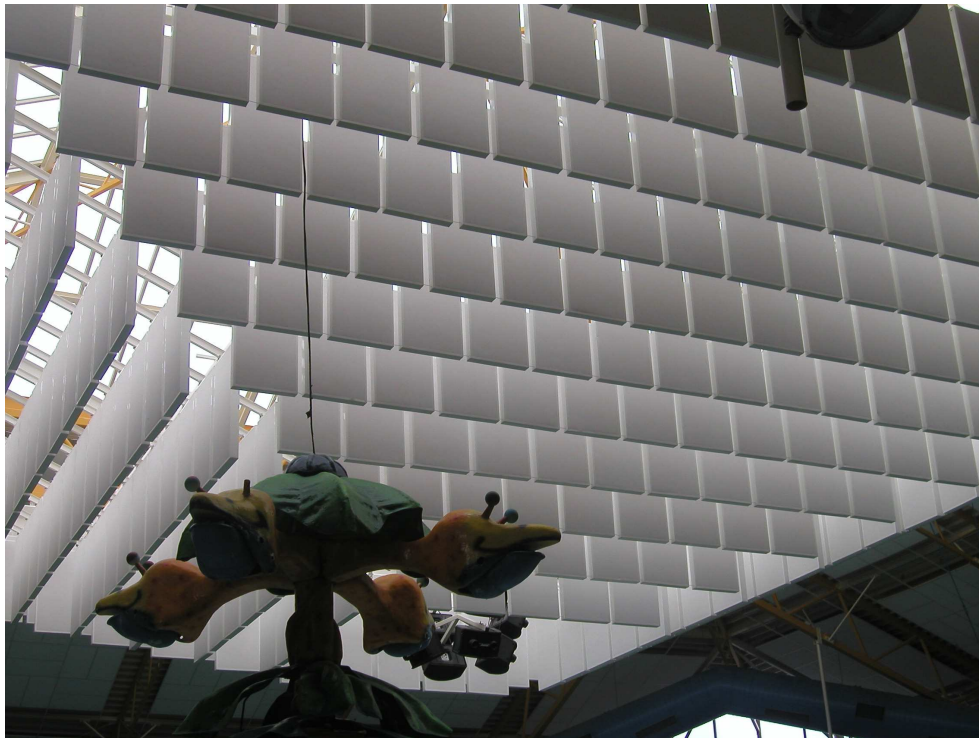


Post HBO Bouwfysica: Geluid 1



Deel B:
Geluid en Constructie

2009
Ir. C.C.J.M. Hak

Bron: Dictaat 7S200 "Bouwfysisch Ontwerpen 2" TU/e fac B

Inhoudsopgave

Geluid en constructie 5

1. Geluidabsorptie	5
1.1 Definitie	5
1.2. Nagalmtijd	6
1.3. Meetmethoden voor α	7
1.3.1. Interferometermethode	7
1.3.2. Nagalmmethode	7
1.4. Typen absorberende constructies	8
1.4.1. Poreuze materialen	8
1.4.2. Resonerende panelen	10
1.4.3. Resonatoren en geperforeerde panelen	13
1.4.4. Overige absorbentia	15
1.5. Geluidabsorptie en geluiddrukkniveau	16
2. Geluidisolatie	17
2.1. Inleiding	17
2.2. Wat is luchtgeluidisolatie	19
2.2.1. Definitie	19
2.2.2. De luchtgeluidisolatie van samengestelde constructies	19
2.3. Meetmethoden voor luchtgeluidisolatie	20
2.3.1. Laboratoriummetingen	20
2.3.2. Praktijkmetingen	22
2.4. Enkelvoudige, homogene constructies	23
2.4.1. Theoretische massawet	23
2.4.2. Praktische massawet	24
2.4.3. Coïncidentie-effect	24
2.4.4. Staande golven	25
2.4.5. Lopende buiggolven	25
2.4.6. Coïncidentie	26
2.4.7. Drie-stappen-model	28
2.5. Dubbele constructies	30
2.6. Flankerende overdracht	31
3. Ontwerpen met geluid	33
3.1. Toepassing van absorptiematerialen	33
3.1.1. Geluidreductie in een ruimte	33
3.1.2. Geluiddemping in ventilatiekanalen	34
3.1.3. Echo-onderdrukking	34
3.1.4. nagalmtijdverkorting	35
3.2. Niet-akoestische eigenschappen van absorptiematerialen	35
3.3. Praktische geluidwering	35
3.3.1. Bescherming tegen geluid van buiten	36
3.3.2. Geluidwering tussen ruimten	36
3.3.3. Bescherming tegen geluid van installaties	37

Literatuur 39

Geluid en Constructie

1. Geluidabsorptie

1.1. Definitie

Als een geluidsgolf op een constructie valt, zal deze geheel of gedeeltelijk worden teruggekaatst (gereflecteerd), doorgelaten of geabsorbeerd (fig. 4.1.). In het laatste geval wordt de energie van de trillende luchtdeeltjes gedeeltelijk omgezet in warmte, meestal ten gevolge van wrijving (dissipatie). De op de constructie invallende geluidintensiteit I_i , vermogen per oppervlakte-eenheid, wordt aldus opgesplitst in een gereflecteerde intensiteit I_r , een doorgelaten intensiteit I_t en een gedissipeerde intensiteit I_δ . Op grond van de wet van behoud van energie zal altijd moeten gelden:

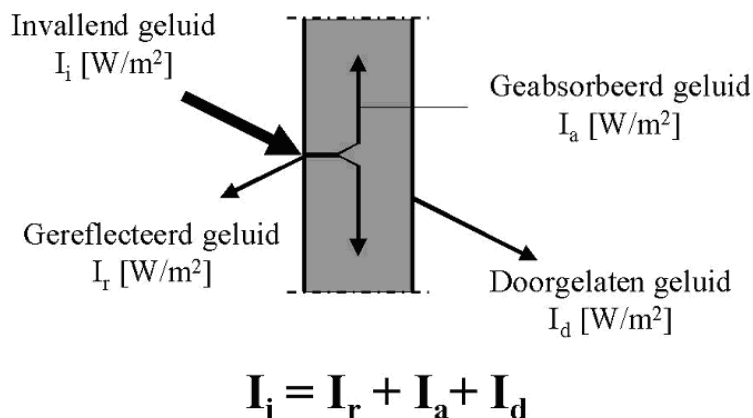
$$I_i = I_r + I_t + I_\delta \quad (4-1)$$

Deling van linker- en rechterlid door I_i resulteert in:

$$\rho + \tau + \delta = 1 \quad (4-2)$$

waarin:

ρ	-	I_r/I_i = de reflectiecoëfficiënt	[-]
τ	-	I_t/I_i = de transmissiecoëfficiënt	[-]
δ	-	I_δ/I_i = de dissipatiecoëfficiënt	[-]



Figuur 4.1. Verdeling van het geluid dat op een constructie invalt.

De doorlatingscoëfficiënt is reciproom een maat voor de geluidisolatie. Reeds bij vrij eenvoudige, weliswaar (lucht)dichte materialen of constructies bedraagt de doorgelaten intensiteitsfractie τ nauwelijks meer dan 0,01 (1 %). In praktische situaties zijn we, wanneer we ons in dezelfde ruimte bevinden als de betreffende geluidbron, meestal alleen geïnteresseerd in het geluid dat uit de ruimte verdwijnt, d.w.z. het gedissipeerde en het doorgelaten deel. Vaak spreken we van absorptie, terwijl we de som van dissipatie en transmissie bedoelen. Zo is de **geluidabsorptiecoëfficiënt** α gedefinieerd als:

$$\alpha = \tau + \delta \quad (4-3)$$

De **absorptiecoëfficiënt** α is de frequentieafhankelijke constructie-eigenschap die aangeeft welk deel van het invallende geluid niet wordt gereflecteerd.

Bij benadering geldt:

$$\alpha \approx \delta \quad (4-4)$$

omdat τ klein is. Er mag dan ook worden aangehouden dat $\alpha + \rho = 1$, of in woorden uitgedrukt: het gedeelte van de op een constructie invallende energie dat niet wordt gereflecteerd, wordt geabsorbeerd en verdwijnt als het ware uit de ruimte: $\alpha = 1 - \rho$.

Alle genoemde coëfficiënten zijn frequentie-afhankelijk, terwijl ook de invalshoek van het geluid van invloed is. Zo heeft α een lagere waarde voor loodrecht invallend geluid. Om materialen te karakteriseren wordt α in het algemeen opgegeven voor de middenfrequenties van de octaafbanden van 125 tot 4000 Hz, met een specifieke invalshoek van het geluid: loodrecht of alzijdig. Juist omdat α , al naar gelang het type constructie, zeer sterk afhangt van de frequentie, moet men steeds over de volledige gegevens kunnen beschikken. Wanneer van een constructie vermeld wordt, dat $\alpha = 0,80$ of $0,90$ zonder verdere toevoegingen, dan is dat in feite te weinig informatie. Soms kan worden afgeleid dat bedoeld wordt op α bij 1000 Hz. Het is echter ook denkbaar dat de **Noise Reduction Coefficient** (NRC) wordt bedoeld; deze is het gemiddelde van de absorptiecoëfficiënten in de frequentiebanden 250, 500, 1000 en 2000 Hz. Dit laatste is zeer waarschijnlijk wanneer de materiaalgegevens zijn ontleend aan Amerikaanse literatuur. Een laatste mogelijkheid is, dat fabrikant of leverancier gewoon de hoogste waarde in de absorptie karakteristiek bij documentatie hanteert.

De **Noise Reduction Coefficient** is het gemiddelde van de absorptiecoëfficiënten in de frequentiebanden 250, 500, 1000 en 2000 Hz.

1.2. Nagalmtijd

Bij een gegeven constructie met oppervlakte S (m^2) en absorptiecoëfficiënt α en transmissiecoëfficiënt τ kunnen we het volgende opmerken als er een geluidsgolf met intensiteit I_i invalt:

- het invallende geluidvermogen W_i is:

$$W_i = I_i S \quad (4-5)$$

- het geabsorbeerde vermogen W_a is:

$$W_a = I_a S = \alpha I_i S \quad (4-6)$$

- het doorgelaten geluidvermogen W_τ :

$$W_\tau = I_\tau S = \tau I_i S \quad (4-7)$$

Een constructie van 10 m^2 met $\alpha = 0,5$ absorbeert evenveel geluidvermogen als een constructie met oppervlakte 20 m^2 en $\alpha = 0,25$. Het product αS heet het equivalente geluidabsorberende oppervlak A . Dit wordt vaak uitgedrukt in m^2 open raam.

Wanneer een vlakke lopende geluidsgolf met intensiteit I_0 door een ruimte reist, wordt hij meerdere keren weerkaatst. Bij elke reflectie treedt ten gevolge van geluidabsorptie energieverlies op.

De tijd tussen twee opeenvolgende reflecties hangt naast de voortplantingssnelheid van het geluid af van de gemiddelde afstand tussen twee reflectiepunten op de ruimteomhulling en dus van de afmetingen van de ruimte: de intensiteit van een (reizende) geluidsgolf, en dus ook de geluidsdruk neemt in een grote ruimte minder snel af dan in een kleine ruimte met dezelfde wandafwerking. De grote ruimte galmt langer na. We drukken dit uit in de **nagalmtijd** T van de ruimte: de tijd die verstrijkt met een daling van het geluidsdruk niveau van 60 dB na uitschakeling

De **nagalmtijd** is de frequentieafhankelijke parameter die de verstreken tijd aangeeft met een daling van 60 dB na uitschakeling van de geluidbron.

van de geluidbron.

1.3. Meetmethoden voor α

Door middel van genormaliseerde metingen is het mogelijk α te bepalen. Hiervoor staan meerdere methoden ter beschikking, waarvan twee het meest worden toegepast:

- de interferometermethode, voor het bepalen van α bij loodrechte (= normale) inval;
- de nagalmmethode, ter bepaling van de absorptiecoëfficiënt bij alzijdige inval.

Ter onderscheiding wordt α bij normale inval ook wel aangegeven met α_0 en bij alzijdige inval met α_s (s van Sabine).

