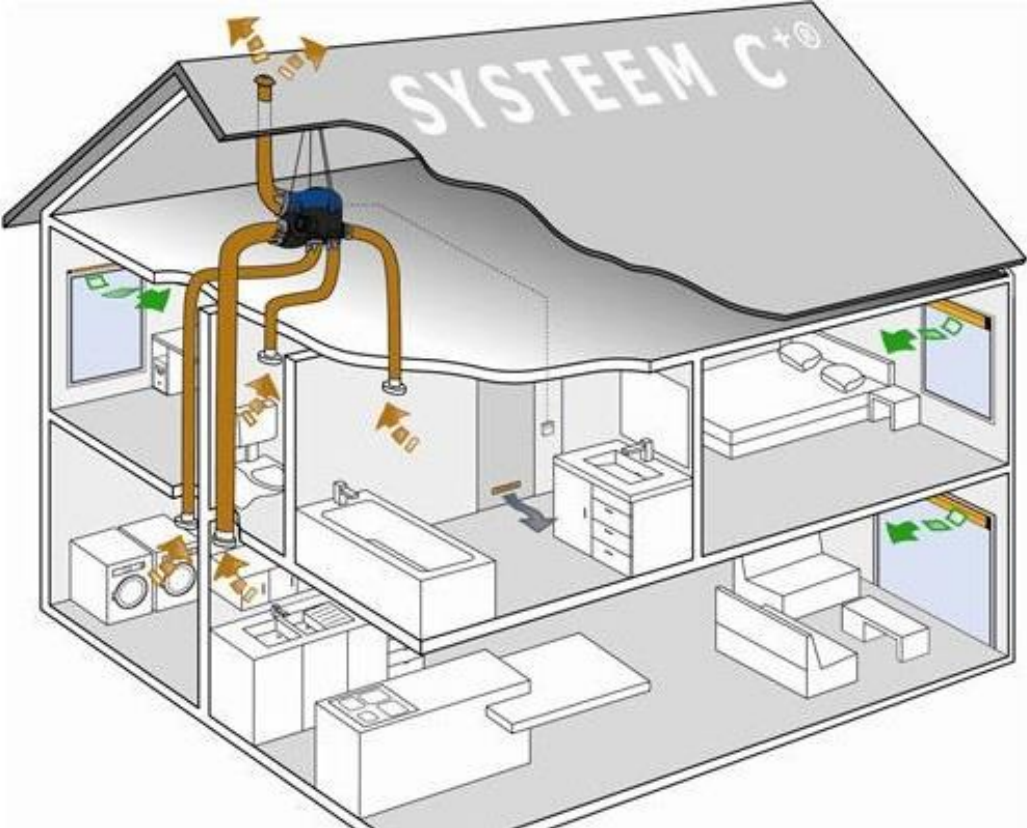


Hervé Denayer

KU Leuven – Mecha(tro)nic System Dynamics (LMSD)

Flanders Make – DMMS Lab

# Doorstroomde leidingsystemen



<https://bouwplannen.be/ventilatiesysteem-c/>



# Doorstroomde leidingsystemen



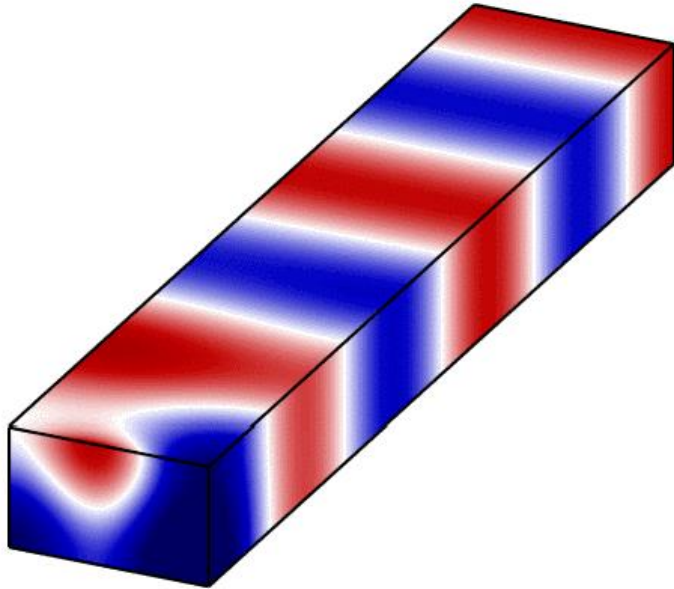
<https://www.renson.eu/gd-gb/products/ventilation/mechanical-ventilation/healthbox-3-0>



<https://laughingsquid.com/invoxicated-an-interactive-sound-effects-sculpture-for-kids/>



# Vlakke golfvoortplanting in leidingen



- bij frequenties lager dan de cut-off frequentie ( $f < f_c$ ) propageren enkel vlakke golven doorheen een leiding

$$f_c = (1 - M_0^2)^{1/2} \frac{c_0}{2\pi} k_{\perp}$$

- rechthoekige doorsnede:  $k_{\perp} = \pi/W$
  - ronde doorsnede:  $k_{\perp} = 1,84/R$
- geluidsdruk (voldoende ver van bronnen):

$$P(\omega, z) = \boxed{p^+(\omega) e^{-jk^+z}} + \boxed{p^-(\omega) e^{jk^-z}}$$

stroomafwaarts  
propagerende golf

stroomopwaarts  
propagerende golf

# Overzicht

1. Vlakke golfdecompositie in leidingen
2. Passieve tweepoortkarakterisatie
3. Actieve tweepoortkarakterisatie
4. Uitbreiding naar hogere frequenties
5. Conclusie

Geluidsvoortplanting?

Geluidstransmissie?  
Geluidsabsorptie?

Geluidsofwekking?

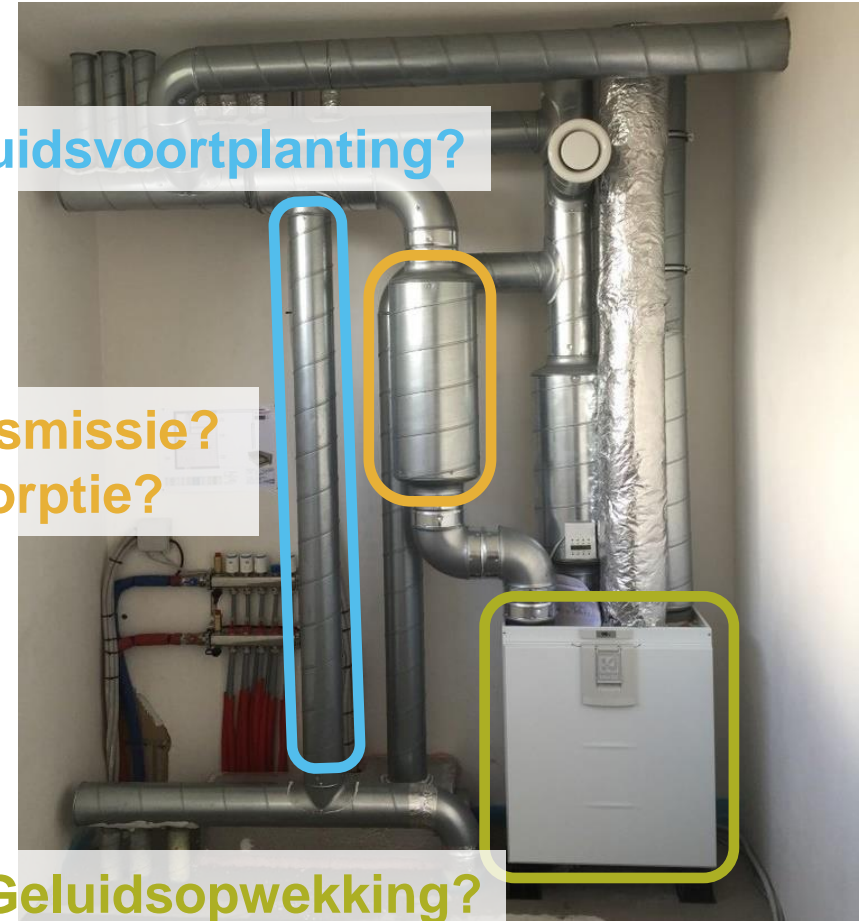


Foto: <https://www.lemmenswarmtepompen.be/projecten>

# Overzicht

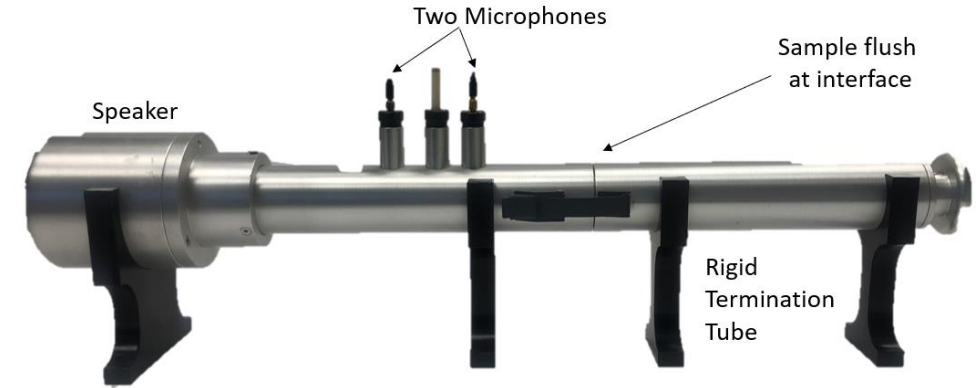
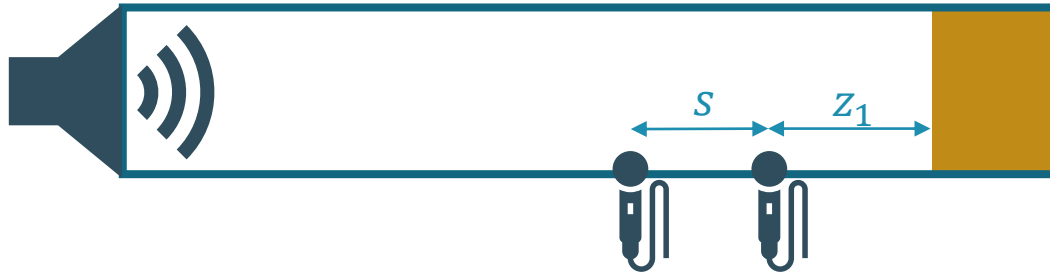
1. **Vlakke golfdecompositie in leidingen**
2. Passieve tweepoortkarakterisatie
3. Actieve tweepoortkarakterisatie
4. Uitbreiding naar hogere frequenties
5. Conclusie

Geluidsvoortplanting?



