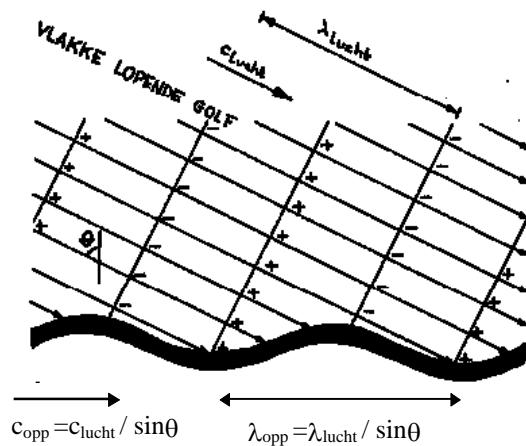


Luchtgeluidisolatie – coïncidentie-effect

Kennisbank Bouwfysica

Auteur: ir. L. Nederlof, prof.ir. J.J.M. Cauberg

Figuur 1 toont sterk uitvergroot hoe het oppervlak van een plaat vervormd wordt door de opeenvolgende golffronten van een invallende, vlakke, lopende golf. Door het voortschrijdende karakter daarvan ontstaat aan het oppervlak van de plaat een gedwongen buiggolf, die zich met een snelheid c_{opp} daarlangs voortplant.



figuur 1. opwekking van gedwongen buiggolf door invallende, vlakke, lopende golf

Beschouwen we een vast punt op het oppervlak, dan is het alsof daar ter plaatse de plaat met een puntbelasting wordt aangestoten. Vanuit zo'n punt planten zich dan vrije, rechte buiggolven door het materiaal voort. Dit type golven treedt eveneens op bij contactgeluid, met als typisch voorbeeld naaldhakken op een stenen vloer.

Voor vrije buiggolven bestaat de golfvergelijking uit een differentiaalvergelijking van de vierde orde. We kunnen hier volstaan met de formule voor de voortplantingssnelheid van vrije, rechte buiggolven:

$$c_{vrij} = \sqrt[4]{\frac{Kd^2 \cdot 4\pi^2 f^2}{12\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

Waarin:

K	dynamische elasticiteitsmodulus $[\text{N/m}^2]$
d	dikte van de plaat $[\text{m}]$
ρ	dichtheid van het plaatmateriaal $[\text{kg/m}^3]$
f	frequentie van de belasting $[\text{Hz}]$

Er treden dus zowel gedwongen als vrije buiggolven in de plaat op, die zich elk met een eigen snelheid voortplanten. Indien nu beide snelheden aan elkaar gelijk zijn, en de bijbehorende vervormingen steeds samenkomen, spreekt men van coïncidentie. Naar de aard van dit verschijnsel kunnen we daarbij een aanzienlijke vermindering van de geluidisolatie verwachten.

De coïncidentievoorwaarde luidt dus $c_{vrij} = c_{opp} = c_{lucht} / \sin(\theta)$ en aangezien $c_{lucht} \approx 340 \text{ m/s}$ kunnen we uit formule (1) afleiden bij welke frequentie coïncidentie optreedt:

Coïncidentiefrequentie:

$$f_c = \frac{64 \cdot 10^3}{(\sin^2 \theta) \cdot d \sqrt{K / \rho}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

Bij loodrechte inval ($\theta = 0^\circ$) zal géén coïncidentie waargenomen worden ($f_c \rightarrow \infty$). De laagste frequentie waarbij nog coïncidentie op kan treden, ligt bij $\theta = 90^\circ$ en is de

Grensfrequentie:

$$f_{\text{grens}} = \frac{64 \cdot 10^3}{d \sqrt{K / \rho}} \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

Onder de grensfrequentie kan dus eveneens géén coïncidentie optreden. Daarbij moet wel bedacht worden, dat de coïncidentievoorwaarde een limietsituatie vertegenwoordigt, zodat we in werkelijkheid al enig effect kunnen verwachten in het frequentiegebied onder f_{grens} .

Een typisch praktijkgeval van coïncidentie kan optreden bij hoogbouw langs een verkeersweg: op hogere verdiepingen kan de invalshoek van het geluid op een gevel zodanig zijn, dat precies aan de coïncidentievoorwaarde wordt voldaan (zie figuur 2a+b).