1.3.1. Interferometermethode

Een interferometer, ook wel buis van Kundt genoemd (fig. 4.2.), is een van binnen gladde, zware buis die aan een zijde is afgesloten met een luidspreker. In de buis wordt een monster van het te onderzoeken materiaal aangebracht (poreus materiaal). Via de luidspreker wordt een vlakke lopende golf met één frequentie opgewekt, die door het materiaal verzwakt wordt teruggekaatst. Invallende en gereflecteerde golf vormen samen een staande golf met maxima ($p_{\max}$) en minima ($p_{\min}$) in de geluiddruk. De sterkte van deze uitersten kan worden gemeten met een in de buis beweegbare microfoon. Uit de gemeten waarden kan de absorptiecoëfficiënt bij de gegeven toonhoogte (frequentie van de zuivere toon) worden berekend:

$$\alpha_0 = 1 - \left[\frac{\frac{p_{\max}}{p_{\min}} - 1}{\frac{p_{\max}}{p_{\min}} + 1} \right]^2 \quad (4-8)$$



Figuur 4.2. Interferometer (Buis van Kundt) om de geluidabsorptie van poreuze materialen te bepalen.

1.3.2. Nagalmmethode

Bij de nagalmmethode wordt van een speciaal daarvoor bestemde ruimte, een nagalmkamer (fig. 4.3.), met een bekend volume V_0 (vereist is $V_0 > 180 \text{ m}^3$) en een zeer goede geluidverdeling (diffuus geluidveld) de nagalmtijd gemeten in lege toestand (T_{leeg}). Vervolgens wordt $S \text{ m}^2$ (10 à 12 m^2) van het te onderzoeken materiaal in de ruimte aangebracht op een voor de praktijk gebruikelijke wijze. Daarna wordt opnieuw de nagalmtijd gemeten (T_{vol}). Uit de verschillen in

nagalmtijd, het volume van de ruimte en de oppervlakte van het beproefde materiaal kan de absorptiecoëfficiënt worden berekend:

Het voordeel van deze methode ten opzichte van de interferometermethode is, dat de gevonden

$$\alpha_s = \frac{V_0}{6S} \left(\frac{1}{T_{vol}} - \frac{1}{T_{leeg}} \right) \quad (4-9)$$

waarden voor α gelden voor alzijdige inval van het geluid, wat de praktijk beter benadert en voor toepassingen in de praktijk gebruikelijk is. De bezwaren die aan deze meetmethode kleven, berusten voornamelijk op de benodigde monstergrootte (10 à 12 m²) en het gegeven dat de gebruikte ruimte van invloed kan zijn op de resultaten. Op grond van het laatste kunnen de absorptiecoëfficiënten van verschillende materialen (eigenlijk) alleen onderling goed worden vergeleken als voor het bepalen ervan dezelfde ruimte is gebruikt. Bij het berekenen van de nagalmtijd voor een ruimte dient hiermee rekening te worden gehouden. Immers als een ruimte minder diffuus is, of als er een variant op de wijze van bevestigen wordt gekozen, zal dit van invloed zijn op de werkelijke absorptie. Niet al deze effecten zijn echter vooraf voldoende te kwantificeren. Als gevolg hiervan komen afwijkingen voor tussen berekende en gemeten nagalmtijden van meer dan 20%.



Figuur 4.3. Het interieur van een galkamer: een 'betonnen' ruimte van ca 200 m³ met niet-evenwijdige vlakken en geluidverstrooiende elementen (diffusoren) voor een zeer goede geluidverdeling (diffuus geluidveld).

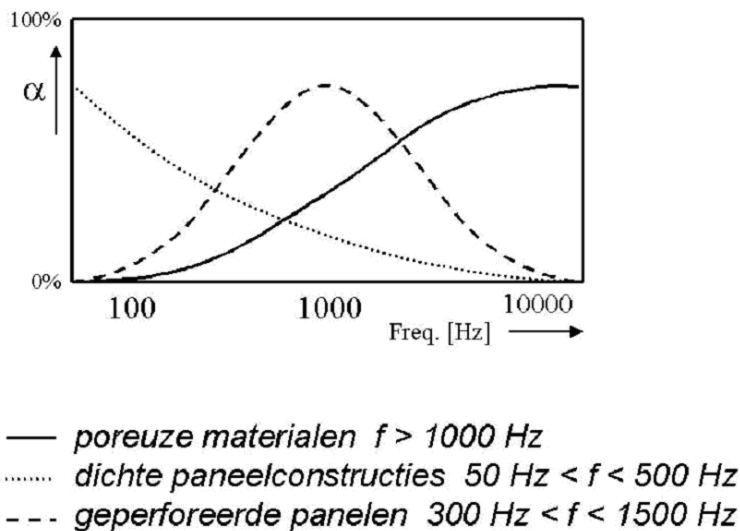
1.4. Typen absorberende constructies

De geluidabsorptiecoëfficiënt is geen materiaaleigenschap, maar een constructie-eigenschap: naast frequentie en invalshoek is de geluidabsorptiecoëfficiënt namelijk mede afhankelijk van de dikte en opbouw van de betreffende constructie. Absorberende materialen worden onder andere hierom in drie categorieën onderscheiden op basis van hun absorptiemechanisme. Deze typen zijn:

- poreuze materialen;
- resonerende panelen;
- resonatoren en geperforeerde panelen.

1.4.1. Poreuze materialen

Onder poreuze materialen verstaan we materialen met een open oppervlaktestructuur



Figuur 4.4. Karakteristieke eigenschap van de 3 absorptietypen.

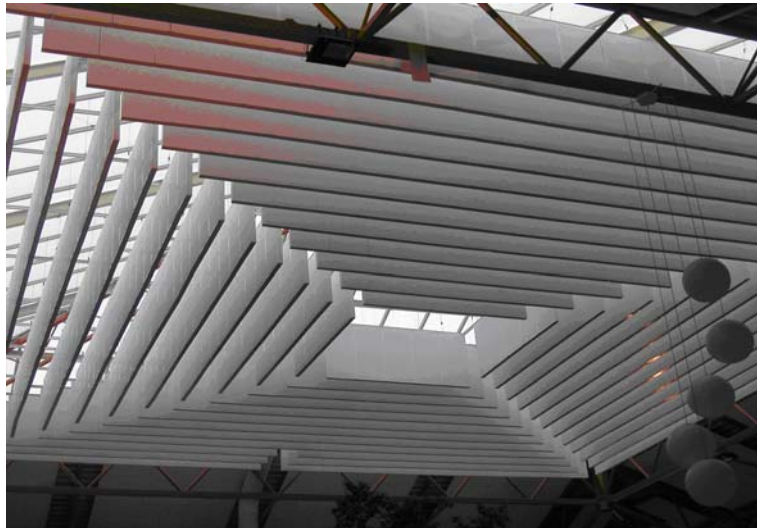
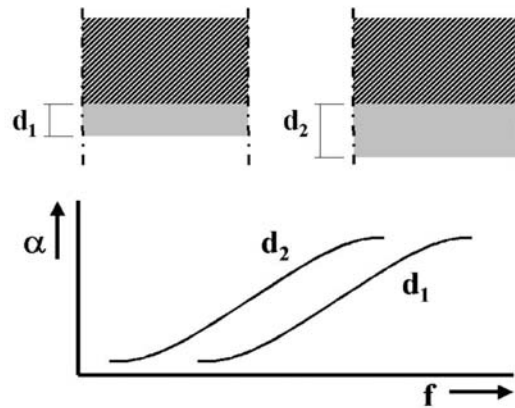
(doorblaasbaar). Een geluidsgolf, die op een laag poreus materiaal valt, splitst zich aan de oppervlakte in een gereflecteerde golf en een in het materiaal doorgaande golf. De doorgaande energiefractie zal groter zijn naarmate de overgang van lucht naar de poreuze materie gemakkelijker is, zoals bij een zeer luchtig materiaal als spijkerflensdekens (porositeit). Een te grote overgang aan het oppervlak (nauwe poriën) zal resulteren in een te grote reflectie en dus geringe doorgaande energiefractie in het materiaal. De geluidabsorptie is dan bij voorbaat laag. Met de doorgaande energiefractie gebeurt het volgende. De trillende beweging van de luchtdeeltjes in de poriën wordt afgeremd doordat wrijving optreedt tussen de luchtdeeltjes onderling en tussen de luchtdeeltjes en de stilstaande wanden van de poriën. De viscositeit van de lucht speelt hierbij een belangrijke rol. De wrijvingsenergie komt in mindering op de trillingsenergie van de luchtdeeltjes: de in het poreuze materiaal doorgedrongen geluidsgolf wordt verzwakt of gedempt. Is deze damping gering, zoals bij hele luchtige materialen, dan kan de golf als het ware onverzwakt de laag doorlopen, reflecteren tegen de erachter liggende laag en zonder al te veel energieverlies het materiaal weer verlaten. Bepalend voor de mate van absorptie hierbij is de lucht- of stromingsweerstand van het materiaal. De specifieke stromingsweerstand r wordt uitgedrukt in Ns/m^4 . In tabel 4.1. is voor een aantal materialen de karakteristieke waarde voor r gegeven.

Tabel 4.1. Specifieke stromingsweerstand in Ns/m^4 van enkele materialen.

Materiaal	r (Ns/m^4)
zeer fijne glasvezel	15000 .. 180000
glasvezel	5000 .. 35000
kunstharsgebonden glasvezelplaten	5000 .. 25000
houtwolcementplaten	500 .. 1000
polyurethaan zachtschuim op polyester- en polyetherbasis, opencellig	500 .. 35000

Uit de voorgaande beschouwing zal duidelijk zijn dat er een optimum waarde van de stromingsweerstand van een homogeen goed absorberend materiaal is. Een goed absorberend materiaal moet met enige moeite doorblaasbaar zijn. Immers, een te lage stromingsweerstand verleidt het geluid wel tot voortplanting in het materiaal, maar levert daarna te weinig damping op, tenzij de laagdikte erg groot is, terwijl bij een hoge stromingsweerstand de damping weliswaar groot is, maar de hoeveelheid geluid die deze hoge damping kan ondergaan gering is omdat de overgang van de lucht naar het (vrij dichte) materiaal te groot is voor de geluidsgolf. Ongeverfd zachtboard is hiervan een voorbeeld. Om deze overgang geleidelijker te laten verlopen gebruikt men in speciale meetkamers wigvormige absorptiematerialen met een grote lengte. Het algemene gedrag van geluidabsorberende materialen van het poreuze type wordt gekenmerkt door een met de frequentie toenemende absorptiecoëfficiënt (fig.4.5.). Vergroting van de laagdikte

bij materialen met een optimum of lage stromingsweerstand heeft tot gevolg dat dezelfde absorptiecoëfficiënt nu al bij een lagere frequentie optreedt: de curve schuift als het ware naar links. Voor materialen met een hoge stromingsweerstand heeft vergroting van de dikte i.h.a. geen zin. Ook de wijze van aanbrengen heeft, bij een juiste stromingsweerstand, invloed op de absorptie.



Figuur 4.5. Baffles (mineraalwolplaten afgewerkt met een glasvlies, bevestigd in een frame) als poreuze absorber, toegepast in zwembad De Tongelreep.

Bevindt het materiaal zich namelijk op een luchtspouw voor een harde wand dan is de absorptiekenarakteristiek vrijwel gelijk aan die van een laag materiaal ter dikte van aanwezig materiaal plus spouwdiepte. Variaties op deze algemene tendensen ontstaan doordat een optimale stromingsweerstand nog met verschillende materiaalstructuren kan worden bereikt: een materiaal kan een korrelige, vezelige, zeer regelmatige maar ook een zeer grillige structuur hebben. We geven dit aan door de structuurfactor. Een lage structuurfactor heeft in het algemeen een "rustige" absorptiecurve tot gevolg, terwijl een grillige absorptiekromme meestal op een hoge structuurfactor wijst. Het is wel de vraag of dit bij metingen uitgevoerd in octaaf- of 1/3-octaafbanden altijd duidelijk tot uiting komt. In tabel 4.2. worden van een aantal poreuze materialen de geluidabsorptiecoëfficiënten gegeven.

1.4.2. Resonerende panelen

Poreuze materialen absorberen voornamelijk de hoge tonen. Hierdoor kan in een ruimte een teveel aan lage tonen overblijven; een dreunende holle ruimte is dan het resultaat. Voor de absorptie van lage tonen moet men zijn toevlucht nemen tot het toepassen van dunne gesloten panelen (zie figuur 4.4., de gestippelde curve), aangebracht op een luchtlaag voor een hard

Tabel 4.2. Geluidabsorptie poreuze materialen.