Foto: <https://www.lemmenschwarmtepompen.be/projecten>

# Impedantiebuïs



<https://community.sw.siemens.com/s/article/Measuring-Sound-Absorption-with-an-Impedance-Tube>

- Geluidsdruk bij lage frequenties ( $f < f_c$ ) in een starre leiding zonder stroming:

$$P(\omega, z) = p^+(\omega) e^{-jk_0 z} + p^-(\omega) e^{jk_0 z}$$

- Reflectiecoëfficiënt in een impedantiebuïs: **2 microfoon methode** (ISO 10534-2)

$$R(\omega) = \frac{H_{12}(\omega) - H_I(\omega)}{H_R(\omega) - H_{12}(\omega)} e^{2jk_0 z_1} \quad H_I(\omega) = e^{-jk_0 s} \quad H_R(\omega) = e^{-jk_0 s}$$

# Vlakke golfdecompositie

- **2 microfoon methode: bepalen van de complexe vlakke golfamplitudes**
  - oplossen van een lineair stelsel

$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) \\ p^-(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P(\omega, z_1) \\ P(\omega, z_2) \end{bmatrix}$$

- niet mogelijk wanneer de matrix singulier is:

$$\sin\left(\frac{k_0 s}{1 - M^2}\right) = 0 \quad k_0 s = n\pi (1 - M^2)$$

- hoge gevoeligheid voor meetfouten wanneer de matrix slecht geconditioneerd is  
→ **bruikbaar in het frequentiebereik [1]:**

$$0,1 \pi(1 - M^2) < k_0 s < 0,8 \pi(1 - M^2)$$



# Vlakke golfdecompositie

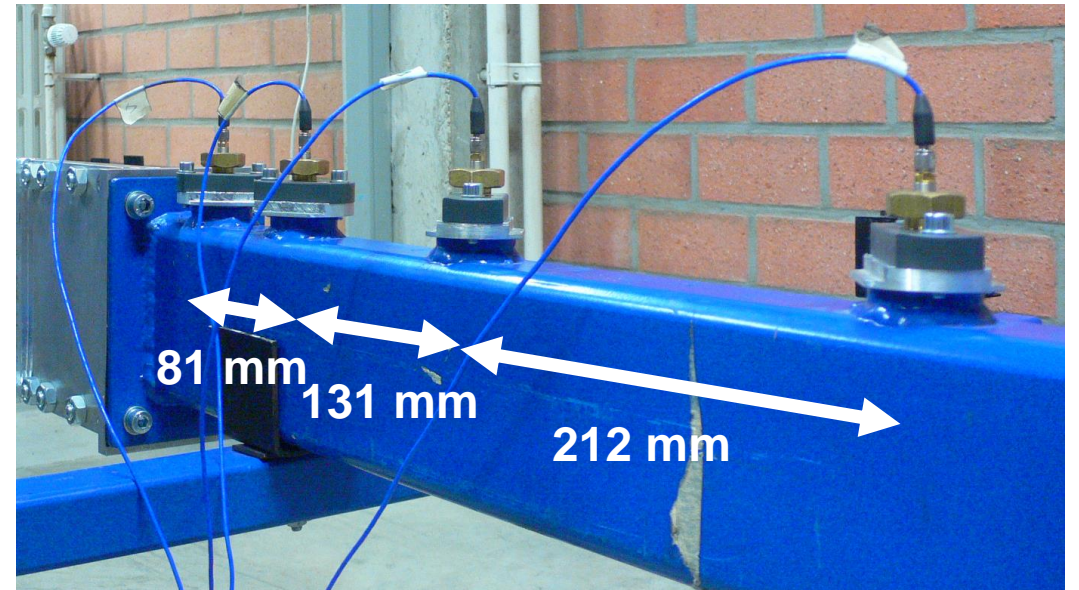
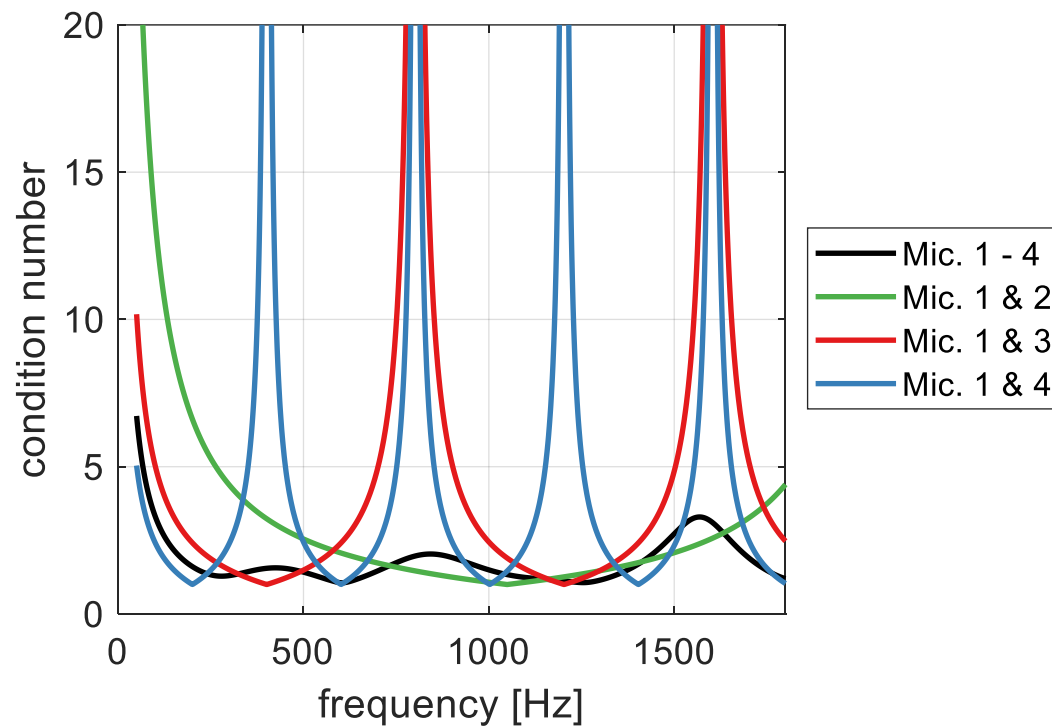
- Gebruik van meerdere ( $n > 2$ ) microfoons: “**multiple microphone method**”

$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) \\ p^-(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} P(\omega, z_1) \\ P(\omega, z_2) \\ \vdots \\ P(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

- kleinste kwadraten oplossing via Moore-Penrose pseudo-inverse
- lager conditiegetal in breed frequentiebereik via optimalisatie van de microfoonposities

# Vlakke golfdecompositie

- Gebruik van meerdere ( $n > 2$ ) microfoons: *“multiple microphone method”*



# Vlakke golfdecompositie

- Gebruik van meerdere ( $n > 2$ ) microfoons: **“multiple microphone method”**

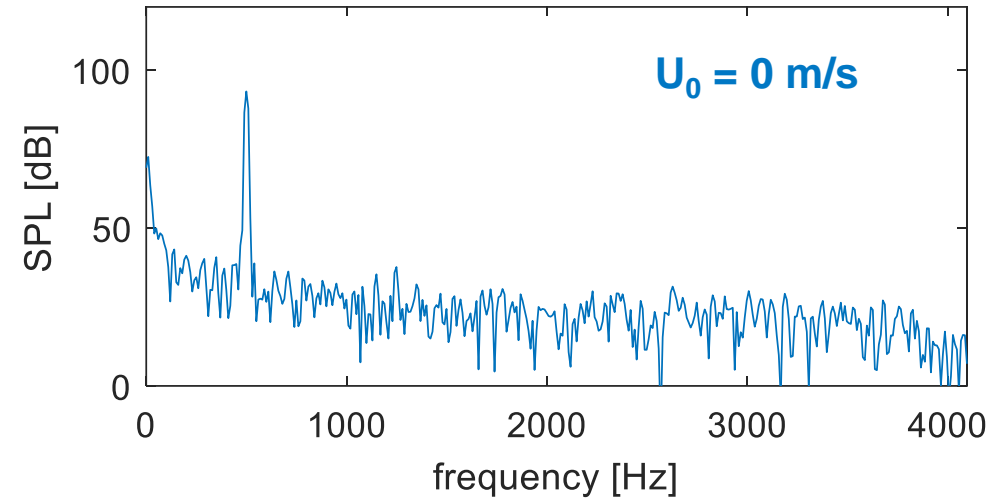
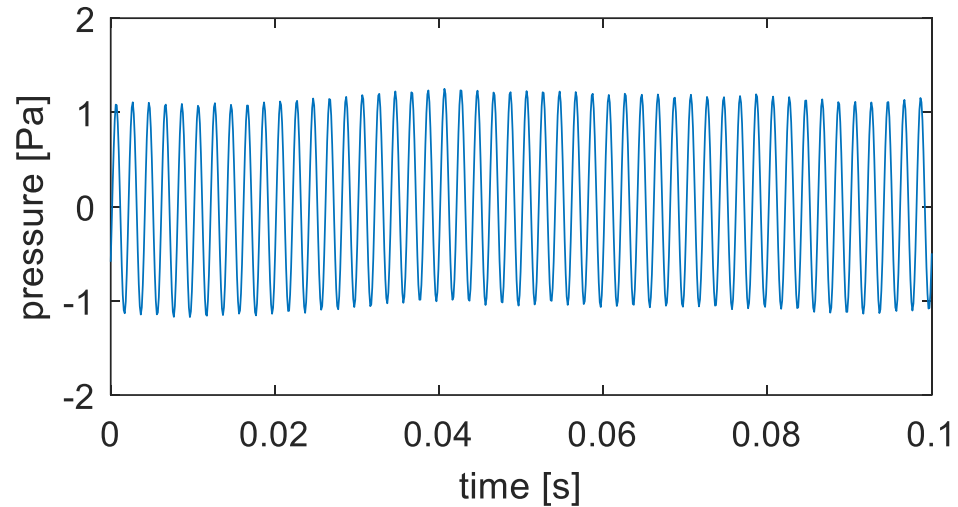
$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) \\ p^-(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} P(\omega, z_1) \\ P(\omega, z_2) \\ \vdots \\ P(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

- amplitude- en fase-kalibratie van de microfoons
- gemeten drukspectrum  $\neq$  geluidsdrukspectrum



# Invloed van aerodynamische drukfluctuaties

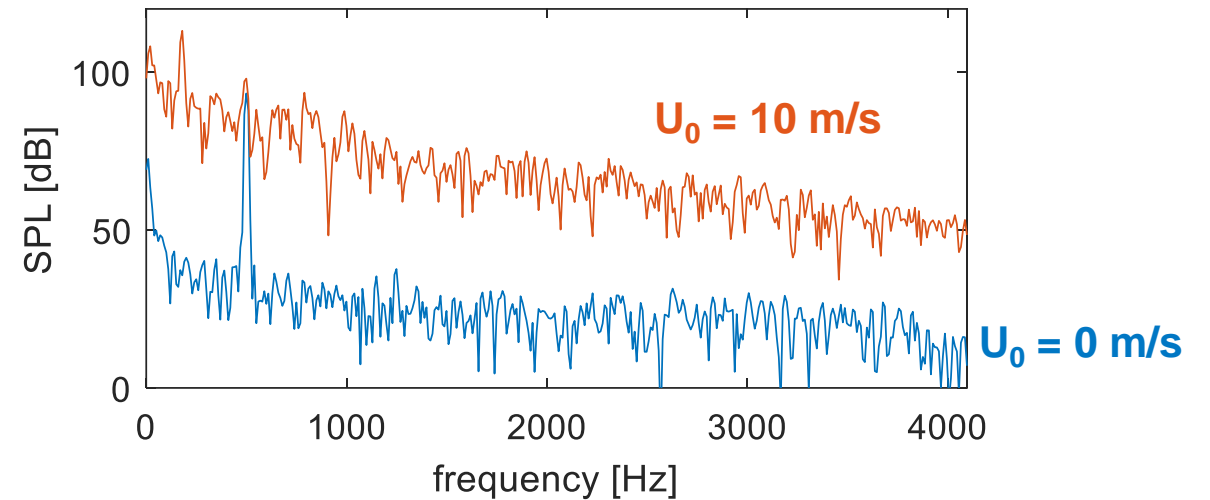
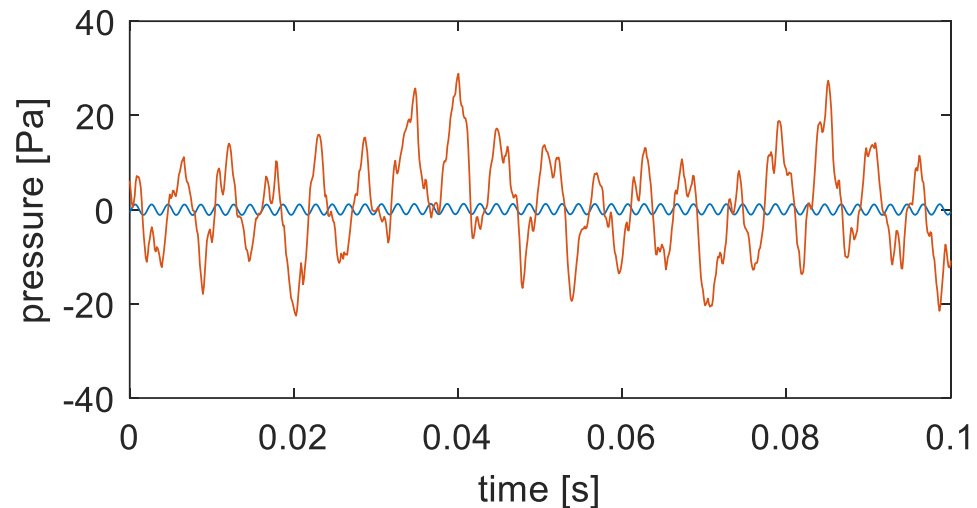
**Microfoonsignaal in een leiding:** luidspreker excitatie bij 500 Hz