Tabel 1 geeft de grensfrequentie voor onder andere de plaatconstructies van figuur 2 (module A-16; "Luchtgeluidisolatie – massawetten voor enkelbladige constructies"); het coïncidentiegebied blijkt nu overeen te komen met het gebied, waar de isolatiecurve in toenemende mate afwijkt van de theoretische massawet.

	d [mm]	ρ [kg/m ³]	K [N/m ²]	f_{grens} [Hz]
staalplaat	3,5	7800	$210 \cdot 10^9$	3500
spaanplaat	36	650	$3 \cdot 10^9$	800
spiegelglas	6	2500	$70 \cdot 10^9$	2000
betonplaat	100	2000	$20 \cdot 10^9$	200

tabel 1. grensfrequentie (afgerond) bij enkele plaatvormige constructies

De ernst van het coïncidentie-effect hangt natuurlijk nauw samen met de mate waarin buiggolven uitdempen in een constructie. Dit wordt uitgedrukt in een *verliesfactor voor buiggolven* η , die voor een bepaalde frequentie f kan worden afgeleid uit de (gemeten) mechanische nagalmtijd T_{mech} van een constructie volgens:

$$\eta = \frac{2,2 \cdot T_{\text{mech}}}{f} \quad (\text{met } 0 \leq \eta \leq 1) \quad (4)$$

In η worden alle dempingsmechanismen meegenomen, te weten:

- demping van buiggolven in het materiaal zelf (wrijvingsverliezen);
- inklemming aan de randen (randverliezen);
- geluidafstraling naar de omgeving (impedantie verliezen).

Hierdoor is η ook geen materiaalconstante, maar een constructie-eigenschap; die dan ook beïnvloed wordt door de wijze van uitvoering. Voor een bepaald type constructie kan weliswaar met een gemiddelde η gerêkend worden, maar een gemeten isolatiecurve zal onherroepelijk de spreiding in η weerspiegelen.

De grootte van η ligt meestal in orde van één of enkele procenten.

Hier wordt volstaan met het vermelden van de transmissiecoëfficiënt (t) als de gekwadraterde modulus van de complexe overdrachtsfunctie, waarbij:

$$\frac{1}{t} = \left| 1 + j \frac{\pi f m \cdot \cos \theta}{\rho c} \left[1 - (1 + j\eta) \frac{f^2}{f_{\text{grens}}^2} \sin^4 \theta \right] \right|^2 \quad (5)$$

Voor voldoende lage frequenties ($f \ll f_{\text{grens}}$) gaat formule (5) vrijwel over in formule (6) (module A-16; "Luchtgeluidisolatie – massawetten voor enkelbladige constructies") en lijkt de theoretische massawet dus wel degelijk adequaat; ook bij alzijdige inval.

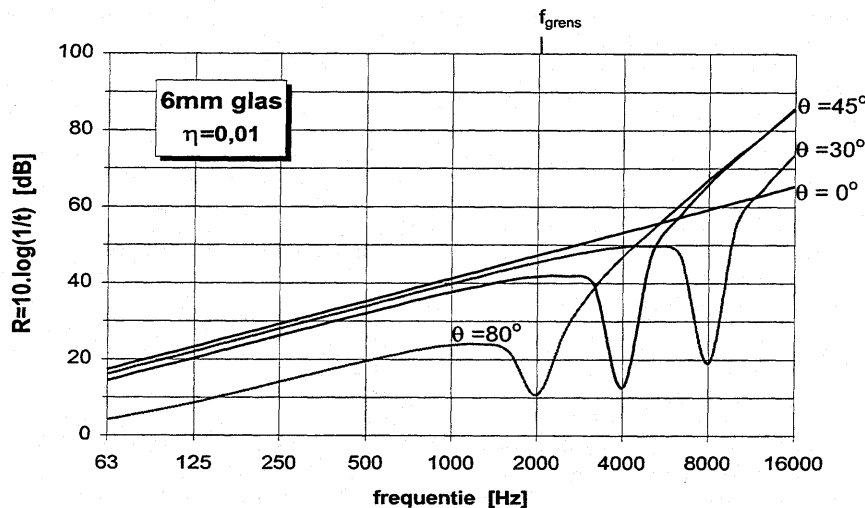
Bij de coïncidentiefrequentie ($f = f_c = f_{\text{grens}} / \sin^2 \theta$) vinden we uit formule (5):

$$\frac{1}{t_c} = \left| 1 + \frac{\pi f_c m \cdot \cos \theta}{\rho c} \cdot \eta \right|^2 \quad (6)$$