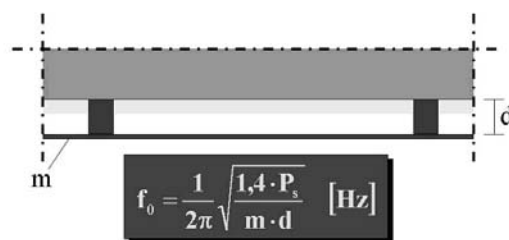
Materiaal	dikte [mm]	luchtlaag [mm]	frequentie [Hz]					
			125	250	500	1000	2000	4000
1. tufting tapijt								
- gesneden pool	11	-	0,01	0,04	0,06	0,19	0,39	0,48
- toefen pool	8,5	-	0,02	0,03	0,14	0,36	0,61	0,68
- toefen pool	9,8	-	0,02	0,05	0,19	0,41	0,44	0,59
- lussen pool	5,9	-	0,02	0,06	0,10	0,27	0,57	0,65
2. velours weef tapijt								
- gesneden pool	9	-	0,01	0,02	0,07	0,19	0,44	0,56
3. houtwolcementplaat								
	25	-	0,02	0,05	0,10	0,29	0,50	0,42
	25	65	0,03	0,10	0,40	0,35	0,31	0,55
	25	270	0,14	0,34	0,21	0,21	0,31	0,49
	50	-	0,04	0,11	0,19	0,44	0,38	0,59
	50	65	0,07	0,17	0,41	0,33	0,50	0,62
	50	270	0,16	0,25	0,19	0,27	0,49	0,60
4. glaswol (12 kg/m ³)	45	-	0,16	0,39	0,80	0,96	1,09	1,20
5. glaswol (16)	60	-	0,38	0,56	0,91	0,96	1,21	1,20
6. glaswol (22)	25	-	0,10	0,22	0,54	0,79	0,99	1,07
7. glaswol (38)	40	-	0,07	0,23	0,64	0,92	1,08	1,12
8. glaswol (55)	60	-	0,09	0,28	0,74	1,03	1,13	1,18
9. opencellig schuim								
- piramideplaat	70	-	0,11	0,27	0,59	1,08	1,07	1,02
	100	-	0,14	0,58	1,06	1,03	1,06	1,15
10. betonsteen	100	-	0,06	0,08	0,11	0,27	0,51	0,47

vlak (fig. 4.6.). Hierbij is de spouw veelal gevuld met onverpakte minerale wol (glas- of steenwol). Het gedrag van een dergelijke constructie is te vergelijken met een massa-veer-systeem, waarbij het paneel de massa levert en de achterliggende luchtlaag fungeert als een veer. Zoals elk massa-veer-systeem heeft ook dit een resonantiefrequentie waarbij het vrij spontaan in trilling komt. Als het paneel tot meetrillen wordt gebracht, zorgen viskeuze verliezen in de luchtspouw en in de oplegging voor het omzetten van trillingsenergie in warmte, en daardoor voor geluidabsorptie. Het gevolg is een hoge absorptie bij de resonantiefrequentie. De resonantiefrequentie f_0 van het systeem bij loodrechte inval is te berekenen uit:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,4 p_s}{m \cdot d}} \approx \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (4-10)$$

waarin:

p_s	-	de statische luchtdruk, ongeveer 10^5	[Pa]
m	-	de massa per oppervlakte-eenheid van het paneel	[kg/m ²]
d	-	de dikte van de luchtlaag	[m]



f_0	= resonantiefreq.	[Hz]
P_s	= statische luchtdruk	[Pa]
m	= massa paneel	[kg/m ²]
d	= dikte luchtlaag	[m]



Figuur 4.6. Houten beplating op stijl- en regelwerk als afwerking of lambrizing werkt als een laagfrequent absorber (paneelconstructie).

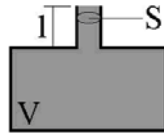
Bij alzijdige inval van het geluid vindt de meeste absorptie plaats in een klein frequentiegebied rond f_0 . Bij gegeven m en d kan m.b.v. 4-10 de resonantiefrequentie worden berekend. Verstijven van het paneel geeft hetzelfde effect als het dunner maken van de luchtlaag. In tabel 4.3. voor een aantal in de praktijk voorkomende constructies, waarvan het absorptiemechanisme gebaseerd is op bovengenoemd principe, de absorptiecoëfficiënten gegeven.

Tabel 4.3. Geluidabsorptie van vlakke panelen.

materiaal/opbouw	frequentie [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1 hardboard: 3,5 mm op regelwerk $m=3,3 \text{ kg/m}^2$						
- spouw 60 mm	0,36	0,11	0,12	0,03	0,05	0,05
- idem met 40 mm minerale wol	0,58	0,18	0,11	0,09	0,05	0,04
- spouw 120 mm	0,54	0,08	0,08	0,07	0,06	0,09
- idem met 40 mm minerale wol	0,42	0,17	0,09	0,07	0,06	0,09
2 multiplex: 4 mm op regelwerk $m = 2,9 \text{ kg/m}^2$						
- spouw 60 mm	0,22	0,12	0,14	0,06	0,04	0,09
- idem met 40 mm minerale wol	0,50	0,20	0,12	0,06	0,05	0,10
- spouw 120 mm	0,47	0,10	0,10	0,04	0,07	0,06
- idem met 40 mm minerale wol	0,43	0,16	0,11	0,05	0,05	0,09
multiplex: 4 mm op regelwerk $m = 2,9 \text{ kg/m}^2$						
- spouw 50 mm vol minerale wol	0,57	0,37	0,13	0,07	0,06	0,03
- spouw 100 mm, 50 mm minerale wol	0,75	0,30	0,12	0,05	0,04	0,03
3 spaanplaat: 19mm op regelwerk $m=13,5 \text{ kg/m}^2$						
- spouw 60 mm	0,33	0,10	0,12	0,10	0,14	0,26
- idem met 40 mm minerale wol	0,29	0,14	0,12	0,11	0,18	0,11
- spouw 120 mm	0,30	0,11	0,15	0,08	0,12	0,24
- idem met 40 mm minerale wol	0,24	0,14	0,16	0,09	0,14	0,17
4 gipsplaten: 9,5mm op regelwerk $m=9,3 \text{ kg/m}^2$						
- spouw 60 mm	0,31	0,08	0,04	0,07	0,09	0,08
- idem met 40 mm minerale wol	0,25	0,17	0,04	0,06	0,08	0,22
- spouw 120 mm	0,22	0,08	0,11	0,07	0,19	0,22
- idem met 40 mm minerale wol	0,23	0,12	0,09	0,06	0,11	0,22

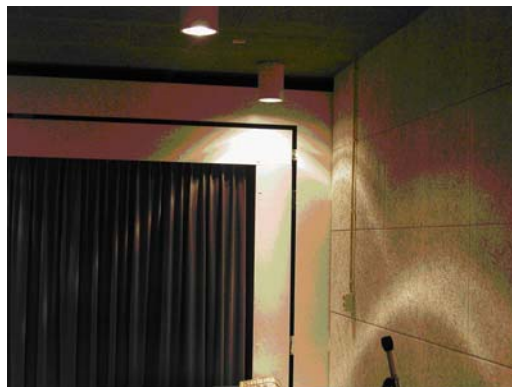
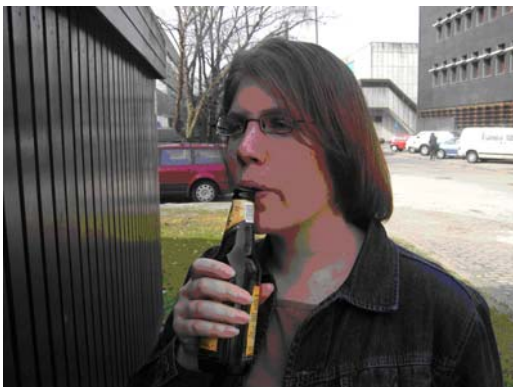
1.4.3. Resonatoren en geperforeerde panelen

Eén van de oudste vormen van geluidabsorptie is gebaseerd op het resonantieprincipe. In diverse middeleeuwse kerken zijn in muren holten aangetroffen, die via een opening in verbinding stonden met de kerkruimte. Vitruvius schreef reeds over resonatoren, grote potten die in openluchttheaters gebruikt werden en een akoestische functie gehad moeten hebben.



$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l \cdot V}} \text{ [Hz]}$$

f_0	= resonantiefreq.	[Hz]
c	= geluidsnelheid	[m/s]
S	= dwarsdoorsnede	[m ²]
l	= kanaallengte	[m]
V	= Volume	[m ³]



Figuur 4.7. Helmholtz-resonator in de vorm van een (aangeblazen) bierfles en een spleetresonator in een geluidstudio (t.b.v. damping eigenmodes).

De meest eenvoudige vorm van een resonator is een zogenaamde Helmholtz-resonator: een afgesloten luchtvolume V dat via een kanaal, een hals, in verbinding staat met "buiten" (fig.4.7.). Dit systeem is te vergelijken met een massa-veer-systeem: het raakt in trilling, resonantie, bij een bepaalde frequentie, de resonantiefrequentie, f_0 bij loodrechte inval van het geluid. Hierbij voert de luchtmasa in de hals een periodieke trilling uit op de veer (stijfheid) van het luchtvolume V . De resonantiefrequentie f_0 bij loodrechte inval volgt uit het volume V (m³), de dwarsdoorsnede S (m²), de lengte l (m) van het kanaal en de voortplantingssnelheid c (m/s) van geluid in lucht:

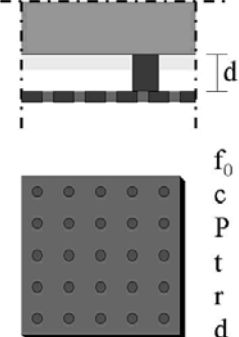
$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l \cdot V}} \text{ [Hz]} \quad (4-11)$$

Voor een kanaal met cirkelvormige doorsnede (diameter D) wordt deze relatie met enige correcties:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(l + 0,8D)V}} \text{ [Hz]} \quad (4-12)$$

Wanneer er geluid dat de resonantiefrequentie bevat op zo'n resonator valt, dan zal deze gaan

resoneren en energie absorberen, doordat wrijvingsverliezen, ook wel damping genoemd, in of bij het kanaal optreden. Deze verliezen kunnen worden vergroot door het aanbrengen van poreus materiaal in of achter het gat. Is er weinig damping in een resonator aanwezig, wat het geval is bij een resonator zonder extra absorptiemateriaal, dan zal de absorptie hoog zijn in een smal frequentiegebied. De absorptiepiek wordt lager maar breder bij toenemende damping (figuur 4.4., gestreepte curve).



$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(t + 1,6r)d}} \text{ [Hz]}$$

f_0	= resonantiefreq.	[Hz]
c	= geluidsnelheid	[m/s]
P	= perforatiegraad	[-]
t	= plaatdikte	[m]
r	= straal gat	[m]
d	= spouwdiepte	[m]

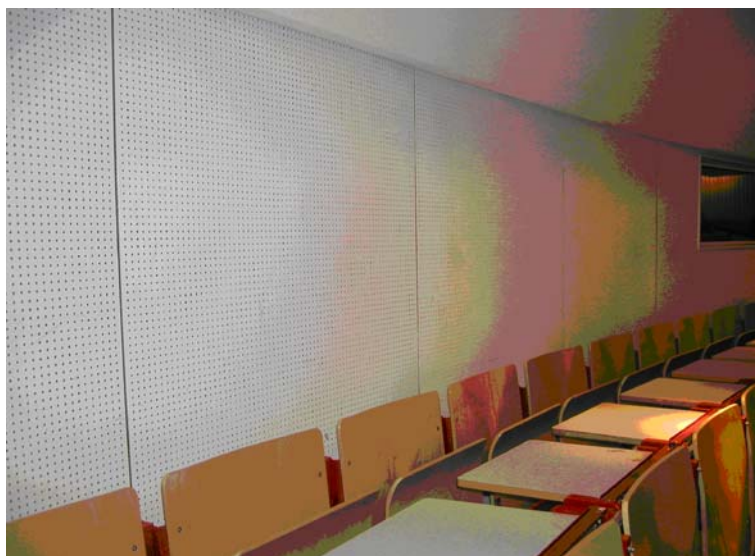
Een geperforeerde plaat op enige afstand voor een akoestisch hard vlak kan als een aantal Helmholtz-resonatoren worden opgevat, waarbij het luchtvolume V gemeenschappelijk is (fig. 4.8.). Ook hierbij zal er sprake zijn van een resonantiefrequentie f_0 . Voor een met ronde gaten geperforeerde plaat is de resonantiefrequentie bij loodrechte inval te berekenen op basis van de relatie:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{(t + 1,6r)d}} \text{ [Hz]} \quad (4-13)$$

waarin:

p	-	perforatiegraad, de verhouding tussen het open en het totale oppervlak	[-]
t	-	plaatdikte	[m]
r	-	straal van de gaten	[m]
d	-	spouwdiepte	[m]

Van dit resonantieprincipe is in de bouwakoestiek veelvuldig gebruik gemaakt. Wie kent niet de geperforeerde hardboard- en zachtboardpanelen, ingezaagde en ingeboorde tegels die onder



Figuur 4.8. Geperforeerd paneelconstructie tegen de achterwand van collegezaal 3.

meer in oudere opnamestudio's worden aangetroffen. Een meer hedendaagse variant vinden we in de geperforeerde metalen strokenplafonds en de open-latten-plafonds (spleetresonatoren).