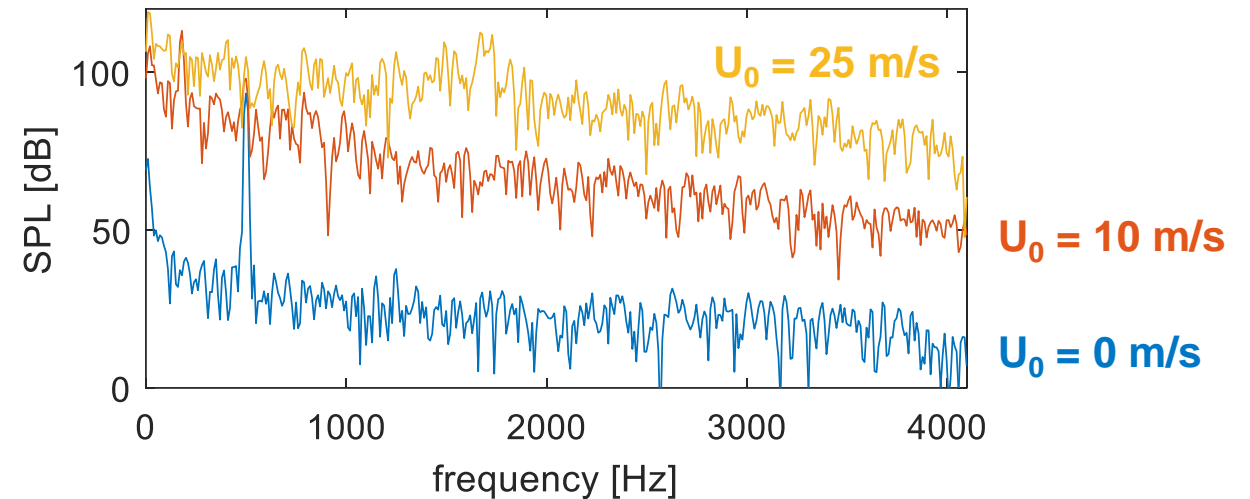
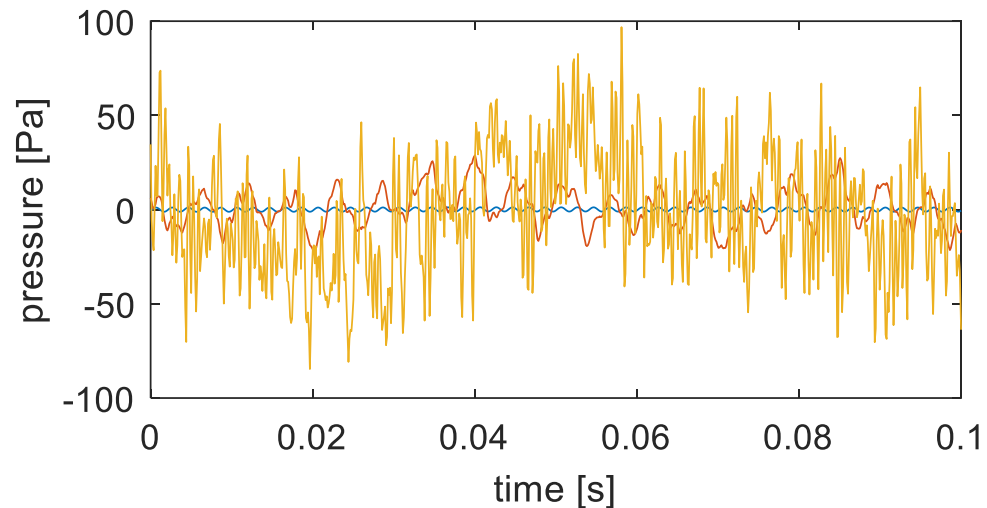
# Invloed van aerodynamische drukfluctuaties

**Microfoonsignaal in een leiding:** luidspreker excitatie bij 500 Hz



# Invloed van aerodynamische drukfluctuaties

**Microfoonsignaal in een leiding:** luidspreker excitatie bij 500 Hz



- Gemeten signaal = geluidsdruk + aerodynamische drukfluctuaties

# Invloed van aerodynamische drukfluctuaties

- Een microfoonsignaal  $x(t)$  bestaat uit de geluidsdruk  $p(t)$  en aerodynamische drukfluctuaties (turbulentie)  $p_t(t)$

$$x(t) = p(t) + p_t(t) \quad \xleftrightarrow{X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt} \quad X(\omega) = P(\omega) + P_t(\omega)$$

- Rechtstreeks gebruik van microfoonspectra leidt tot systematische fouten
  - overdeterminatie (>2 microfoons) en kleinste kwadratenoplossing via pseudoinverse
  - microfoonmembraan afschermen van de stroming
  - keuze excitatiesignaal: concentreren van de energie in een smalle frequentieband
  - **signaalverwerking: spectrale middeling in het frequentiedomein**

# Signaalverwerking

- Energiedichtheidsspectrum (“*autopower spectrum*”):

$$G_{xx}(\omega) = X(\omega) X^*(\omega)$$

- Kruisenergiedichtheidsspectrum (“*crosspower spectrum*”):

$$G_{xy}(\omega) = X(\omega) Y^*(\omega)$$

- Afschatten van autopower en crosspower spectrum m.b.v. **Welch methode**:

1. Tijdssignaal opdelen in  $N$  segmenten
2. DFT van elk segment berekenen
3. Middelen van autopower en crosspower over de segmenten

$$\hat{G}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{X}_i \hat{X}_i^* \qquad \hat{G}_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{X}_i \hat{Y}_i$$



# Signaalverwerking

- Autopower spectrum van een microfoonsignaal  $x(t) = p(t) + p_t(t)$

$$\hat{G}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{P}\hat{P}^* + \boxed{\hat{P}\hat{P}_t^*} + \boxed{\hat{P}_t\hat{P}^*} + \hat{P}_t\hat{P}_t^*)_i$$

- Voor ongecorreleerde signalen geldt:

$$G_{xy} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}\hat{Y})_i = 0$$

- Na voldoende lang middelen:  $\hat{G}_{xx} \approx \hat{G}_{pp} + \boxed{\hat{G}_{p_t p_t}}$

# Signaalverwerking

- Crosspower spectrum tussen een microfoonsignaal  $x(t) = p(t) + p_t(t)$  en een referentiesignaal  $y(t) = r(t) + n(t)$

$$\hat{G}_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{P}\hat{R}^* + \boxed{\hat{P}\hat{N}^*} + \boxed{\hat{P}_t\hat{R}^*} + \hat{P}_t\hat{N}^*)_i$$

- Na voldoende lang middelen:  $\hat{G}_{xy} \approx \hat{G}_{pr} + \boxed{\hat{G}_{p_t n}}$

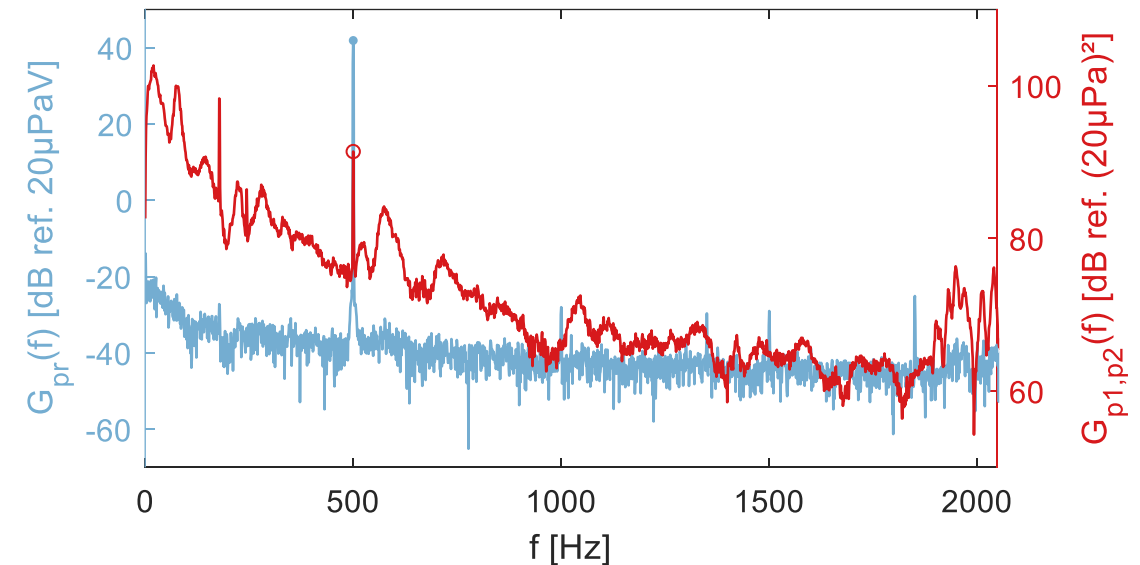
- Keuze referentiesignaal:

- luidsprekersignaal:  $G_{p_t n} \approx 0$

- 2<sup>e</sup> microfoonsignaal:  $G_{p_t n} = G_{p_{t,1}p_{t,2}} = \phi(\omega) e^{-jk_c s} e^{-\alpha k_c |s|}$

# Signaalverwerking

- Voorbeeld: 500 Hz excitatie in een leiding met turbulente stroming ( $U \approx 38$  m/s)
  - Crosspower spectra ( $N = 120$ ) tussen
    - microfoon- en luidsprekersignaal
    - 2 microfoonsignalen
  - Gebruik van **crosspower spectra** onderdrukt de invloed van ongecorreleerde drukfluctuaties en verbetert de signaal-tot-ruisverhouding



# Signaalverwerking

- “*Multiple microphone method*”: introductie van een **referentiesignaal**  $r(\omega)$

$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) r^*(\omega) \\ p^-(\omega) r^*(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} G_{pr}(\omega, z_1) \\ G_{pr}(\omega, z_2) \\ \vdots \\ G_{pr}(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

- Crosspower spectra tussen microfoonsignaal en referentiesignaal
- Keuze referentiesignaal: excitatiesignaal of microfoonsignaal
- Datapunten met lage coherentie kunnen weggelaten worden uit de vergelijking

$$\gamma_{xy}^2 = \hat{G}_{xy} \hat{G}_{yx}^* / (\hat{S}_{xx} \hat{S}_{yy})$$



# Vlakke golfdecompositie

- Golfvoortplantingsmodel bepaald door **golfgetallen**

$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) & r^*(\omega) \\ p^-(\omega) & r^*(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} G_{pr}(\omega, z_1) \\ G_{pr}(\omega, z_2) \\ \vdots \\ G_{pr}(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

- ideaal wrijvingsloos gas en uniforme stroming:  $k^\pm = \omega / (c_0(1 \pm M))$
- correcties voor visco-thermische wrijvingsverliezen aan de wanden, refractie-effecten in niet-uniforme stroming, turbulentie, etc.
- nauwkeurige bepaling van de golfgetallen vereist nauwkeurige bepaling van geluidssnelheid (temperatuur, luchtvochtigheid), stromingssnelheid, ...