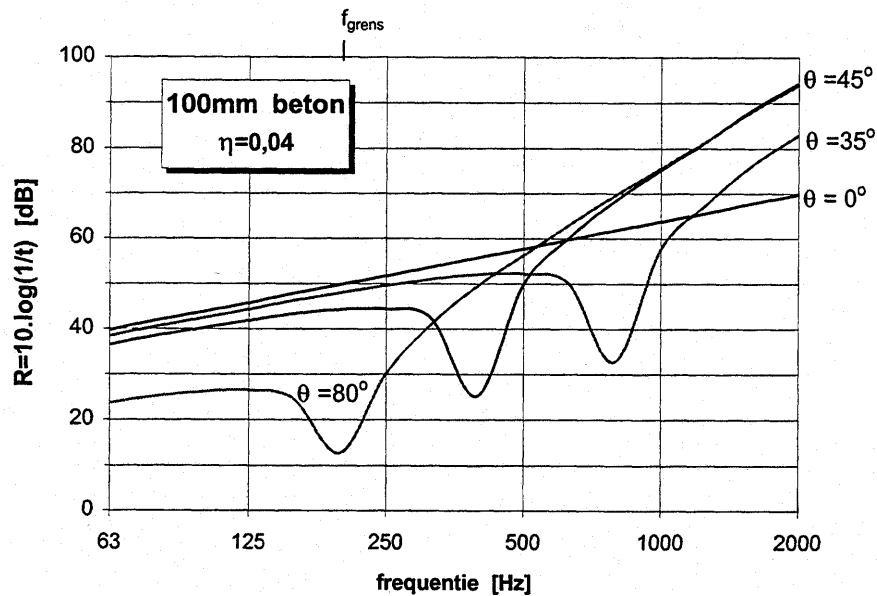
zodat ten opzichte van de theoretische massawet de geluidisolatie bij coïncidentie circa $20 \cdot \log \eta$ lager uitkomt. Als er geen dempingsverliezen zijn ($\eta = 0$), zakt de geluidisolatie in dat geval zelfs terug tot 0 dB.

Figuur 2a brengt het verloop van de isolatiecurve in beeld op basis van formule (5) voor een oneindig uitgestrekte glasplaat van 6mm dikte. De coïncidentie-dip bedraagt hier globaal $20 \cdot \log(0,01) = 40$ dB. Bij eindige platen zullen ook de randverliezen een rol gaan spelen, η navenant groter worden en het isolatieverlies geringer.

In figuur 2b is de situatie weergegeven bij een betonplaat van 100mm: het isolatieverlies door coïncidentie treedt nu op bij veel lagere frequenties en valt midden in het frequentiespectrum van verkeerslawaai.



figuur 2a. coïncidentie-effect bij 6mm glas voor diverse invalshoeken



figuur 2b. coincidentie-effect bij 100mm beton voor diverse invalshoeken

De grafieken van figuur 2 mogen niet verkeerd geïnterpreteerd worden: coincidentie verdwijnt niet met een afnemende invalshoek, maar verschuift naar hogere frequenties.

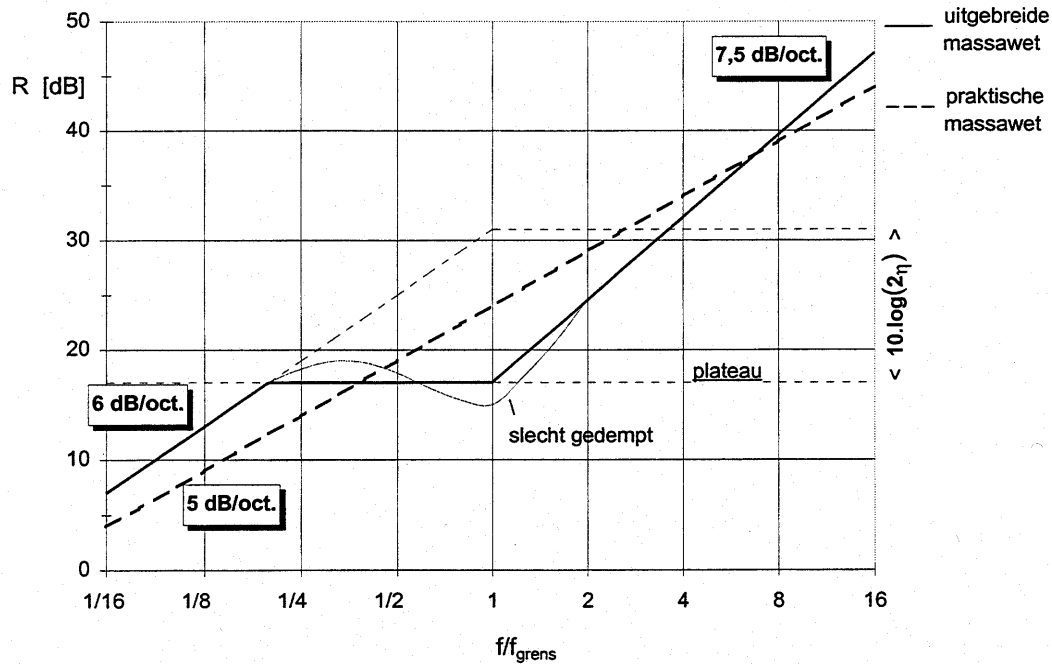
Men moet zich ook niet blind staren op het feit, dat voor één specifieke hoek van inval de isolatiecurve zich bij hogere frequenties herstelt en zelfs boven de theoretische massawet voor loodrechte inval ($\theta=0^\circ$) uitkomt.