De perforatiegraad is de verhouding van het open oppervlak tot het totale oppervlak. Is deze 30 % of meer dan zal het Helmholtz-effect nagenoeg niet optreden. De geluidabsorptie is dan gelijk aan die van het poreuze materiaal in de spouw. Een perforatiegraad van minder dan 20 à 25 % geeft de meeste absorptie bij de middenfrequenties. Hiermee kan naar believen het "gat" in de ruimteabsorptie tussen de poreuze materialen en de panelen worden opgevuld om een evenwichtiger klankbeeld te verkrijgen.

Het verpakken van poreuze materialen in bijvoorbeeld kunststoffolie doet de geluidabsorptie-eigenschappen veranderen: afhankelijk van de dikte, en dus de massa, verandert het gedrag van dat van een poreus materiaal in dat van een paneelresonator. Dit kan bewust worden gebruikt, maar ook aanleiding geven tot verrassingen. Is de folie dunner dan ca. 50 μm , dan zal het de absorptie in het normale frequentiegebied 125 .. 4000 Hz nauwelijks doen veranderen. Zwaardere folies gedragen zich meer als paneelresonatoren."

1.4.4. Overige absorbentia

Van niet alle in een ruimte aanwezige materialen of voorwerpen die bijdragen aan de totale absorptie laat het mechanisme zich eenduidig beschrijven. Veel van de veelvuldig toegepaste materialen of constructies vertonen een absorptiegedrag, dat kan worden gezien als een combinatie van de drie hiervoor behandelde categorieën. Alle oppervlakken en voorwerpen, die weliswaar niet opzettelijk in een ruimte zijn aangebracht om geluid te absorberen, dragen niettemin bij tot de totale absorptie en soms zelfs in niet onaanzienlijke mate.

Ruiten kunnen met lage tonen meetrillen. Zij missen echter de grote stijfheid van een luchtlaag, zijn relatief zwaar en hebben als gevolg van de inklemming slechts een vrij kleine eigen stijfheid, afhankelijk van afmetingen, lengte, breedte, dikte, waardoor alleen de absorptie in het 125 Hz octaaf nog van enige betekenis is. De energie 'verdwijnt' ten dele als warmte in de inklemming, en wordt ten dele 'schijnbaar' geabsorbeerd door doorlating (transmissie) naar de aangrenzende (buiten)ruimte.

Vloerkleden, tapijt, gordijnen, geklede personen, e.d. gedragen zich als poreuze materialen, dat wil zeggen zij absorberen hoge tonen beter dan lage. Voor vloerbedekking bijvoorbeeld geldt: des te dikker des te meer absorptie in de hoge tonen. Zelden zal echter een werkzame dikte van 20 mm of meer voorkomen, zodat zelfs zware, hoogpolige tapijten aanzienlijk minder bijdragen aan de totale absorptie dan een poreuze plafondafwerking (geperste minerale woltegels). Gordijnen bevinden zich meestal op enige afstand voor een akoestisch harde wand (glas), d.w.z. op plaatsen waar de luchtbeweging in de staande golven in de ruimte aanzienlijk kan zijn. Een invallende golf vormt met de gereflecteerde golf een staande golf, gekenmerkt door een deeltjessnelheid 0 aan de wand en een maximale deeltjessnelheid op 1/4 golflengte (afstand buik-knoop in staande golf) voor de wand. Bevindt zich op deze plaats een poreuze stof, dan is sterke absorptie het resultaat. Bij 100 Hz is deze afstand 0,85 m. Hieruit kan worden opgemaakt, dat een gordijn niet te dicht voor een wand moet hangen om ook laagfrequent enige bijdrage aan de absorptie te kunnen leveren. Door het plooien van gordijnen worden en de werkzame dikte en de absorptie vergroot.

Veel voorwerpen, zoals meubels e.d., leveren vaak een welkome bijdrage aan de geluidabsorptie (open boekenkast, gestoffeerd meubilair, luchtroosters, verlichtingsarmaturen e.d.), evenals in de ruimte aanwezige personen. Meestal geeft men de absorptie aan in m^2 absorptie per eenheid. Normaal geklede staande personen absorberen in het middenfrequente gebied ca. 0,5 m^2 per persoon. Een gesloten publiekvlak is te beschouwen als een sterk absorberend oppervlak, waaraan absorptiecoëfficiënten van 0,8 tot 1,0 zijn toe te kennen.

Dit is een belangrijk gegeven, met name voor ruimten waarin aan de akoestiek strenge eisen worden gesteld en veel publiek aanwezig verondersteld mag worden (zaalakoestiek).

Houten vloeren op balken absorberen lage frequenties, zij het in geringe mate, zoals zware en stijve panelen.

Beton, stucwerk e.d. absorberen vrijwel niet. Bij schoon metselwerk zullen de stenen in het algemeen nauwelijks een bijdrage leveren aan de absorptie; wat wel verschil kan uitmaken is de toegepaste voegmortel. Speciale akoestische stenen, poreuze betonstenen, poriso e.d. kunnen nog een behoorlijke absorptie hebben in een bepaald frequentiegebied.

In bepaalde situaties mag ook de bijdrage van luchtabsorptie niet worden vergeten. Een factor, die vooral bij schaalmodelmetingen een belangrijke rol kan spelen, evenals bij de geluidoverdracht in het vrije veld over grotere afstanden (vliegtuigen). Hetzelfde geldt voor de bodemafwerking. Met name dit aspect heeft in het kader van de Wet geluidhinder de nodige belangstelling gekregen.

1.5. Geluidabsorptie en geluiddruk niveau

Voor een diffuus geluidveld geldt:

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{4}{A} = L_w - 10 \lg A + 6 \quad (4-14)$$

Het geluiddruk niveau in een dergelijke ruimte is dus afhankelijk van het geproduceerde vermogen en de totale geluidabsorptie van de ruimte. Onderscheiden we:

- situatie 1 met weinig absorptie (A_1);
- situatie 2 met veel absorptie (A_2), dan geldt:

$$L_{p1} = L_w - 10 \lg A_1 + 6 \quad (4-15)$$

en:

$$L_{p2} = L_w - 10 \lg A_2 + 6 \quad (4-16)$$

Hieruit volgt:

$$L_{p1} - L_{p2} = 10 \lg \frac{A_2}{A_1} \quad (4-17)$$

Hier geldt dus:

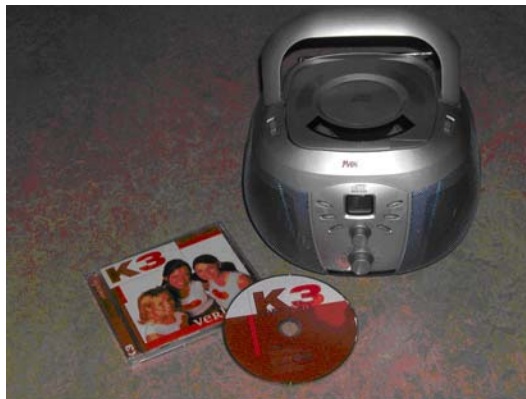
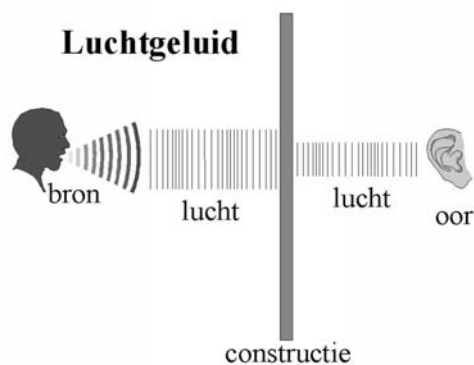
- als $A_2 = 2 A_1$, dan $L_{p1} - L_{p2} = 3 \text{ dB}$
- als $A_2 = 3 A_1$, dan $L_{p1} - L_{p2} = 5 \text{ dB}$
- als $A_2 = 10 A_1$, dan $L_{p1} - L_{p2} = 10 \text{ dB}$

N.B. Het bovenstaande geldt voor elke octaafband!!!

2. Geluidisolatie

2.1. Inleiding

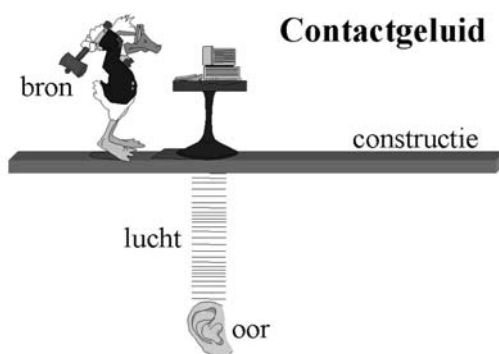
Geluidisolatie is zowel in woorden als met formules te beschrijven. In woorden: geluidisolatie is het weren van storend geluid in een ruimte, afkomstig uit een andere ruimte; of het verminderen van de geluidsoverdracht van een ruimte naar een andere ruimte. Het betreft dan bijvoorbeeld het weren van verkeerslawaai in een slaapkamer (overdracht van buiten naar binnen), van het lawaai van de burens in de woonkamer (overdracht van binnen naar binnen), of het verminderen van geluid afkomstig uit een discobar (overdracht van binnen naar buiten en eventueel weer naar binnen). Wanneer we deze omschrijving exacter willen vastleggen, met formules, dan dienen we onderscheid te maken tussen twee, qua wijze van ontstaan, verschillende soorten geluid, namelijk *luchtgeluid* en *contactgeluid* (fig. 4.9. en 4.10.).



Figuur 4.9. Luchtgeluidoverdracht.

Luchtgeluid is geluid (longitudinale golven), dat afkomstig is van een bron die rechtstreeks de lucht in trilling brengt (stembanden, een fluit, een radio). Bij de overdracht van luchtgeluid van een ruimte naar een andere brengt de bron de lucht in trilling, deze brengt de scheidingsconstructie in trilling en deze brengt op zijn beurt de lucht in het andere vertrek in trilling (fig. 4.9.)

Contactgeluid is geluid dat afkomstig is van een bron die rechtstreeks een constructie (wand of vloer) in trilling brengt, waarna die constructie de lucht weer in trilling brengt (klopboor, voetstappen, slaande deuren, sanitair). De constructie fungeert als klankbord voor de brontrillingen en verhoogt zo het "afstraalrendement" van de (trillings)bron. Bij contactgeluidsoverdracht tussen twee ruimten wordt dus de constructie direct in trilling gebracht. Deze brengt de eraan gekoppelde bouwelementen in trilling. De totale bouwconstructie straalt dan zijn trillingsenergie in het naastgelegen vertrek (en het eigen vertrek) als luchtgeluid af (fig. 4.10.).



Figuur 4.10. Contactgeluidoverdracht.

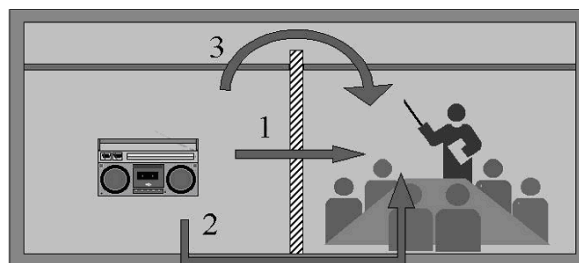
Sommige bronnen veroorzaken zowel lucht- als contactgeluid (figuur 4.11.). De complexiteit van deze geluidoverdrachtsmechanismen is gelegen in het vóórkomen van verschillende trillingsvormen naast elkaar: longitudinale trillingen (luchtgeluid) worden omgezet in transversale constructietrillingen (buiggolven) en omgekeerd.