# Geavanceerde decompositie technieken

- Vlakke golfdecompositie = minimaliseren van het verschil  $r_{\omega i}$  tussen golfvoorplantingsmodel en metingen voor elke frequentie en microfoon

$$r_{\omega i} = p^+(\omega) e^{-jk^+(\omega)z_i} + p^-(\omega) e^{jk^-(\omega)z_i} - P(\omega, z_i)$$

→ schatten van bijkomende parameters indien #vgl > #onbekenden

- **“Full plane wave decomposition method”** [1]
  - bepalen van 4 onbekenden per frequentie
  - stelsel van (minstens) niet-lineaire 4 vergelijkingen per frequentie  
→ minstens 4 microfoons

# Geavanceerde decompositie technieken

- Vlakke golfdecompositie = minimaliseren van het verschil  $r_{\omega i}$  tussen golfvoorplantingsmodel en metingen voor elke frequentie en microfoon

$$r_{\omega i} = p^+(\omega) e^{-jk^+(\omega)z_i} + p^-(\omega) e^{jk^-(\omega)z_i} - P(\omega, z_i)$$

→ schatten van bijkomende parameters indien #vgl > #onbekenden

- **“Iteratieve methode”** [1,2]
  - bepalen van 2 onbekende golfamplitudes per frequentie en de parameters van een model voor de golfgetallen (bvb. geluidssnelheid en Mach getal)
  - stelsel van (#mic. x #freq.) niet-lineaire vergelijkingen  
→ minstens 3 microfoons

# Geavanceerde decompositie technieken

## Iteratieve methode [1,2]

1. Eerste schatting van de golfamplitudes aan de hand van een schatting voor de golfgetallen en de “*multiple microphone method*”

$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) & r^*(\omega) \\ p^-(\omega) & r^*(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} G_{pr}(\omega, z_1) \\ G_{pr}(\omega, z_2) \\ \vdots \\ G_{pr}(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

2. Bepalen van een correctie voor de modelparameters (bvb. geluidssnelheid en Mach getal) op basis van het verschil tussen model en meting voor alle frequenties en microfoons

$$\boldsymbol{\delta} = -\mathbf{J}^+ \mathbf{r} \qquad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_c^{(i)} & \delta_M^{(i)} \end{bmatrix}$$



# Geavanceerde decompositie technieken

## Iteratieve methode [1,2]

3. Corrigeren van de geluidssnelheid en het Mach getal en herberekening van de golfgetallen

$$c_0^{(i+1)} = c_0^{(i)} + \alpha_c^{(i)} \delta_c^{(i)} \quad M^{(i+1)} = M^{(i)} + \alpha_M^{(i)} \delta_M^{(i)}$$

4. Herberekenen van de golfamplitudes a.h.v. de “*multiple microphone method*” en de gecorrigeerde golfgetallen

$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) & r^*(\omega) \\ p^-(\omega) & r^*(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} G_{pr}(\omega, z_1) \\ G_{pr}(\omega, z_2) \\ \vdots \\ G_{pr}(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

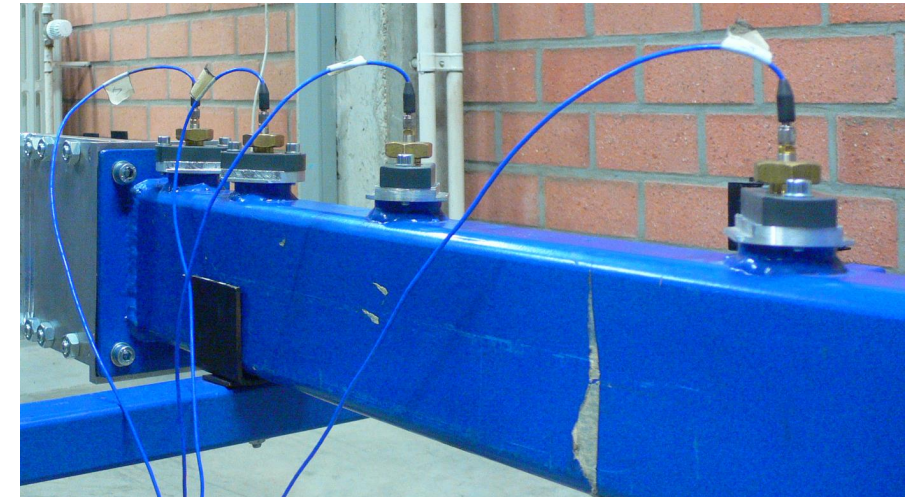
5. Stappen 1 – 4 herhalen tot de parameters convergeren

# Vlakke golfdecompositie: overzicht

- Vlakke golfdecompositie = bepalen van complexe golfamplitudes in starre leiding
- Multiple microphone method

$$\begin{bmatrix} p^+(\omega) & r^*(\omega) \\ p^-(\omega) & r^*(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} G_{pr}(\omega, z_1) \\ G_{pr}(\omega, z_2) \\ \vdots \\ G_{pr}(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

- overdeterminatie en pseudoinverse
- crosspower spectra met referentiesignaal
- nauwkeurige bepaling golfgetallen



# Overzicht

1. Vlakke golfdecompositie in leidingen
2. **Passieve tweepoortkarakterisatie**
3. Actieve tweepoortkarakterisatie
4. Uitbreiding naar hogere frequenties
5. Conclusie

Geluidstransmissie?  
Geluidsabsorptie?



Foto: <https://www.lemmenswarmtepompen.be/projecten>

# Transmissie- en reflectie-eigenschappen



- **Transmissieverlies:** verhouding tussen invallend geluidsvermogen  $W_i$  en het doorgegeven geluidsvermogen  $W_o$  voor een anechoïsche terminatie

$$TL = 10 \log_{10} \frac{W_i}{W_o}$$

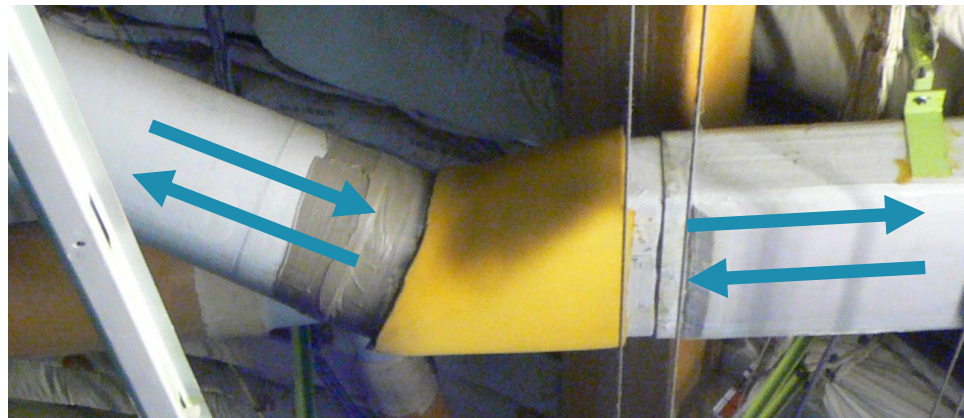
- Meten van het transmissieverlies
  - decompositie in vlakke golven voor de inlaatleiding
  - anechoïsche terminatie voor de uitlaatleiding

$$TL = 10 \log_{10} \frac{|p_i^+|^2}{|p_o^+|^2}$$

# Twee-poort modellen van leidingcomponenten

- Component tussen rechte inlaat- en uitlaatleiding met starre wanden ( $f < f_c$ )

**inlaatleiding:** geluidsveld  
bepaald door  $p_i^+$  en  $p_i^-$



**uitlaatleiding:** geluidsveld  
bepaald door  $p_o^+$  en  $p_o^-$

- **Passief twee-poort model** van een leidingcomponent
  - lineair en tijdsinvariant systeem
  - matrix relatie in het frequentiedomein

$$\begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix} = \overset{\text{scattering matrix}}{\begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} p_i^+ \\ p_o^- \end{bmatrix}$$

# Twee-poort modellen voor leidingcomponenten

- **Passieve twee-poort modellen**

- scattering matrix

$$\begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^+ \\ p_o^- \end{bmatrix}$$

- transfer matrix

$$\begin{bmatrix} p_o \\ u_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i \\ u_i \end{bmatrix}$$

- impedantie matrix

$$\begin{bmatrix} p_i \\ p_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_o \end{bmatrix}$$

- admittantie matrix

$$\begin{bmatrix} u_i \\ u_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i \\ p_o \end{bmatrix}$$

- ...



- twee-poort modellen zijn onafhankelijk van de randvoorwaarden
- alle formuleringen zijn equivalent
- twee-poort karakterisatie = bepalen van 4 matrixcoëfficiënten

# Passieve twee-poort karakterisatie



- Bepalen van de passieve eigenschappen (transmissie, reflectie, absorptie):  
aanleggen van een dominante en ongecorreleerde externe excitatie

$$\begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^+ \\ p_o^- \end{bmatrix} + \cancel{\begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix}}$$



# Passieve twee-poort karakterisatie



- meting met een externe (luidspreker) excitatie + decompositie in vlakke golven

$$\begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^+ \\ p_o^- \end{bmatrix}$$

- bepalen van de 4 matrixcoëfficiënten vereist 2 metingen met verschillende:

- excitatie ('multiple source method')

- randvoorwaarden ('multiple load method')

$$\begin{bmatrix} p_{o,1}^+ & p_{o,2}^+ \\ p_{i,1}^- & p_{i,2}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i,1}^+ & p_{i,2}^+ \\ p_{o,1}^- & p_{o,2}^- \end{bmatrix}$$

# Passieve twee-poort karakterisatie



- Bepalen van de scattering matrixcoëfficiënten

$$\begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{o,1}^+ & p_{o,2}^+ \\ p_{i,1}^- & p_{i,2}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i,1}^+ & p_{i,2}^+ \\ p_{o,1}^- & p_{o,2}^- \end{bmatrix}^{-1}$$

- Enkel mogelijk indien matrix niet singulier is  $\Leftrightarrow$  2 lineair onafhankelijke metingen

# Passieve twee-poort karakterisatie



- **bijkomende metingen** ( $n \geq 2$ ) met verschillende randvoorwaarden en/of excitatie

$$\begin{bmatrix} p_{o,1}^+ & p_{o,2}^+ & \cdots & p_{o,n}^+ \\ p_{i,1}^- & p_{i,2}^- & \cdots & p_{i,n}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i,1}^+ & p_{i,2}^+ & \cdots & p_{i,n}^+ \\ p_{o,1}^- & p_{o,2}^- & \cdots & p_{o,n}^- \end{bmatrix}$$

- Bepalen van de scattering matrixcoëfficiënten: **pseudo-inverse**

$$\begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{o,1}^+ & p_{o,2}^+ & \cdots & p_{o,n}^+ \\ p_{i,1}^- & p_{i,2}^- & \cdots & p_{i,n}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i,1}^+ & p_{i,2}^+ & \cdots & p_{i,n}^+ \\ p_{o,1}^- & p_{o,2}^- & \cdots & p_{o,n}^- \end{bmatrix}^+$$

- kleinste kwadraten oplossing: minder invloed van meetfouten
- betere matrix conditionering voor een breed frequentiebereik


# Signaalverwerking

- Verhogen van de signaal-tot-ruisverhouding a.h.v. een **referentiesignaal**
  - Vlakke golfdecompositie

$$\begin{bmatrix} G_{p^+r}(\omega) \\ G_{p^-r}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^+(\omega) r^*(\omega) \\ p^-(\omega) r^*(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^+z_1} & e^{jk^-z_1} \\ e^{-jk^+z_2} & e^{jk^-z_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk^+z_n} & e^{jk^-z_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} G_{pr}(\omega, z_1) \\ G_{pr}(\omega, z_2) \\ \vdots \\ G_{pr}(\omega, z_n) \end{bmatrix}$$

- Bepalen van de scattering matrixcoëfficiënten:

$$\begin{bmatrix} p_{o,1}^+ r_1^* & p_{o,2}^+ r_2^* & \cdots & p_{o,n}^+ r_n^* \\ p_{i,1}^- r_1^* & p_{i,2}^- r_2^* & \cdots & p_{i,n}^- r_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i,1}^+ r_1^* & p_{i,2}^+ r_2^* & \cdots & p_{i,n}^+ r_n^* \\ p_{o,1}^- r_1^* & p_{o,2}^- r_2^* & \cdots & p_{o,n}^- r_n^* \end{bmatrix}$$



# Transmissieverlies (en andere toepassingen)

- De bekomen **twee-poort matrix** is onafhankelijk van de randvoorwaarden en beschrijft het volledige passief lineair akoestisch gedrag van de component

$$\begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^+ \\ p_o^- \end{bmatrix}$$

→ berekenen van performantieparameters, bvb. transmissieverlies

$$TL = -20 \log_{10} |T^+|$$

→ validatie van numerieke modellen

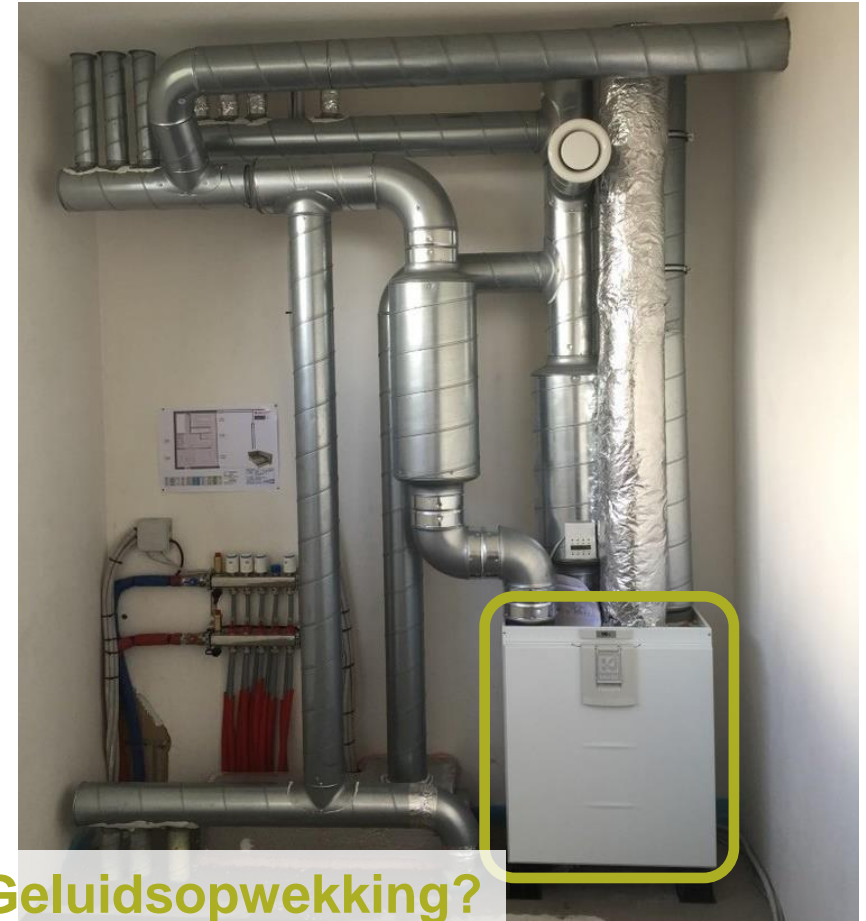
→ modelgebaseerde parameteridentificatie

→ netwerkmodellering

→ ...