De geringe isolatie bij $f < f_{\text{grens}}$ en grotere invalshoek (zie $\theta=80^\circ$ in figuur 1; module A-16; “Luchtgeluidisolatie – massawetten voor enkelbladige constructies”) is conform de voorspelling van formule (6; dezelfde module). Dit effect van de invalshoek zet zich voort bij $f > f_{\text{grens}}$ en de hoogst liggende curve wordt ongeveer bereikt voor $\theta \approx 60^\circ$.

In de praktijk hebben we meestal te maken met alzijdig invallend geluid en een breed spectrum van frequenties, zodat er een heel gamma aan coincidenties mogelijk is.

Een gemeten isolatiecurve laat het resulterend effect hiervan zien en dat wordt in hoge mate bepaald door de zwakste schakel: die combinaties van invalshoek en frequentie uit het aangeboden geluid, die juist wel aan de coincidentievoorwaarde voldoen.

Als gevolg hiervan verloopt de isolatiecurve voor alzijdig invallend geluid vanaf de grensfrequentie effectief met circa 7,5 dB/octaaf; veel lager dus dan in figuur 2 is te zien, namelijk 18 dB/octaaf volgens formule (5).



figuur 3. verloop van de isolatiecurve bij alzijdige inval en massa $m \leq 70 \text{ kg/m}^2$ voor $m > 70 \text{ kg/m}^2$ schuift het horizontale plateau $20 \cdot \log(m/70)$ omhoog

De isolatiecurve voor alzijdig invallend geluid kan nu op de hierna volgende wijze worden benaderd, korthedshalve aan te duiden als de uitgebreide massawet:

- laagfrequentgebied voor $f \ll f_{\text{grens}}$
hier geldt de theoretische massawet voor alzijdige inval, zodat:

$$R_{\text{LF}} = R_{\perp} - 5 = 20 \log m + 20 \log \frac{f}{500} + 7 \tag{6a}$$
- plateaugebied, globaal beginnend bij $f_{\text{grens}} \sqrt{2\eta}$ met een horizontaal verloop:

$$R_{\text{PL}} = R_{\perp}(f_{\text{grens}}) - 5 + 10 \log(2\eta) \tag{6b}$$

Het plateau begint dus al beneden f_{grens} , waar echte coincidentie nog niet op kan treden, maar de buiggolven al wel een rol spelen. Bij slechte demping zullen de isolatiewaarden enigszins om R_{PL} heen slingeren.

hoogfrequentgebied $f \gg f_{\text{grens}}$ met asymptotische benadering volgens:

$$R_{\text{HF}} = R_{\perp}(f_{\text{grens}}) - 5 + 10 \log(2\eta) + 25 \log \frac{f}{f_{\text{grens}}} \tag{6c}$$

voor massa's boven 70 kg/m^2 wordt het plateau gecorrigeerd (opgetild) tot:

$$R_{\text{PL}}^* = R_{\text{PL}} + 20 \log \frac{m}{70} \tag{6d}$$

Het horizontale deel schuift ook iets naar rechts, omdat de LF-benadering iets langer doorloopt en de HF-asymptoot wat verder voorbij f_{grens} bereikt wordt.

Figuur 3 brengt het voorgaande in beeld voor een massa van 70 kg/m^2 , met ter vergelijking de praktische massawet. Hieruit blijkt dat de laatste globaal overeenkomt met een lineaire regressie over het totale frequentiegebied, waarbij de verliesfactor η min of meer wordt weggemoffeld.