Figuur 4.11. Combinatie van contact- en luchtgeluidoverdracht.

De overdracht van geluid van een ruimte naar een andere is niet alleen afhankelijk van de eigenschappen van de betreffende scheidingsconstructie, maar ook van de ruimtelijke samenvoeging van deze constructie met andere constructiedelen: de zogenaamde flankerende overdracht en omloopgeluid (fig. 4.12.). Daarnaast spelen de aansluitingen tussen de verschillende constructiedelen (kieren, geluidlekken) en de technische voorzieningen (doorvoeren, geluidlekken en omloopgeluid) een rol. Afhankelijk van het soort geluid (lucht- of contactgeluid) en de situatie (binnen-binnen, buiten-binnen, binnen-buiten) zal de bijdrage via elke afzonderlijke overdrachtsweg aan de totale geluidoverdracht verschillen. Zo zal flankerende overdracht in het algemeen een grotere rol spelen bij binnen-binnen situaties dan bij andere situaties. Bij buiten-binnen situaties, waar gevelelementen belangrijk zijn, spelen de directe overdracht en geluidlekken een grotere rol. Ook omloopgeluid kan meespelen. We maken daarom onderscheid in de geluidisolatie van of tussen:

- een element: wand, vloer, dak, raam, deur, ventilatie-opening;
- een samengestelde constructie: het in één vlak (2-dimensionaal) samenvoegen van elementen: gevelvlak met raam, borstwering en ventilatie-opening;
- twee ruimten: een ruimtelijk (3-dimensionaal) samenvoegen van (al of niet uit samengestelde constructies bestaande) vlakken.



- direct (1)
- flankerend (2)
- omloop (3)

Figuur 4.12. Wegen van geluidoverdracht.

2.2. Wat is luchtgeluidisolatie

2.2.1. Definitie

De luchtgeluidisolatie van een bouwelement is een eigenschap van het element: het element alléén bepaalt hoeveel geluid er wordt doorgelaten. Valt een geluidsgolf met intensiteit I_i (watt/m²) op een element en bedraagt de intensiteit van de doorgelaten geluidsgolf I_τ (transmissie), dan wordt de luchtgeluidisolatie R van dat element gedefinieerd door:

$$R = 10 \lg \frac{I_i}{I_\tau} = 10 \lg \frac{1}{\tau} \quad (4-18)$$

waarin:

R	-	de luchtgeluidisolatie van de constructie	[dB]
τ	-	de transmissiecoëfficiënt (doorlatingscoëfficiënt)	[-]

Voor constructies bestaande uit één bouwelement met oppervlakte S kan, omdat immers $W_i = S \cdot I_i$ en $W_\tau = S \cdot I_\tau$, (4-1) ook geschreven worden als:

$$R = 10 \lg \frac{W_i}{W_\tau} \quad (4-19)$$

waarin:

W_i	-	vermogen van het op het bouwelement invallende geluid	[W]
W_τ	-	vermogen van het door de constructie doorgelaten (afgestraalde) geluid	[W]

De op deze manier gedefinieerde luchtgeluidisolatie hangt niet af van de grootte van het oppervlak van het element. Een geluidisolatie van 20, 30, 40 of 50 dB betekent dat van de invallende intensiteit slechts respectievelijk 1/100 (1 %), 1/1000 (0,1 %), 1/10000 (0,01 %), of 1/100000 (0,001 %) wordt doorgelaten.

Aangezien in de bouwakoestische praktijk intensiteiten niet op eenvoudige wijze gemeten kunnen worden, wordt (4-19) meestal veranderd in formules, waarin de gemakkelijk meetbare geluidruisniveaus voorkomen. Deze formules hangen echter af van de situatie.

2.2.2. De luchtgeluidisolatie van samengestelde constructies

Een scheidingsvlak tussen twee ruimten is vaak samengesteld uit meerdere bouwelementen, zoals:

- een scheidingswand met een deur en/of raam;
- een gevel, bestaande uit een borstwering, beglazing met kierdichting en eventueel een ventilatierooster.

De geluidisolatie R_{vlak} van zo'n scheidingsvlak is dan te definiëren als 10 maal de logaritme van de verhouding van het op het vlak invallende geluidvermogen W_i en het door dat vlak doorgelaten geluidvermogen W_τ :

$$R_{\text{vlak}} = 10 \lg \frac{W_i}{W_\tau} \quad (4-20)$$

Het doorgelaten geluidvermogen W_τ is de som van de door de afzonderlijke delen doorgelaten geluidvermogens:

$$W_{\tau} = W_{\tau 1} + W_{\tau 2} + W_{\tau 3} + \dots \quad (4-21)$$

Dit kan herschreven worden door van elk deelvlak de geluidisolatie en de oppervlakte als gegeven grootheden in te vullen:

$$W_{\tau} = S_1 I_{\tau 1} + S_2 I_{\tau 2} + \dots \quad (4-22)$$

Schrijven we vervolgens nog (4.20) als:

$$R_{vlak} = -10 \lg \frac{W_{\tau}}{W_i} \quad (4-23)$$

en bedenken we dat ook geldt:

$$W_i = S_{vlak} I_i \quad (4-24)$$

dan is R_{vlak} te berekenen uit de geluidisolatie en de oppervlakte van de samenstellende delen:

$$R_{vlak} = -10 \lg \left[\frac{1}{S_{vlak}} \left(S_1 10^{\frac{-R_1}{10}} + S_2 10^{\frac{-R_2}{10}} + \dots \right) \right] \quad (4-25)$$

Deze uitdrukking is toepasbaar voor een uit veel delen samengesteld vlak. Vaak wordt de formule beperkt tot twee termen en wordt aangegeven hoeveel de geluidisolatie R_1 van een goed isolerend vlak verslechtert wanneer een fractie wordt ingenomen door een ander vlak met een lagere geluidisolatie R_2 . Dit is eenvoudig grafisch weer te geven en geeft snel inzicht in de consequenties van een vlakindeling in delen met hoge en lage geluidisolatie.

2.3. Meetmethoden voor luchtgeluidisolatie

2.3.1. Laboratoriummetingen

In het voorgaande is al vermeld dat de geluidoverdracht tussen twee ruimten wordt bepaald door het totaal van directe en flankerende overdracht, alsmede de overdracht via geluidlekken en andere omwegen. In de meeste gevallen speelt de directe overdracht de belangrijkste rol. Deze overdracht -de hoeveelheid geluid- wordt bepaald door de luchtgeluidisolatie R van het (directe) scheidingsvlak en de grootte van het scheidingsoppervlak S . Om de luchtgeluidisolatie R van een constructie te onderzoeken wordt een afzonderlijk bouwelement gemeten in een zodanige omgeving, dat geluidoverdracht alleen plaats kan vinden door dat bouwelement. Tevens zorgt men ervoor dat aan weerszijden van dat element een zo diffuus mogelijk geluidveld aanwezig is. Een dergelijke, onder laboratoriumcondities uitgevoerde meting vindt plaats in de zogenaamde geluidtransmissiemeetkamers volgens in ISO 140 gegeven regels.

Een geluidbron produceert in de ene ruimte, de zendruimte, geluid. In dit diffuse geluidveld heerst een intensiteit I_1 , die aangeeft hoeveel geluidvermogen er op elke m^2 in het zendvertrek valt, dus ook op het te onderzoeken bouwelement. De doorgelaten geluidintensiteit I_t bedraagt volgens (4.19.):

$$I_{\tau} = I_1 \cdot 10^{\frac{-R}{10}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4-26)$$

Het bouwelement met oppervlakte S laat per m^2 een vermogen, groot I_{τ} , door en fungeert dus voor de tweede ruimte, de ontvangruimte, als een geluidbron met vermogen W_{τ} :

$$W_{\tau} = S \cdot I_{\tau} \quad [W] \quad (4-27)$$

Deze geluidbron veroorzaakt in het diffuse geluidveld een intensiteit I_2 :

$$I_2 = \frac{W_{\tau}}{A_2} \quad (4-28)$$

waarin A_2 de totale geluidabsorptie in het ontvangvertrek is. Bedenken we verder, dat zowel in de zend- als de ontvangruimte een diffuus veld aanwezig is, waarvoor geldt:

$$I_1 = \frac{p_1^2}{4\rho c} \text{ en } I_2 = \frac{p_2^2}{4\rho c} \quad (4-29)$$

Dan kan de luchtgeluidisolatie R worden uitgedrukt in meetbare grootheden p_1 , p_2 en A_2 . Met behulp van de definitie van het geluiddrukkniveau en enige bewerkingen levert dit op:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A_2} \quad (4-30)$$

In de zendruimte wordt met een ruisgenerator-versterker-luidspreker-combinatie een ruisachtig geluid geproduceerd, dat een voldoende breed frequentiegebied omvat (100 .. 10000 Hz). Het geluiddrukkniveau L_1 in de zendruimte en het geluiddrukkniveau L_2 in de ontvangruimte worden per frequentieband (octaaf- of tertsband) gemeten. De geluidabsorptie A_2 in het ontvangvertrek wordt per frequentieband bepaald uit de nagalmtijd T_2 in het ontvangvertrek en de formule van Sabine:

$$T = \frac{1}{6} \frac{V}{A_2} \quad (4-31)$$

De luchtgeluidisolatie R , gemeten volgens (4-6) is onafhankelijk van de grootte van het scheidingsoppervlak S en de absorptie A_2 in het ontvangvertrek. Vergroting van S met een factor 2 betekent volgens (4-4) een verdubbeling van W_{τ} en dus van I_2 (volgens (4-5)), zodat uiteindelijk L_2 een 3 dB hogere waarde krijgt. Het aldus 3 dB lagere verschil $L_1 - L_2$ wordt gecompenseerd door de 3 dB toename van de derde term in (4-6). Een soortgelijke redenering is geldig voor de invloed van A_2 . De geluidabsorptie A_1 in het zendvertrek heeft geen invloed op R : bij verandering van A_1 veranderen L_1 en L_2 in gelijke zin. Nogmaals zij opgemerkt dat de luchtgeluidisolatie R een akoestische kwaliteitsmaat van een bouwelement is en dat, in een praktijk situatie, het in de ontvangruimte resulterende geluiddrukkniveau, dat bepalend is voor de hinder, niet alleen van R , maar ook van S en A_2 afhangt. Nemen wij bijvoorbeeld aan dat het geluid alleen via het directe scheidingsvlak in het ontvangvertrek terechtkomt, dan kan het ontvangniveau L_2 met relatie (4-6) worden bepaald:

$$L_2 = L_1 - R + 10 \lg \frac{S}{A_2} \quad (4-32)$$

Hierbij spelen S en A_2 dus wel degelijk een rol.

2.3.2. Praktijkmetingen

In de praktijk willen we meestal weten hoeveel er van een geluid, geproduceerd in een ruimte (de zendruimte), doordringt in een andere ruimte (de ontvangruimte). We praten dan over de geluidisolatie tussen twee ruimten. Dit kan in eerste instantie aangegeven worden door het verschil in geluidrukniveau (per frequentieband) tussen de twee ruimten:

$$\Delta L_p = L_1 - L_2 \quad [dB] \quad (4-33)$$

Aangezien in sommige ruimten, zoals buiten, het geluidveld niet diffuus is, zodat de geluidrukniveaus van plaats tot plaats verschillen, en het ontvangniveau L_2 in omsloten ruiten mede afhangt van de geluidabsorptie A_2 , is de definitie van de geluidisolatie tussen twee ruimten volgens (4-9) niet juist: ze is niet volledig en niet in elke situatie toepasbaar. Voor de geluidoverdracht van een binnenruimte naar een andere binnenruimte mag evenals bij laboratoriummetingen, bij benadering een diffuus geluidveld worden aangenomen. Ook hier wordt bij onderzoek ruis geproduceerd in het zendvertrek en worden zend- en ontvangniveaus per frequentieband gemeten, gemiddeld over het vertrek. Het verschil $L_1 - L_2$ is dan niet plaatsafhankelijk. Het geluidrukniveau in het ontvangvertrek dient alleen nog te worden gecorrigeerd voor de absorptie in het ontvangvertrek. Dit kan gebeuren door toevoeging van een correctieterm $10 \log(T_2/T_0)$ aan $L_1 - L_2$. Het resultaat wordt het genormeerde verschil in geluidrukniveau tussen twee vertrekken genoemd:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{T_2}{T_0} \quad (4-34)$$

Het ontvangniveau wordt zo teruggerekend (genormeerd) naar een standaard inrichting (absorptie) van het ontvangvertrek met een bijbehorende nagalmtijd T_0 . Met behulp van D_{nT} wordt (4-10) gebruikt om de kwaliteit van de geluidisolatie tussen twee vertrekken, behorende tot verschillende woningen of dezelfde woning, mee aan te duiden. De normerings-(referentie-) nagalmtijd T_0 wordt hierbij op 0,5 s gesteld:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{T_2}{0,5} \quad (4-35)$$

Vóór 1976 werd in de praktijk de geluidisolatie tussen woningen gemeten volgens NEN 1070 (1962):

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A_2} \quad (4-36)$$

Analoog aan (4-6), maar met een verschillend symbool: R' voor praktijk- en R voor laboratoriummetingen. Met behulp van (4-7) kan het verband tussen R' en D_{nT} voor twee diffuse geluidvelden worden vastgelegd:

$$D_{nT} = R' + 10 \lg \frac{V_2}{3S} \quad (4-37)$$

Hieruit blijkt dat, als $V_2/3S$ toeneemt, D_{nT} toeneemt ten opzichte van R' . Dit betekent dat de diepte-afmetingen van de ontvangruimte en de grootte van het scheidingsoppervlak mede een rol spelen. Tevens kan met relatie (4-12) aan de hand van laboratoriummetingen berekend worden welk genormeerd verschil in geluidrukniveau D_{nT} maximaal bereikt kan worden door plaatsing van een wand onder praktijkomstandigheden. We moeten wel bedenken dat geluidoverdracht via nevenwegen meestal tot een lagere D_{nT} leidt.