# Overzicht

1. Vlakke golfdecompositie in leidingen
2. Passieve tweepoortkarakterisatie
3. **Actieve tweepoortkarakterisatie**
4. Uitbreiding naar hogere frequenties
5. Conclusie



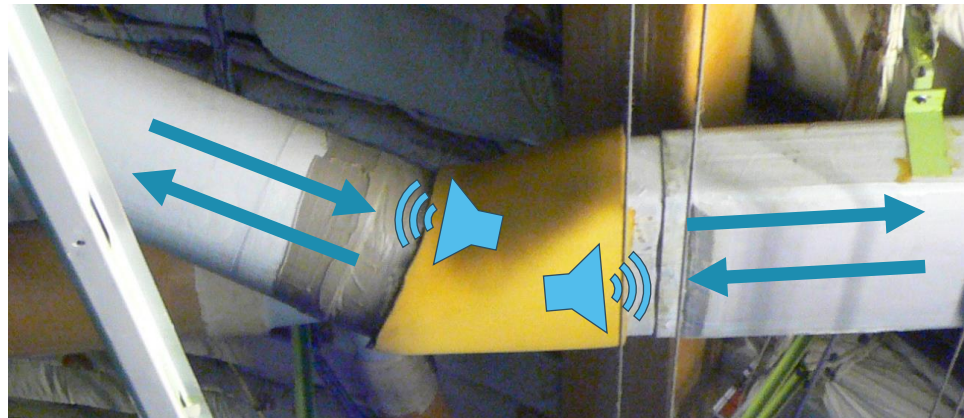
Geluidsofwekking?

Foto: <https://www.lemmenswarmtepompen.be/projecten>

# Twee-poort modellen van leidingcomponenten

- Component tussen rechte inlaat- en uitlaatleiding met starre wanden ( $f < f_c$ )

**inlaatleiding:** geluidsveld  
bepaald door  $p_i^+$  en  $p_i^-$



**uitlaatleiding:** geluidsveld  
bepaald door  $p_o^+$  en  $p_o^-$

- **Twee-poort model** van een leidingcomponent
  - lineair en tijdsinvariant systeem
  - matrix relatie in het frequentiedomein

scattering matrix  
(passief 2-poort model)

$$\begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^+ \\ p_o^- \end{bmatrix}$$

bronterm  
(actief 2-poort model)



# Actieve twee-poort karakterisatie



- Bepalen van de **bronterm**: geluidsopwekking in het twee-poort element

$$\begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^+ \\ p_o^- \end{bmatrix}$$

passieve twee-poort karakterisatie      vlakke golfdecompositie

# Actieve twee-poort karakterisatie



- Passieve twee-poort karakterisatie:  $\geq 2$  metingen met een luidspreker excitatie
- Decompositie in vlakke golven: “*multiple microphone method*”

$$\underbrace{\begin{bmatrix} P(\omega, z_1) \\ \vdots \\ P(\omega, z_n) \end{bmatrix}}_{\mathbf{p}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \exp(-jk^+ z_1) \\ \vdots \\ \exp(-jk^+ z_n) \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}^+} p^+(\omega) + \underbrace{\begin{bmatrix} \exp(jk^- z_1) \\ \vdots \\ \exp(jk^- z_n) \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}^-} p^-(\omega)$$

# Actieve twee-poort karakterisatie



- Bepalen van de **reflectiecoëfficiënt van de (passieve) terminaties**

$$\boxed{p_o^- = R_o p_o^+} \quad p_i^+ = R_i p_i^-$$

# Actieve twee-poort karakterisatie



- Gebruik makend van de reflectiecoëfficiënten van de (passieve) terminaties:

→ Bepalen van de bronvector

$$\begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & R_i \\ R_o & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} p_o^+ \\ p_i^- \end{bmatrix}$$

→ Decompositie in vlakke golven (“*multiple microphone method*”)

$$\begin{bmatrix} p_o^+ \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_o^+ + \mathbf{M}_o^- R_o)^+ \mathbf{p}_o \quad \begin{bmatrix} p_i^- \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_i^+ R_i + \mathbf{M}_i^-)^+ \mathbf{p}_i$$

# Actieve twee-poort karakterisatie

- **Bronvector:**

- deterministische beschrijving

$$\begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix} = \underbrace{\left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T^+ & R^+ \\ R^- & T^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & R_i \\ R_o & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{M}_o^+ + \mathbf{M}_o^- R_o & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_i^+ R_i + \mathbf{M}_i^- \end{bmatrix}^+}_{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_o \\ \mathbf{p}_i \end{bmatrix}$$

- statistische beschrijving: crosspower matrix

$$\mathbf{G}_S = \left\langle \begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix}^H \right\rangle = \mathbf{C} \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{p}_o \\ \mathbf{p}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_o \\ \mathbf{p}_i \end{bmatrix}^H \right\rangle \mathbf{C}^H = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{p_o p_o} & \mathbf{G}_{p_o p_i} \\ \mathbf{G}_{p_i p_o} & \mathbf{G}_{p_i p_i} \end{bmatrix} \mathbf{C}^H$$

diagonaalelementen = autopower spectra  
 → invloed van aerodynamische drukfluctuaties

# Actieve twee-poort karakterisatie



- minstens 2 microfoons nodig voor decompositie in vlakke golven
- minstens 4 microfoons beschikbaar (passieve tweepoort karakterisatie)  
 → verdeel de microfoons in 2 groepen van elk minstens 2 microfoons

$$\mathbf{G}_s = \left\langle \begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s^+ \\ p_s^- \end{bmatrix}^H \right\rangle = \mathbf{C}_a \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{o,a} \\ \mathbf{p}_{i,a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{o,b} \\ \mathbf{p}_{i,b} \end{bmatrix}^H \right\rangle \mathbf{C}_b^H = \mathbf{C}_a \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{p_{o,a}p_{o,b}} & \mathbf{G}_{p_{o,a}p_{i,b}} \\ \mathbf{G}_{p_{i,a}p_{o,b}} & \mathbf{G}_{p_{i,a}p_{i,b}} \end{bmatrix} \mathbf{C}_b^H$$

enkel crosspower spectra

# Twee-poort karakterisatie: overzicht

- **Passieve twee-poort karakterisatie:**  $\geq 2$  metingen met luidsprekerexcitatie



- Meten van crosspower spectra tussen  $\geq 2$  microfoons per leiding en een referentiesignaal

- **Actieve twee-poort karakterisatie:** 1 extra meting zonder externe excitatie



- Meten van crosspower spectra tussen 2 groepen van elk  $\geq 2$  microfoons



# Overzicht

1. Vlakke golfdecompositie in leidingen
2. Passieve tweepoortkarakterisatie
3. Actieve tweepoortkarakterisatie
4. **Uitbreiding naar hogere frequenties**
5. Conclusie

Geluidsvoortplanting?

Geluidstransmissie?  
Geluidsabsorptie?

Geluidsofwekking?

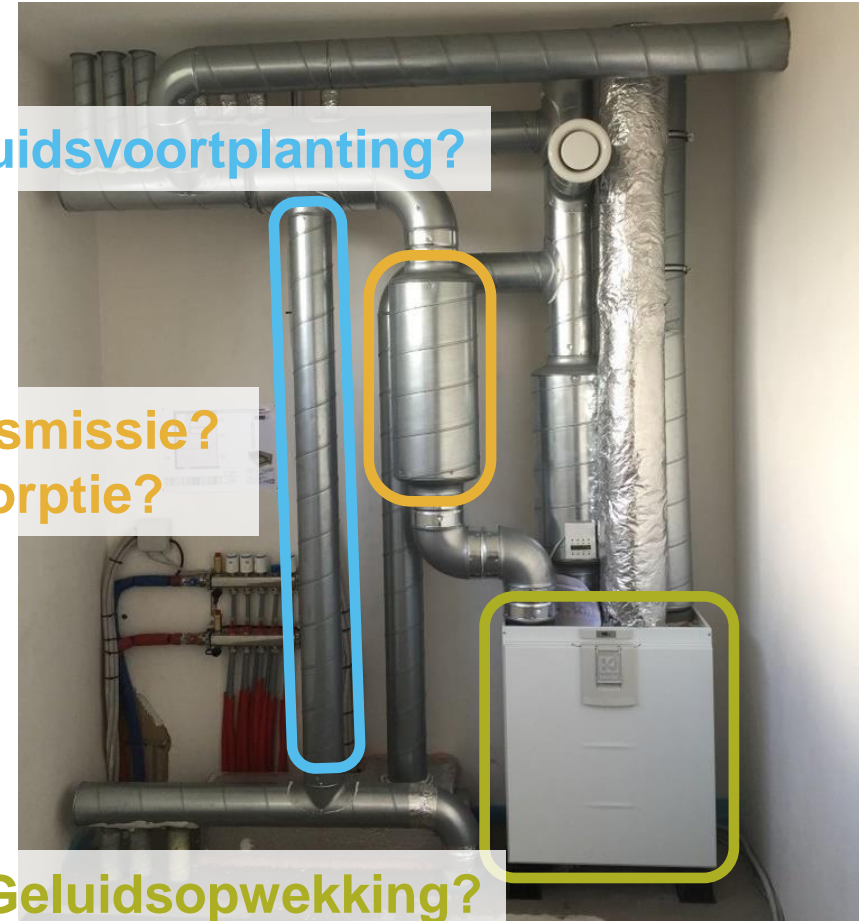


Foto: <https://www.lemmenswarmtepompen.be/projecten>

# Multi-modale technieken



$D \sim 50 \text{ mm}$   
 $f_c \sim 4000 \text{ Hz}$



$D \sim 100 \text{ mm}$   
 $f_c \sim 2000 \text{ Hz}$



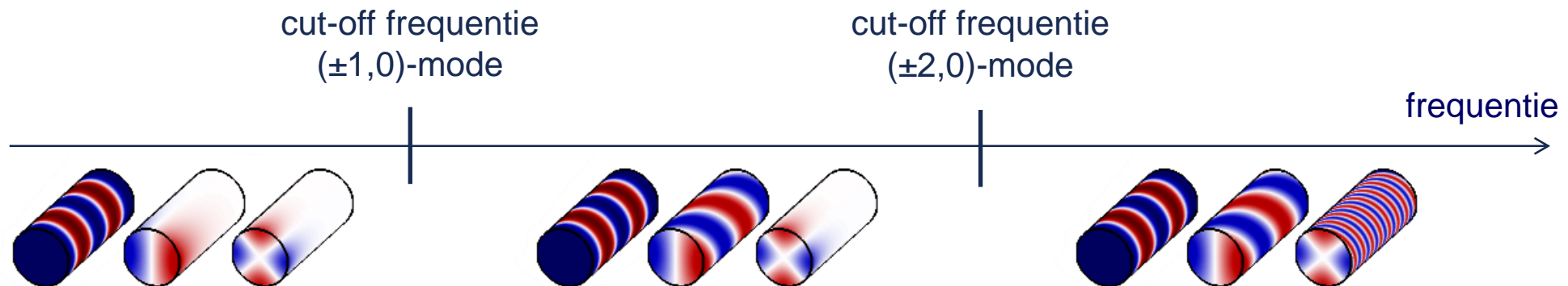
$D \sim 450 \text{ mm}$   
 $f_c \sim 450 \text{ Hz}$