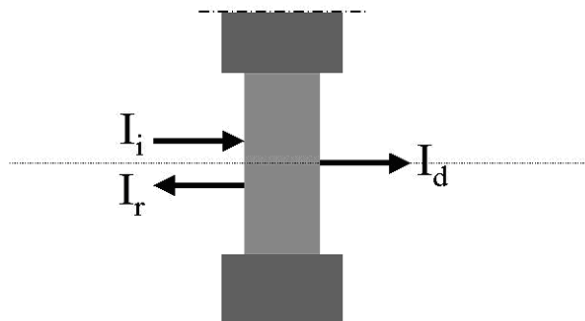
2.4. Enkelvoudige, homogene constructies

2.4.1. Theoretische massawet

In par. 4.1 is al naar voren gebracht dat de directe geluidoverdracht in veel gevallen de belangrijkste schakel is in het totaal van overdrachtswegen tussen twee ruimten. Deze is uiteraard afhankelijk van de fysische eigenschappen van die scheidingsconstructie. Het ligt dan ook voor de hand om een wiskundig verband tussen de luchtgeluidisolatie R en die fysische eigenschappen op te sporen. Dit is door verschillende onderzoekers gedaan, waarbij ze een bepaald fysisch model (gedrag) van de wand als uitgangspunt namen.

Voor een enkelvoudige wand is meestal het wrijvingloze zuigermodel gebruikt, fig 4.13., waarbij aangenomen wordt dat de wand als één geheel beweegt zonder wrijving. De beweging van de wand is dan alleen afhankelijk van de sterkte en de frequentie van de invallende geluidgolf en de massa (traagheid) van de wand.

wrijvingloos zuigermodel



- wand beweegt als één geheel
- wand beweegt zonder wrijving

Figuur 4.13. Het wrijvingsloze zuigermodel als basis voor de theoretische massawet.

Bij loodrechte inval van het geluid geldt:

$$R = 20 \lg \frac{\omega m}{2\rho c} \quad (4-38)$$

In de praktijk, zeker bij de overdracht tussen twee begrensde ruimten, valt het geluid meestal van alle kanten op het scheidingsvlak in : alzijdige inval, waarbij $0 < \theta < 90^\circ$. Op basis van de afleiding voor scheve inval kan door middel van een integratie over θ van 0 tot 90° (als $\theta = 90^\circ$ wordt R nul!) de geluidisolatie van een enkelvoudige wand bij alzijdige inval van het geluid bepaald worden uit:

$$R_{alz} = 20 \lg \frac{\omega m}{2\rho c} - 5 \quad [dB] \quad (4-39)$$

De formules (4-38) en (4-39) worden de theoretische massawetten bij respectievelijk loodrechte en alzijdige inval van het geluid genoemd. Er zij nogmaals op gewezen dat $\omega = 2\pi f$ een eigenschap is van het invallende geluid, m (kg/m^2) van de wand en ρc van de lucht.

De theoretische massawet houdt in, dat :

- de geluidisolatie R toeneemt met 6 dB bij verdubbeling van de massa per oppervlak;
- de geluidisolatie toeneemt met 6 dB bij verdubbeling van de frequentie (per octaaf).

2.4.2. Praktische massawet

Bij de afleiding van de theoretische massawet is een aantal aannamen gedaan die niet bepaald met de praktijk in overeenstemming zijn:

- wand met ∞ afmetingen;
- wand beweegt als een geheel (zuigermodel);
- wand heeft geen stijfheid.

Dit heeft tot gevolg, dat de rekenresultaten van deze massawetten een te optimistisch beeld opleveren ten opzichte van de (praktijk-)metingen. In de loop der jaren zijn daarom een aantal 'relaties' afgeleid die, zonder de buigstijfheid als wandeigenschap in rekening te brengen, een simpeler verband geven tussen de gemiddelde geluidisolatie R_m of de geluidisolatie bij 500 Hz R_{500} en de massa per oppervlak m (kg/m^2). Men noemt deze de praktische massawetten. Een voorbeeld hiervan is:

$$R_{500} = 17,5 \log m + 3 [dB] \quad (4-40)$$

per octaaf telt men hier 5 dB bij;
per lager octaaf trekt men hier 5 dB af;

Tabel 4.4 geeft een overzicht van de met de diverse massawetten berekende geluidisolatie R_{500} van wanden met verschillende massa's per oppervlak.

Tabel 4.4. R_{500} in dB uit theoretische en praktische massawet.

m [kg/m^2]	theoretische massawet	praktische massawet
10	26,7	20,5
20	32,7	25,8
50	40,7	32,7
100	46,7	38
200	52,7	43,3
400	58,7	48,5

De theoretische massawet levert per massaverdubbeling een 6 dB hogere geluidisolatie op, terwijl dat bij de praktische massawetten 5 dB is. Berekeningen volgens de praktische massawet leveren binnen enkele dB's dezelfde geluidisolatie op met een grotere afwijking bij lichte wanden ($m = 10$ en 20 (kg/m^2)). Genoemde massawetten zijn, mits met verstand gebruikt, goed bruikbaar ter onderlinge vergelijking van wanden. De beperktheid van de formules, zit 'm in het verwaarlozen van de buigstijfheid.

2.4.3. coïncidentie-effect

De buigstijfheid is een belangrijke eigenschap van bouwconstructies; door deze eigenschap zijn we immers in staat om ermee te bouwen. Ook op de luchtgeluidisolatie heeft de buigstijfheid

een grote invloed. In een wand of vloer kunnen hierdoor namelijk transversale buiggolven ontstaan onder invloed van zowel lucht- als contactgeluidbronnen. Doordat (transversale) buiggolven mogelijk zijn wordt de luchtgeluidisolatie van een enkelvoudige homogene constructie door twee verschijnselen veranderd ten opzichte van de massawetten, nl. staande en lopende golven.

2.4.4. Staande golven

In de eerste plaats kunnen er de zogenaamde plaat- of buigresonanties optreden. Dit worden staande golven, resonanties of eigenfrequenties genoemd, die te vergelijken zijn met de staande golven van een opgespannen vioolsnaar. De golflengten van de staande golven, en dus ook de resonantiefrequenties, hebben een direct verband met de afmetingen. Het betreft bij bouwelementen een reeks resonantiefrequenties, die als een grondtoon en (niet harmonisch gelegen) boventonen zijn op te vatten, en afhankelijk zijn van de lengte en breedte van het element, alsmede van de buigstijfheid en de manier waarop het element aan de omringende constructies is bevestigd: opgelegd of ingeklemd. Bij deze eigenfrequenties zal de luchtgeluidisolatie lager zijn dan de massawetten aangeven. Dit effect is het sterkst bij de laagste eigenfrequentie f_0 . Voor de meeste steenachtige bouwdelen met afmetingen van 3 à 4 m ligt deze laagste eigenfrequentie beneden ca. 70 Hz. In dit frequentiegebied is de geluidisolatie met het oog op de geluidhinder van minder belang. Ook worden deze laagste eigenfrequenties moeilijk aangestoten. De hogere eigenfrequenties worden in het algemeen vrij snel verzwakt door de inwendige demping in het materiaal zelf. De verslechterende invloed van eigenfrequenties van elementen op de geluidisolatie is het grootst bij dunne ongedempte panelen (staal, aluminium, glas); deze zijn gemakkelijk aan te stoten. Elementen met kleine afmetingen, zoals die voorkomen bij kleine omkastingen, luchtbehandelingskanalen, etc., kunnen een laagste eigenfrequentie bezitten, die in het frequentiegebied boven 100 Hz ligt. Aangezien beneden f_0 de geluidisolatie door de stijfheid wordt bepaald en niet door de massa, kan vergroting van de stijfheid onder deze specifieke omstandigheden (kleine, ongedempte, lichte panelen bij lage frequenties) het aangewezen middel zijn ter verhoging van de geluidisolatie bij die lage frequenties. Tevens kan het trillingsniveau van deze panelen verlaagd worden door het aanbrengen van trillingdempende pasta's of folies (matten), waardoor de inwendige demping sterk wordt verhoogd.

2.4.5. Lopende buiggolven

Een tweede, veel belangrijker gevolg van de buigstijfheid is het optreden van lopende buiggolven. Aangezien deze lopende buiggolven gereflecteerd worden aan de uiteinden (randen) van het bouwelement (sommatie van heen- en weergaande golven), is het inzichtelijker om bij de komende beschouwingen uit te gaan van een oneindig grote plaat, zodat we mogen aanhouden dat we echt met lopende golven te maken hebben.

Lopende golven kunnen op twee manier worden opgewekt:

- a. door aanstoting op een punt (met een hamer of een kleine contactgeluidbron) of een lijn (bijvoorbeeldkoppellijn met een ander bouwelement). Ten gevolge van deze aanstoting gaat er vanuit het aanstootpunt(-lijn) een zogenaamde vrije buiggolf lopen: 'het element is vrij om zijn eigen trillingsvorm aan te nemen'. Vergelijk dit bijvoorbeeld met een steen die in een vijver valt. De voortplantingssnelheid van deze vrije lopende buiggolven is bij benadering evenredig met de wortel uit de frequentie: hoge frequenties lopen harder dan lage:

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{E d^3}{12m}} \sqrt{2\pi f} \quad (4-41)$$

waarin:

E	-	elasticiteitsmodulus	[N/m ²]
d	-	dikte plaat	[m]
m	-	massa	[kg/m ²]
f	-	frequentie	[Hz]

analoog hieraan geldt:

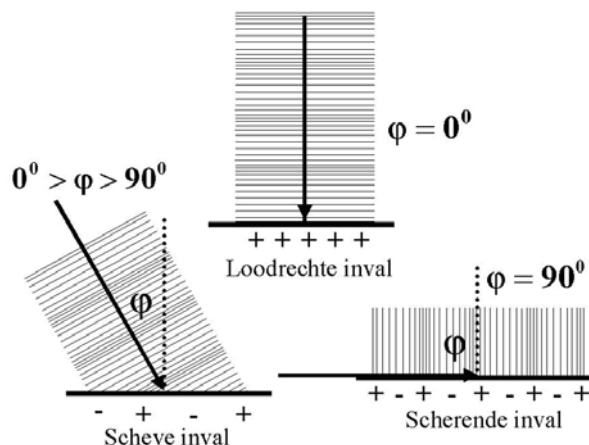
$$c_B = \lambda_B f \quad (4-42)$$

Voor plaatdikten $d > \lambda_B/4$ ontstaan geen normale buiggolven meer.

Het verschijnsel dat hoge frequenties een grotere voortplantingssnelheid hebben dan lage, noemt men dispersie; dit komt ook bij andere golfverschijnselen voor, met name bij licht (kleurscheiding in prisma's).