# Multi-modale technieken

- Geluidsdruk in een rechte leiding met constante doorsnede en starre wanden

$$P(x, y, z, \omega) = \sum \Psi_{mn}(x, y) (p_{mn}^+(\omega) e^{-jk_{mn}^+ z} + p_{mn}^-(\omega) e^{jk_{mn}^- z})$$

= som van  $N$  stroomopwaarts propagerende “*cut-on*” modes,  
 $N$  stroomafwaarts propagerende “*cut-on*” modes en  
een  $\infty$  aantal gedempte “*cut-off*” modes



# Modale decompositie

- Geluidsdruk in een rechte leiding met constante doorsnede en starre wanden

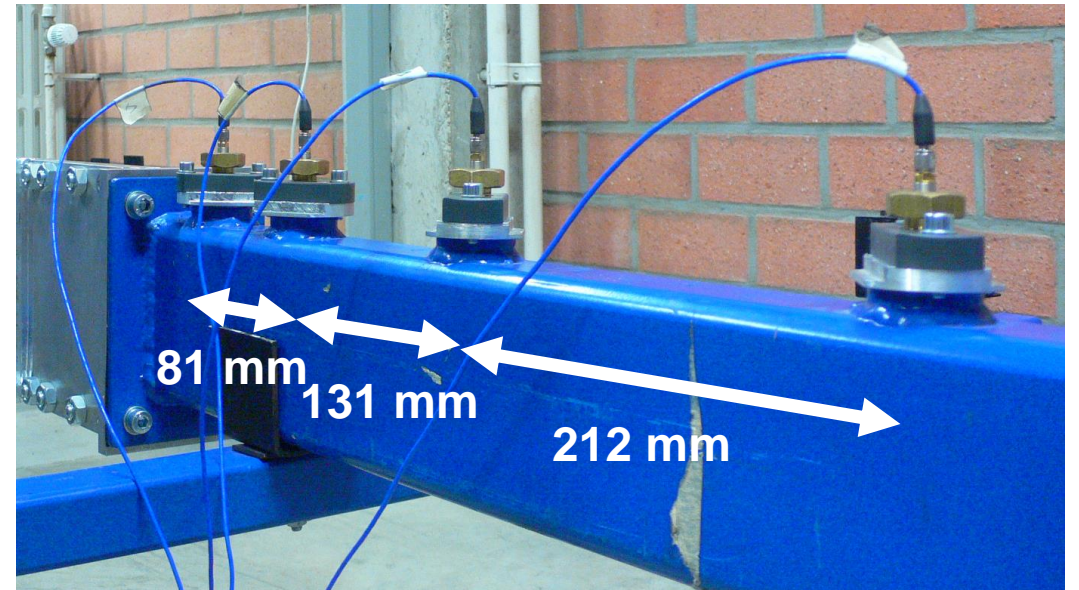
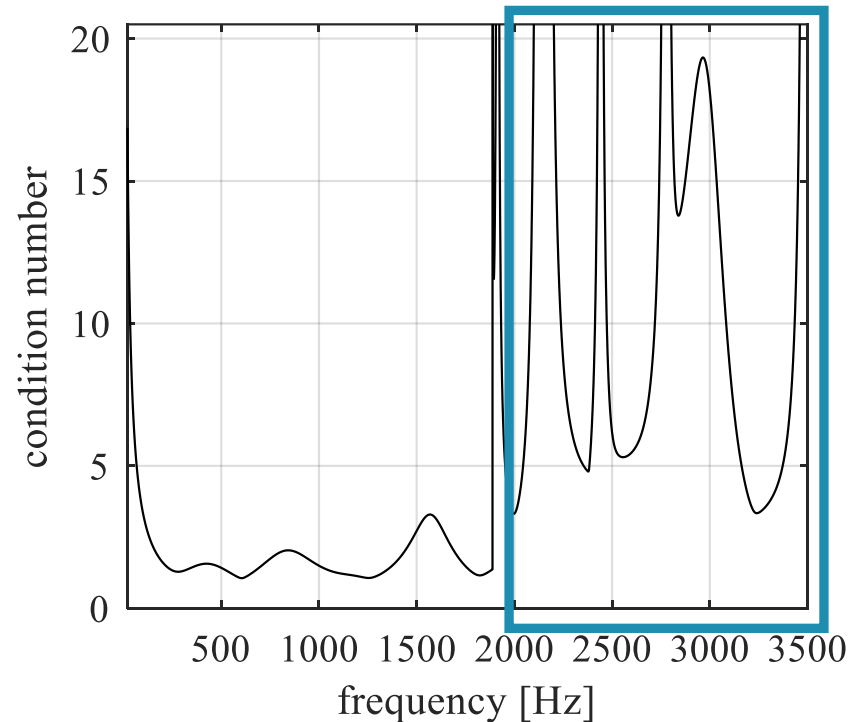
$$P(x, y, z, \omega) = [\Psi^+(x, y, z) \quad \Psi^-(x, y, z)] \begin{bmatrix} \mathbf{p}^+(\omega) \\ \mathbf{p}^-(\omega) \end{bmatrix}$$

- **Modale decompositie:** bepalen van de  $2N$  onbekende modale amplitudes met behulp van  $n \geq 2N$  microfoons (*“multiple microphone method”*)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}^+(\omega) \\ \mathbf{p}^-(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi^+(x_1, y_1, z_1) & \Psi^-(x_1, y_1, z_1) \\ \vdots & \vdots \\ \Psi^+(x_n, y_n, z_n) & \Psi^-(x_n, y_n, z_n) \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} P(x_1, y_1, z_1, \omega) \\ \vdots \\ P(x_n, y_n, z_n, \omega) \end{bmatrix}$$

# Modale decompositie

## Conditiegetal van de modale matrix



Rechthoekige doorsnede 90 mm x 40 mm

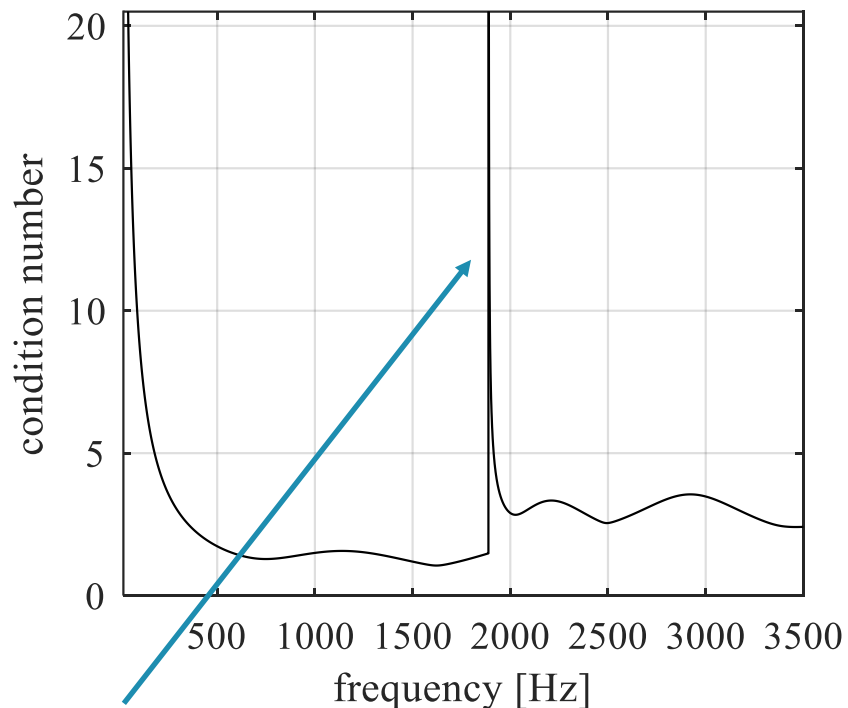
→  $f_c \approx 1900$  Hz

Alle microfoons op één zijwand → onderscheid tussen modes enkel op basis van het verschil in axiaal golfgetal

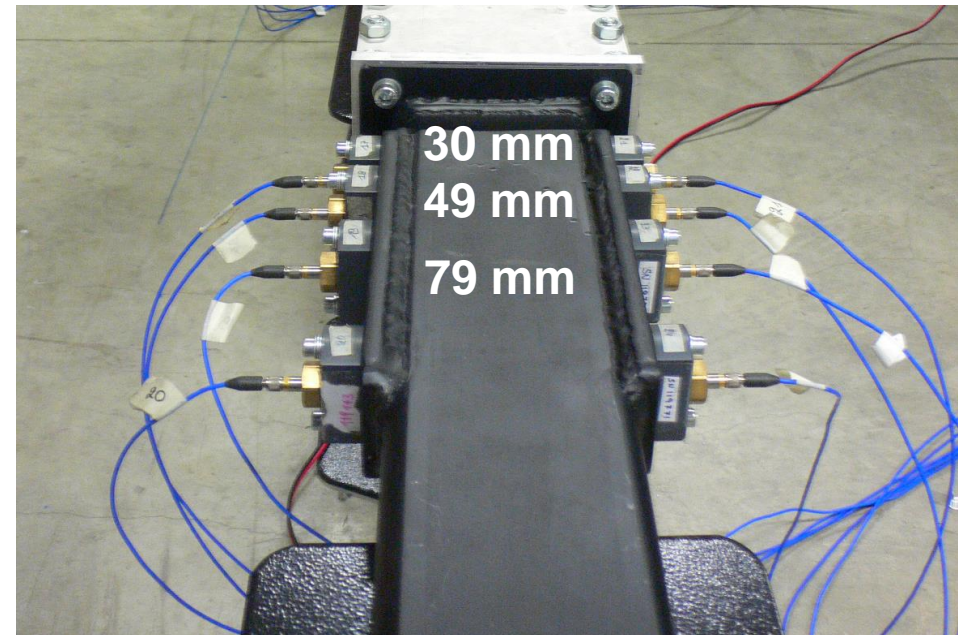


# Modale decompositie

## Conditiegetal van de modale matrix



**onvermijdbare singulariteit  
bij elke cut-off frequentie**

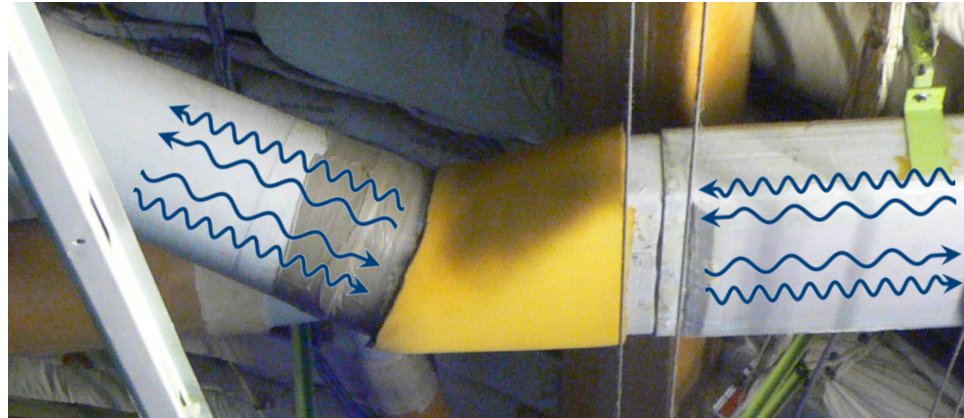


Rechthoekige doorsnede 90 mm x 40 mm  
→  $f_c \approx 1900$  Hz

# Multi-poort modellen van leidingcomponenten

- Component tussen rechte inlaat- en uitlaatleiding met starre wanden ( $f > f_c^{(0,0)}$ )

**inlaatleiding:** geluidsveld  
bepaald door  $\mathbf{p}_i^+$  en  $\mathbf{p}_i^-$



**uitlaatleiding:** geluidsveld  
bepaald door  $\mathbf{p}_o^+$  en  $\mathbf{p}_o^-$

- **Multi-poort model** van een leidingcomponent
  - lineair en tijdsinvariant systeem
  - matrix relatie in het frequentiedomein

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_o^+ \\ \mathbf{p}_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^+ & \mathbf{R}^+ \\ \mathbf{R}^- & \mathbf{T}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_i^+ \\ \mathbf{p}_o^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{p}_s^+ \\ \mathbf{p}_s^- \end{bmatrix}$$