- b: door aanstoting met luchtgeluid: valt er bijvoorbeeld een vlakke lopende luchtgeluidgolf scheef (onder een hoek φ met de normaal) in op een wand (of vloer), dan loopt er een patroon van onder- en overdrukken langs de wand. Ten gevolge van deze onder- en overdrukken wordt de wand uit zijn evenwichtsstand in een bepaalde vorm gedrukt (fig. 4-14). Deze vorm reist mee met het patroon van over- en onderdrukken langs de wand. We noemen dit een gedwongen buiggolf: het luchtgeluid bepaalt de trillingsvorm. De voortplantingssnelheid c' van deze gedwongen buiggolf is afhankelijk van c en φ :

$$c' = \frac{c}{\sin \varphi} \quad (4-43)$$



Figuur 4.14. Geluiddrukverdeling over een plaatoppervlak ten gevolge van een gedwongen buiggolf door aanstoting met luchtgeluid.

2.4.6. Coïncidentie

Laat men nu bij dezelfde invalshoek φ de frequentie vanaf lage frequenties toenemen, dan zal c' constant blijven, maar c_B toenemen. Bij een bepaalde frequentie is c' gelijk aan c_B : de gedwongen buiggolf versterkt als het ware de vrije buiggolf, doordat beide golven samenlopen met dezelfde voortplantingssnelheid (**coïncidentie** = samenvallen). Dit resulteert in sterke plaattrillingen en een grote geluidafstraling. Bij deze frequentie, de zogenaamde coïncidentiefrequentie, is de geluidsisolatie theoretisch nul; in de praktijk veel lager dan de massawet aangeeft. Wordt de invalshoek gevarieerd, dan is er altijd een frequentie te vinden waarbij dit coïncidentie-effect optreedt. Coïncidentie kan niet bij elke frequentie plaatsvinden; bij $\varphi = 90^\circ$ is de coïncidentiefrequentie het laagst. We noemen deze frequentie de **grensfrequentie** f_g ; beneden f_g geen coïncidentie, erboven wel. Valt geluid van alle kanten op een wand in -diffuus geluidveld- dan zal dus voor alle frequenties boven f_g coïncidentie optreden, het sterkst is de invloed hiervan echter bij frequenties in de buurt van f_g . De grensfrequentie is te berekenen uit:

Coïncidentie is het samenvallen van de gedwongen buiggolf met de vrije buiggolf.

De **grensfrequentie** is de laagste frequentie waarbij coïncidentie kan optreden.

$$c_B = c' \text{ bij } \varphi = 90^\circ \quad (4-44)$$

zodat:

$$\sqrt[4]{\frac{Ed^3}{12m}} \sqrt{2\pi f_g} = \frac{c}{\sin \varphi} \quad (4-45)$$

hetgeen uiteindelijk resulteert in:

$$f_g \cdot d = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12\rho}{E}} \quad (4-46)$$

Met behulp van:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4-47)$$

kan dit geschreven worden als:

$$f_g \cdot d = \frac{c^2 \sqrt{12}}{2\pi \cdot c_L} \quad (4-48)$$

en met invulling van de constanten:

$$f_g \cdot d \approx \frac{64000}{c_L} \quad (4-49)$$

Het produkt van grensfrequentie en plaatdikte is dus een constante die bepaald wordt uit materiaalgegevens (onafhankelijk van de lengte en de breedte).

Door de invloed van de buigstijfheid in de beschouwing over de luchtgeluidisolatie van een enkelvoudige homogene constructie op te nemen, ontstaat een totaalbeeld. De mate waarin de luchtgeluidisolatie verslechterd wordt door coïncidentie, hangt af van een aantal omstandigheden. Naarmate beter is voldaan aan de voorwaarden:

- gericht geluid;
- oneindige plaatafmetingen;
- lage inwendige demping

zal de inbreuk op de geluidisolatie groter zijn. De praktische consequenties daarvan zijn als volgt samen te vatten:

- bij een gericht geluidveld (buiten-binnen) zal de breuk in de isolatiekromme relatief scherp en smal zijn rondom:

$$f_c = \frac{64000}{c_L \cdot d \cdot \sin^2 \varphi} \quad (4-50)$$

- bij de overgang binnen-binnen (2 diffuse geluidvelden) is de inbreuk verhoudingsgewijs flauw, maar breed vanaf f_g ;
- bij buiggolflengten veel kleiner dan de plaatafmetingen, ofwel bij hoge grensfrequenties (dunne platen), is de inbreuk weer dieper en smaller;
- Ongedempte (dunne) platen (metaal, glas) vertonen het coïncidentie-effect sterk.

N.B. Uiteraard is het coïncidentie-effect beter waarneembaar bij metingen in 1/3-octaaftanden (of nog smaller) dan bij octaafbandmetingen.

2.4.7. Drie-stappen-model

De vorm van de luchtgeluidisolatiekromme kan geschematiseerd worden (fig.4.15. en 4.16.). Deze geschematiseerde kromme kan gebruikt worden om de luchtgeluidisolatie van enkelvoudige constructies te voorspellen:

- lijnstuk **a** (stap 1): $f < f_1$:

$$R_{alz} = 20 \lg m + 20 \lg \frac{f}{250} \quad (4-51)$$

- lijnstuk **b** (stap 2): $f_1 < f < f_g$:

$$R_{plateau} = 20 \lg m \cdot f_g + 10 \lg \eta - 44 \quad (4-52)$$

- lijnstuk **c** (stap 3): $f > f_g$:

$$R = R_{plateau} + 25 \lg \frac{f}{f_g} \quad (4-53)$$

met:

$$f_1 = 2 \sqrt{\eta} \cdot f_g \quad (4-54)$$

Voor $m > 70 \text{ kg/m}^2$ dient de plateau-isolatie verhoogd te worden met (fig.4.16.):

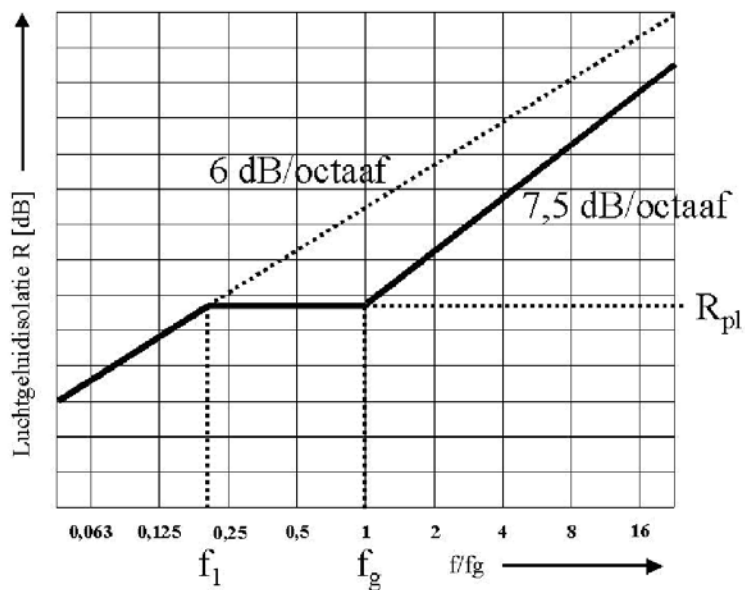
$$\Delta R = 20 \lg \frac{m}{70} \quad (4-55)$$

Tabel 4.5. geeft een overzicht van de bij het uitvoeren van deze berekeningen benodigde materiaalgegevens.

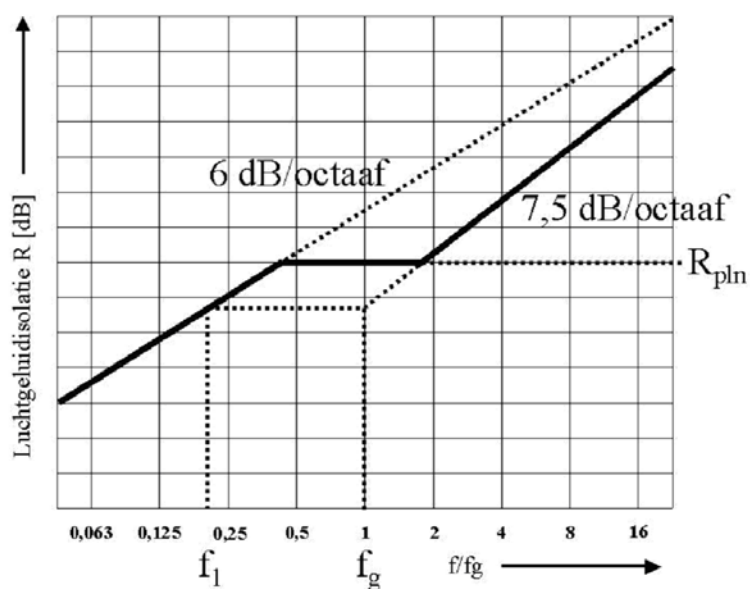
Met bovenstaande formules wordt een indicatie verkregen van de luchtgeluidisolatie van een enkelvoudige wand. Toetsingen van deze berekeningen aan bijvoorbeeld laboratoriummetingen kunnen afwijkingen opleveren als gevolg van afwijkende waarden voor de inwendige demping. Verschillen van met name $R_{plateau}$ van 3 à 5 dB zijn niet ongebruikelijk.

Gebruikelijke indeling:

- zware buigstijve wanden: $f_g < 100 \text{ Hz}$;
- lichte buigstijve wanden: $100 < f_g < 1000 \text{ Hz}$;
- lichte buigslappe wanden: $f_g > 1000 \text{ Hz}$.



Figuur 4.15. Geschematiseerde luchtgeluidisolatiecurve (drie-stappen-model) voor een enkelvoudige homogene constructie.



Figuur 4.16. Plateauverhoging voor $m > 70 \text{ kg/m}^2$.

Tabel 4.5. Materiaalgegevens voor berekening van luchtgeluidisolatie van enkelvoudige wandconstructies.

materiaal	ρ [kg/m ³]	c_1 [m/s]	$f_g \cdot d$ [Hz·m]	$m \cdot f_g$ [kg·Hz/m ²]	η [-]	R_{plateau} [dB]
Aluminium	2700	5100	12,5	3,40E+04	1,00E-02	28
Staal	7800	5050	12,8	9,80E+04	1,00E-02	38
Glas	2500	5000	12,8	3,20E+04	1,00E-02	27
Beton	2400	3700	17,3	4,10E+04	7,00E-03	29
Gasbeton	650	1700	38	2,50E+04	1,00E-02	26
Kalkzandsteen	1900	3000	21,4	4,10E+04	1,00E-02	30
Poriso	1200	2500	26	3,10E+04	1,00E-02	28
Lichtbeton	900	2000	32	2,90E+04	1,00E-02	27
Gips	1200	1800	35,5	4,20E+04	5,00E-03	28
Gipskarton	1200	1800	35,5	4,20E+04	3,00E-02	35
Hout, spaanplaat	700	2500	25	2,00E+04	1,00E-02	24
Lood	1130	1250	51,2	5,70E+05	2,00E-02	56

2.5. Dubbele constructies

Hoge luchtgeluidisolaties kunnen met enkelvoudige constructies alleen bereikt worden bij grote massa's per oppervlakte. Voor waarden $R_m = 50$ dB is men dan bijvoorbeeld aangewezen op steenachtige constructies van ca. 400 kg/m^2 . Deze wanden zijn dan per definitie stijf (f_g 100 Hz). Nog hogere waarden zijn in het algemeen moeilijk te realiseren met enkelvoudige constructies. Toch wordt in sommige situaties een geluidisolatie van 55 à 60 dB geëist. In het algemeen gesteld kan men met dezelfde massa (kg/m^2) een aanzienlijk hogere geluidisolatie bereiken door die massa te verdelen over twee achter elkaar geplaatste wanden, met andere woorden een dubbele wand te maken. De aldus ontstane spouwbladen zijn dan door een luchtlaag van elkaar gescheiden. Een dergelijke spouwconstructie lijkt op die van het resonerende paneel. Ook hier fungeert de luchtlaag als een veer, waaraan twee massa's zijn gekoppeld. Aan dit systeem massa-veer-massa is op analoge wijze een massa-veer-resonantiefrequentie toe te kennen. Deze bedraagt voor loodrechte inval van het geluid op de constructie:

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left[\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \right]} \quad (4-56)$$

waarbij:

c	-	voortplantingssnelheid van geluid in lucht	[m/s]
m_1, m_2	-	massa per oppervlakte van de beide spouwbladen	[kg/m ²]
ρ	-	volumieke massa van lucht	[kg/m ³]
d	-	spouwbreedte	[m]