# Multi-poort karakterisatie

- **Passieve multi-poort karakterisatie**

- dominante en ongecorreleerde externe (luidspreker) excitatie

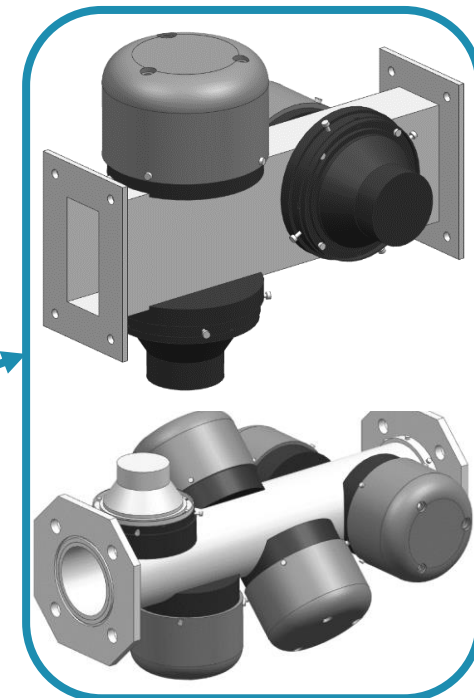
$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_o^+ \\ \mathbf{p}_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^+ & \mathbf{R}^+ \\ \mathbf{R}^- & \mathbf{T}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_i^+ \\ \mathbf{p}_o^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{p}_s^+ \\ \mathbf{p}_s^- \end{bmatrix}$$

- $n \geq 2N$  metingen: multiple source en/of multiple load method

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}^+ & \mathbf{R}^+ \\ \mathbf{R}^- & \mathbf{T}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{o,1}^+ & \mathbf{p}_{o,2}^+ & \cdots & \mathbf{p}_{o,n}^+ \\ \mathbf{p}_{i,1}^- & \mathbf{p}_{i,2}^- & \cdots & \mathbf{p}_{i,n}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{i,1}^+ & \mathbf{p}_{i,2}^+ & \cdots & \mathbf{p}_{i,n}^+ \\ \mathbf{p}_{o,1}^- & \mathbf{p}_{o,2}^- & \cdots & \mathbf{p}_{o,n}^- \end{bmatrix}^+$$

- **Actieve multi-poort karakterisatie**

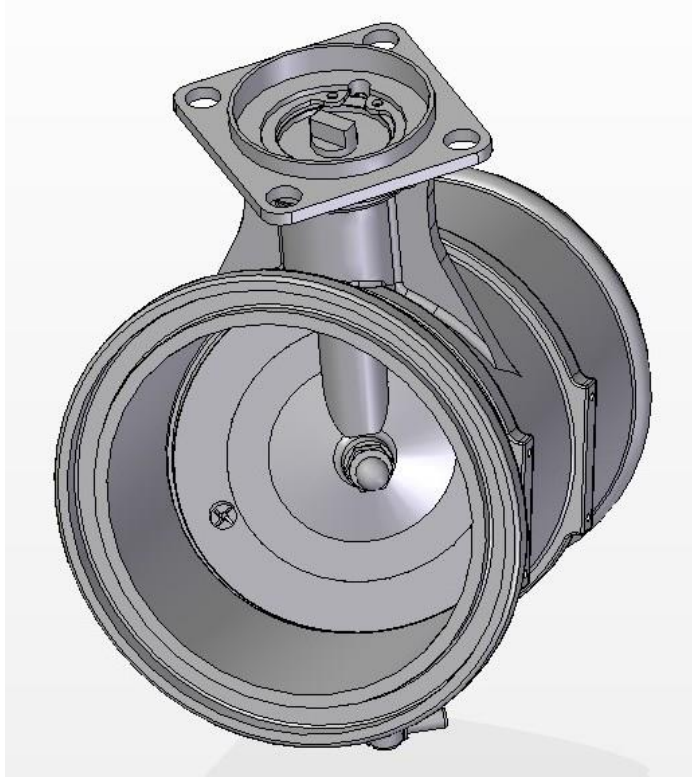
$$\mathbf{G}_s = \mathbf{C}_a \mathbf{G}_{ab} \mathbf{C}_b^H$$



ontwerp van de luidspreker arrays

# Voorbeeld: karakterisatie van een vlinderklep

## Multi-poort karakterisatie van een vlinderklep [1]



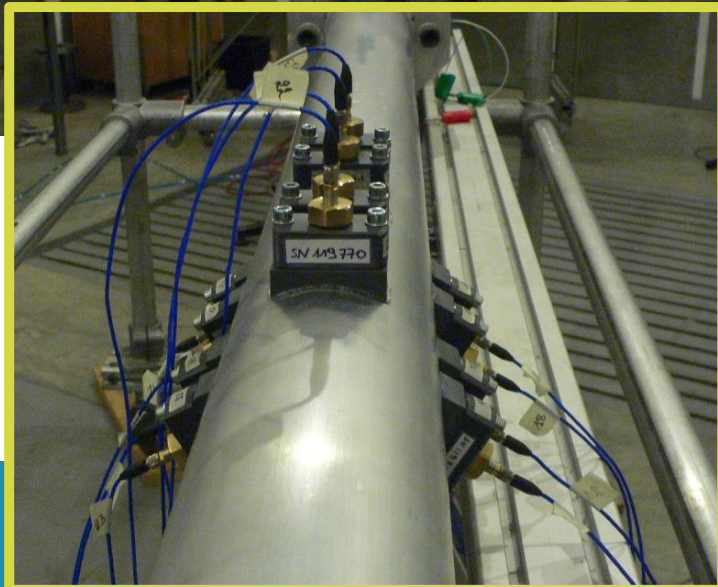
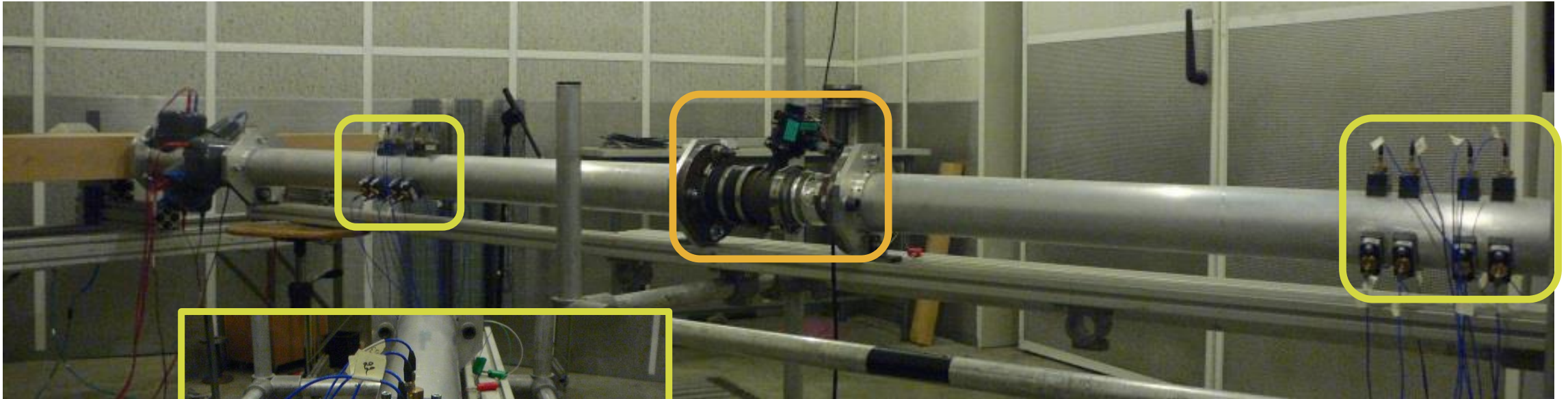
diameter  $D = 84\text{mm}$   
cut-off frequenties ( $M_0 = 0$ ,  $c_0 = 344\text{ m/s}$ )

(0,0)	(1,0)	(2,0)	(0,1)
0 Hz	2400 Hz	3981 Hz	4995 Hz



Integrated Design of Optimal Ventilation Systems for Low Cabin and Ramp Noise

# Testopstelling

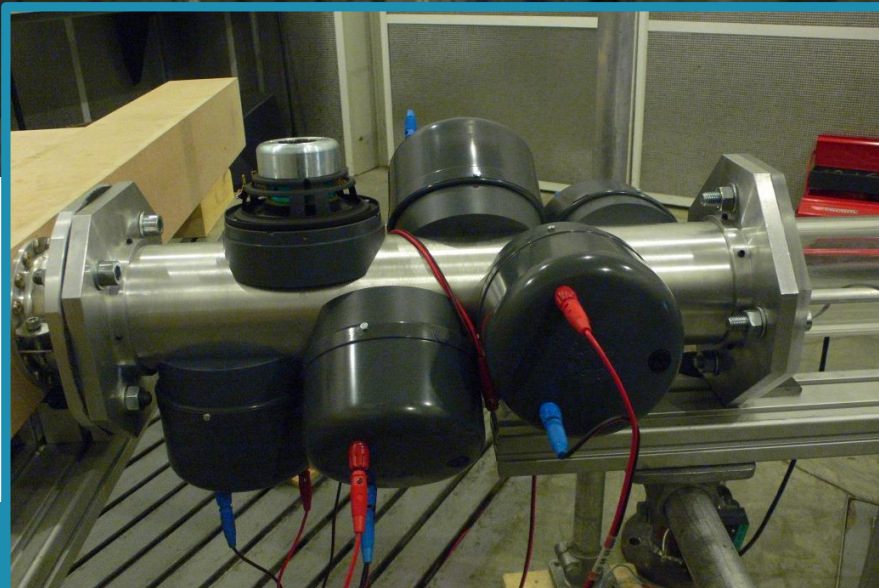
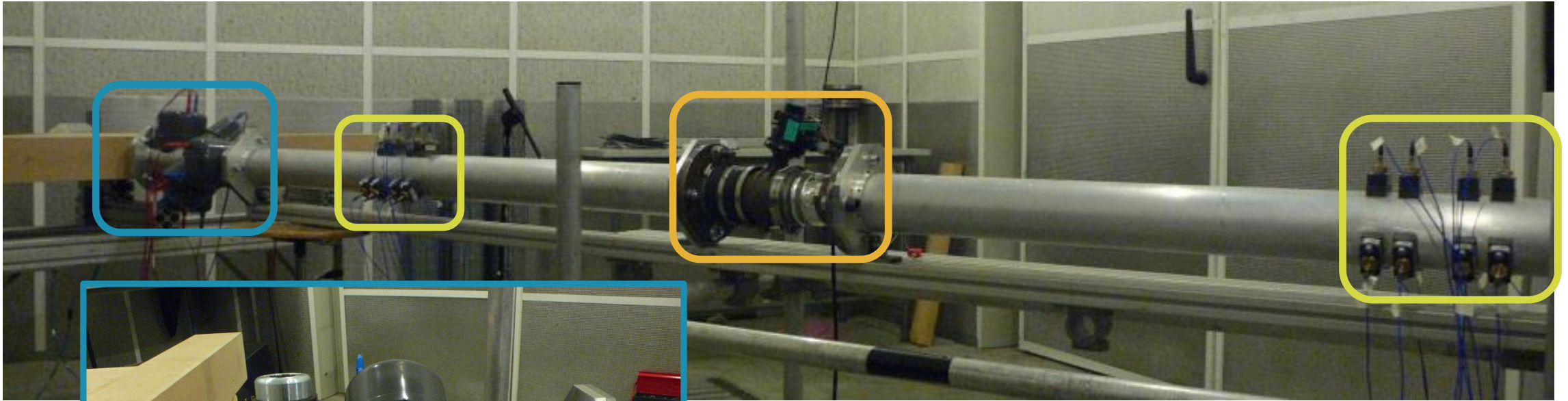


## Microfoon arrays:

- ontworpen voor frequenties tot 3600 Hz
- 3 cut-on modes: vlakke mode (0,0) en 1e spinning modes ( $\pm 1,0$ )
- 12 microfoons (minstens 6 nodig)



# Testopstelling



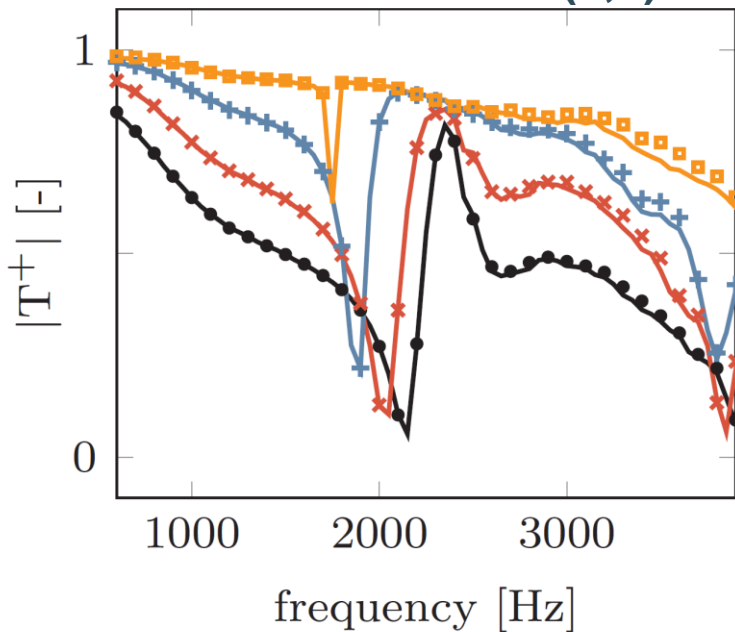
## Luidspreker arrays:

- ontworpen voor frequenties tot 3600 Hz
- 3 cut-on modes: vlakke mode (0,0) en 1e spinning modes ( $\pm 1,0$ )
- 6 luidsprekers rondom de omtrek van de leiding
- stepped sine excitatiesignaal

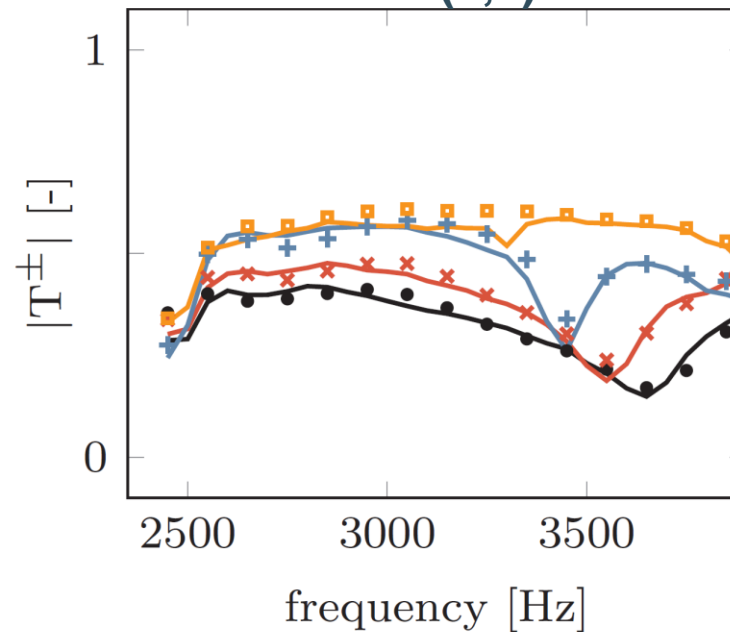
# Multi-poort karakterisatie van een vlinderklep

## Multi-poort karakterisatie van een vlinderklep: transmissie ( $M_0 = 0$ )

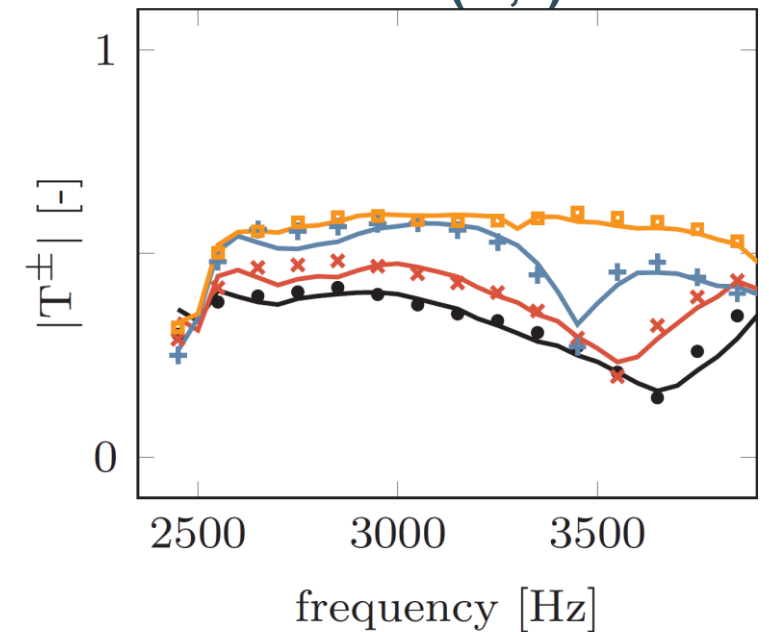
vlakke mode (0,0)



mode (1,0)



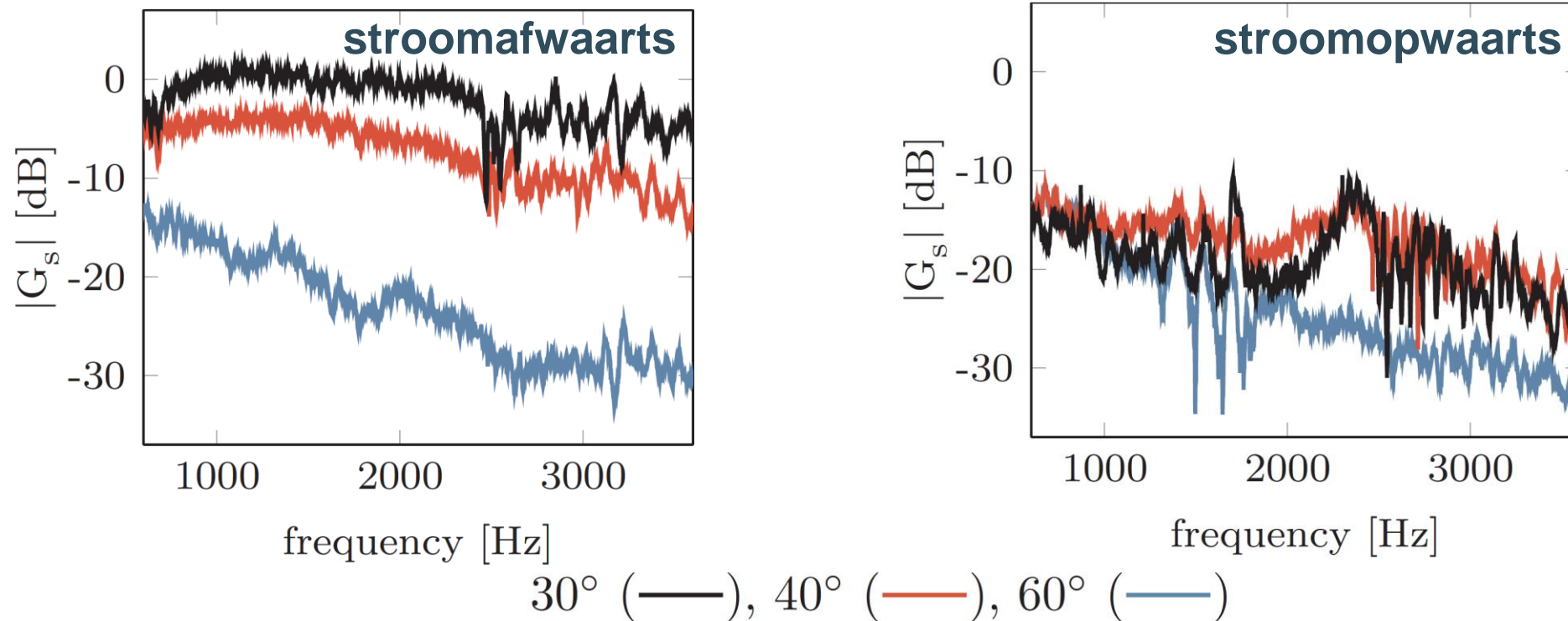
mode (-1,0)



30° (—●—), 40° (—×—), 60° (—+—) and 90° (—□—)

# Multi-poort karakterisatie van een vlinderklep

Actieve multi-poort karakterisatie van een vlinderklep ( $M_0 \approx 0,1$ )  
genormaliseerde bronspectra voor de vlakke mode (0,0)



# Overzicht

1. Vlakke golfdecompositie in leidingen
2. Passieve tweepoortkarakterisatie
3. Actieve tweepoortkarakterisatie
4. Uitbreiding naar hogere frequenties
5. **Conclusie**

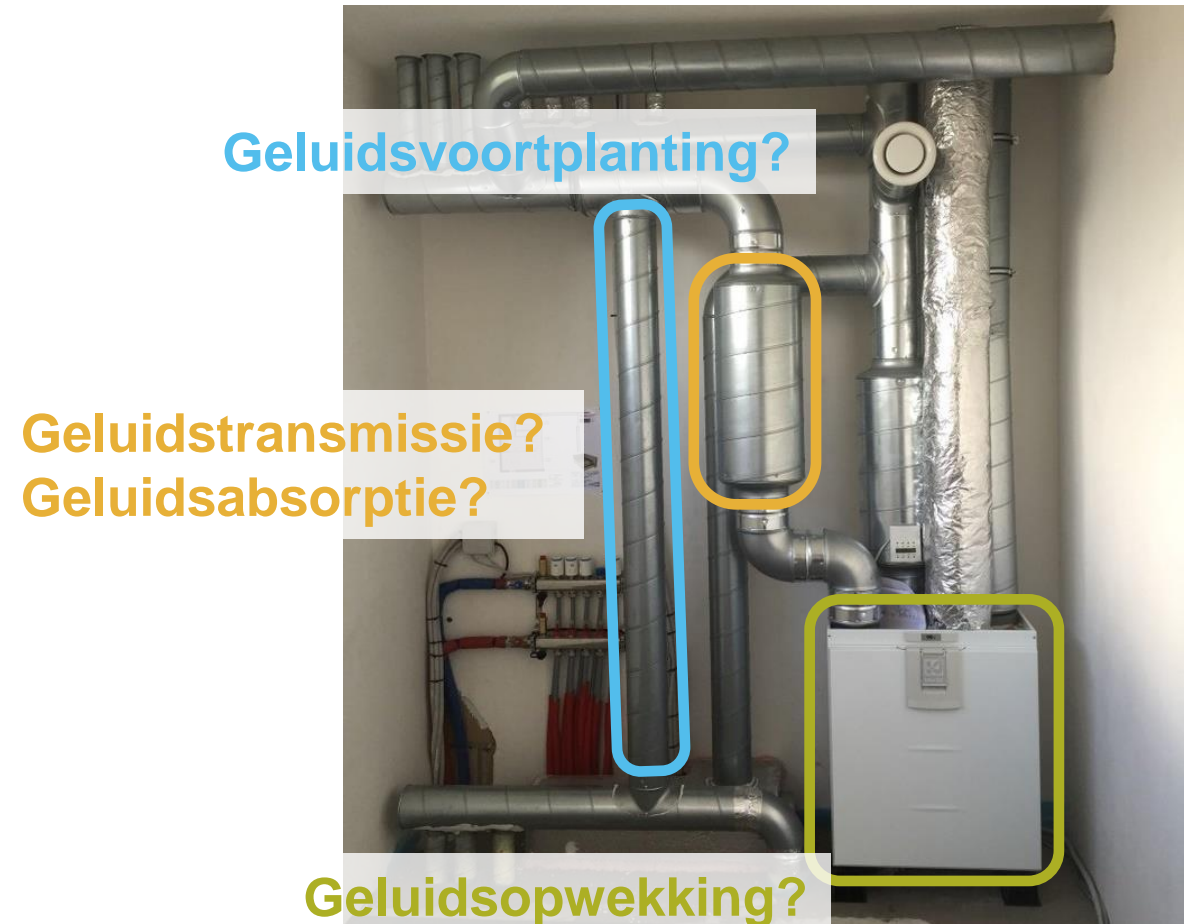


Foto: <https://www.lemmenswarmtepompen.be/projecten>

# Conclusie

- Geluidspropagatie doorheen leidingen
- Vlakke golfdecompositie op basis van microfoonmetingen
- Twee-poort karakterisatie
  - Passief: transmissie, reflectie en absorptie
  - Actief: geluidsofwekking
- Uitbreiding naar hogere frequenties: multimodale technieken





[KU Leuven Noise & Vibration](#)



[kuleuven.mod](#)



[KU Leuven  
noise & vibration research group](#)



[herve.denayer@kuleuven.be](mailto:herve.denayer@kuleuven.be)



[@KULnoisevib](#)



[www.mech.kuleuven.be/mod](http://www.mech.kuleuven.be/mod)



[KU Leuven  
noise & vibration research group](#)

**VACANCIES**

[www.mech.kuleuven.be/mod-joboffers](http://www.mech.kuleuven.be/mod-joboffers)