Bij deze frequentie wordt het systeem gemakkelijk in trilling gebracht: (resonantie) de constructie isoleert dan zeer weinig. Enkele varianten van (4-56) verkrijgen we bij:

- scheve inval van het geluid (onder hoek θ met de normaal):

$$f_o = \frac{c}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\left[\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \right]} \quad (4-57)$$

- symmetrische spouwconstructie: $m_1 = m_2 = 1/2 m_{\text{tot}}$:

$$f_o = \frac{120}{\sqrt{m_{\text{tot}} d}} \quad (4-58)$$

- een lichte (en dus vaak buigslappe) voorzetwand voor een zware (steenachtige) wand: $m_1 \ll m_2$:

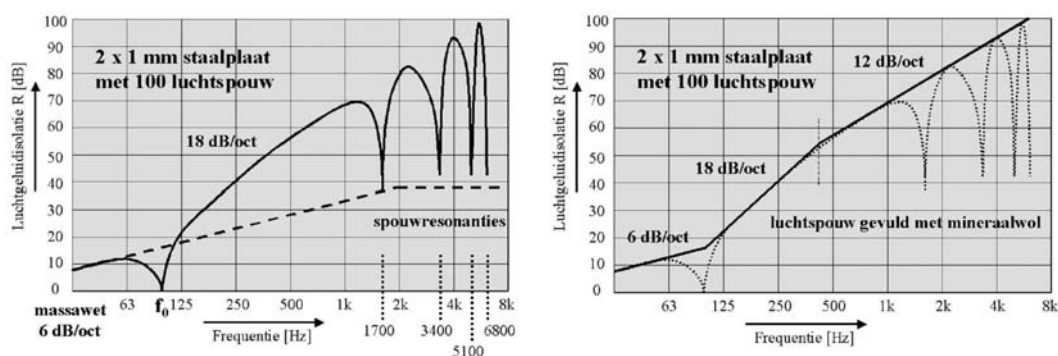
$$f_o = \frac{60}{\sqrt{m_1 d}} \quad (4-59)$$

Op soortgelijke wijze als bij de theoretische massawet voor enkelvoudige wanden kan voor dubbele constructies ook een massawet worden afgeleid. Deze heeft dezelfde bezwaren als de theoretische massawet voor enkelvoudige constructies: de buigstijfheid wordt niet in rekening gebracht. Het opnemen van de buigstijfheid van beide spouwbladen in de beschouwing is

wiskundig dermate ingewikkeld, dat we volstaan met de beschrijving van het gedrag van dubbele constructies en het aangeven van de invloed van de buigstijfheid daarop. Vergelijken we de luchtgeluidisolatiekromme van dubbele wanden zonder koppelingen met die van enkele wanden, fig.4.17., en denken we daarbij in termen van massawetten, dan is het volgende te constateren:

- voor frequenties beneden f_0 is de geluidisolatie van de dubbele wand even hoog als die van de even zware, enkelvoudige wand;
- voor frequenties rond f_0 blijft de geluidisolatie van de dubbele wand achter bij die van de enkele als gevolg van massa-veer-resonanties,
- voor frequenties boven f_0 stijgt de geluidisolatie van de dubbele wand sneller bij toenemende frequentie dan die van de enkele wand, eerst 18 dB/octaaf, later 12 dB/octaaf; hier ligt de winst van de dubbele wand ten opzichte van de enkele;
- de geluidisolatie van een dubbele wand kan verslechterd worden door de zogenaamde spouwresonanties, staande luchtgeluidgolven in de spouw; in de richting loodrecht op beide spouwbladen zijn de hierbij te berekenen resonantiefrequenties f_n :

$$f_n = \frac{n \cdot c}{2d} \quad n = 1, 2, \dots \quad (4-60)$$



Figuur 4.17. Geschematiseerde luchtgeluidisolatiecurve:
 -----: enkelvoudige homogene plaat
 ———: dubbele wandconstructie

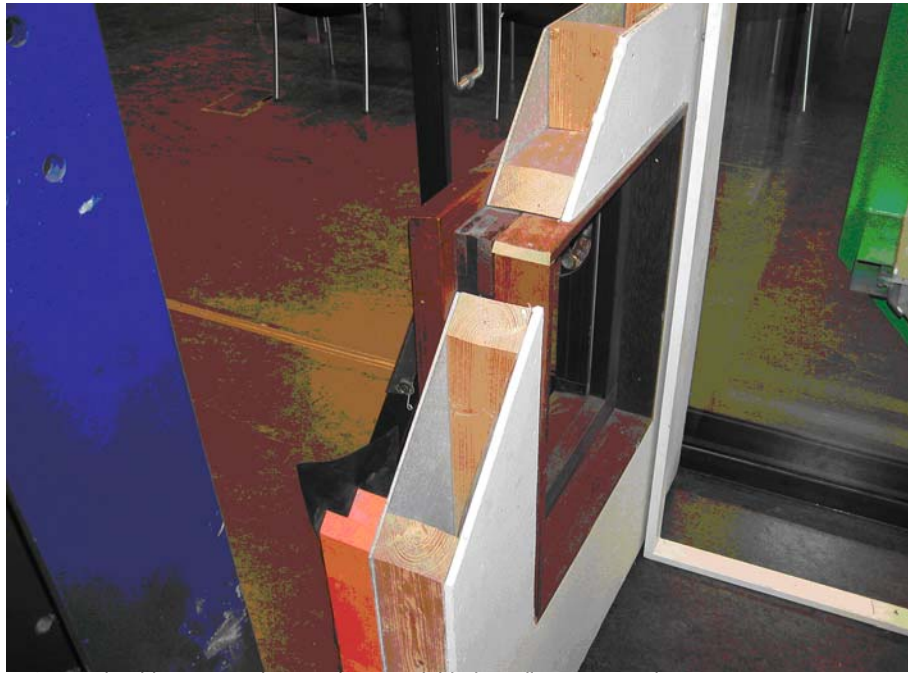
Het aanbrengen van poreus geluidabsorberend materiaal in de spouw kan de invloed van spouwresonanties, vooral bij lichte dubbele wanden, sterk doen verminderen.

Ook bij dubbele wanden wordt de geluidisolatie verlaagd door het optreden van het coïncidentie-effect, als gevolg van de buigstijfheid. Bij dubbele wanden is dit effect het duidelijkst te zien wanneer de beide spouwbladen dezelfde grensfrequentie bezitten. Is dit niet het geval, dan wordt de "dip" bij de grensfrequentie f_{g1} "opgevangen" door de hoge isolatie van het tweede spouwblad. Dit is dan ook de reden dat akoestisch goed isolerende beglazingen vaak twee glasvlakken met ongelijke dikte hebben.

In de praktijk wordt de geluidisolatie van dubbele wanden helaas vaak verlaagd door de aanwezigheid van (gewilde en ongewilde) koppelingen. Tevens zal de invloed van geluidoverdracht via nevenwegen (flankerende geluidoverdracht en omweggeluid) op de geluidisolatie tussen twee vertrekken groter zijn, naarmate de directe geluidoverdracht lager is, zoals bij een goed uitgevoerde koppelingloze dubbele constructie. Figuur 4.18 toont een opengewerkt voorbeeld van een dubbelwandige constructie (stijl- en regelwerk met aan beide zijden een plaatmateriaal).

2.6. Flankerende geluidoverdracht

Zoals in paragraaf 3.1 al kort aan de orde is gesteld, vindt geluidoverdracht tussen twee ruimten plaats via diverse overdrachtswegen. Daarvan is tot nu toe alleen de directe geluidoverdracht behandeld. We besteden nu enige aandacht aan de zogenaamde flankerende geluidoverdracht



Figuur 4.18. Voorbeeld van een doorsnede over dubbelwandige constructie.

Een flankerende overdrachtsweg kan in drie gedeelten worden opgesplitst:

- a: een begrenzingsvlak van het zendvertrek, de directe scheidingsconstructie of een daaraan grenzend vlak, wordt door luchtgeluid in (buig)trilling gebracht;
- b: de door luchtgeluid veroorzaakte constructietrillingen worden gedeeltelijk over de kruising getransporteerd naar een begrenzingsvlak aan de ontvangzijde, de rest van de trillingsenergie wordt gereflecteerd of afgevoerd naar de andere vlakken;
- c: de in het begrenzingsvlak aan de ontvangzijde aanwezige trillingsenergie wordt in het ontvangvertrek als luchtgeluid afgestraald.

De energie-overdracht volgens a, b en c kan dus plaatsvinden:

- van een flankerend vlak naar een flankerend vlak;
- van een flankerend vlak naar het scheidingsvlak;
- van het scheidingsvlak naar een flankerend vlak;

In totaal zijn er dus 12 flankerende wegen bij 2 rechthoekige ruimten. De totale energie-overdracht langs deze 12 wegen, de flankerende geluidoverdracht, bepaalt de verslechtering van de directe geluidisolatie. De invloed van de flankerende overdracht op de luchtgeluidisolatie is groter naarmate:

- èn het directe scheidingsvlak beter isoleert;
- èn het oppervlak van de flankerende vlakken groter is dan het oppervlak van het scheidingsvlak: een groot oppervlak kan immers meer vermogen afstralen.

In de praktijk betekent dit dat de invloed van de flankerende overdracht zich beperkt tot verslechtingen van de directe isolatie van ongeveer 2 - 4 dB. In de wandeling wordt een verslechting van 2 dB een "normale" flankerende overdracht genoemd. Een meer dan normale flankerende overdracht wordt voornamelijk veroorzaakt, door lichte buigstijve wanden ($30 \text{ kg/m}^2 < m < 100 \text{ kg/m}^2$ met $200 \text{ Hz} < f_g < 1000 \text{ Hz}$) die star gekoppeld zijn aan het scheidingsvlak. Bij dubbele constructies, zoals bijvoorbeeld ankerloze spouwmuren, kan met een goede detaillering flankerende overdracht sterk worden onderdrukt. We dienen ons het karakter van de flankerende overdracht terdege te realiseren bij gewenste verbeteringen van de geluidisolatie in praktijksituaties. Verwachte verbeteringen van 10 à 15 dB bijvoorbeeld door plaatsing van

voorzetwanden e.d. voor het directe scheidingsvlak, worden vaak niet bereikt doordat de overdracht via flankerende wegen de isolatie gaat bepalen. In extreme gevallen dient men dan zelfs complete doos-in-doos constructies te bouwen om zowel de directe als de flankerende overdracht te verminderen.

3. Ontwerpen met geluid

3.1. Toepassing van absorptiematerialen

3.1.1. Geluidreductie in een ruimte

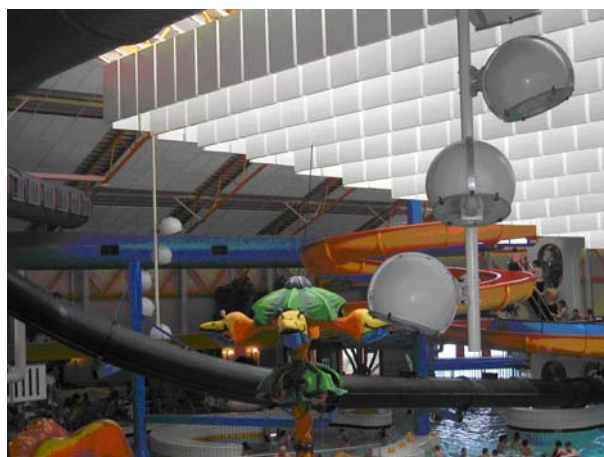
Het zal duidelijk zijn dat het effect van het aanbrengen van geluidabsorberend materiaal in een harde ruimte (lage A) zeer goed merkbaar is, doch dat het toevoegen van geluidabsorptie aan een redelijk dode ruimte (hoge A) nauwelijks nog effect heeft. In de praktijk hebben we zelden een diffuus geluidveld. Het geluiddrukkniveau is dichtbij een bron weinig afhankelijk van A, maar wel van de afstand tot de bron. Het effect van geluidabsorberende materialen op het geluiddrukkniveau is dan pas merkbaar op grotere afstanden tot de bron, zoals iedereen uit ervaring weet. Een betere benadering van het geluidveld bestaat eruit dat we het waargenomen geluid beschouwen als de som van het direct van de bron komende geluid en het totaal aan geluid dat via reflecties tegen de ruimteomhulling arriveert, het indirecte of galmgeluid:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (4-61)$$

Op afstand r_g tot de bron, de zogenaamde galmstraal, zijn de bijdragen van het directe geluid en het indirecte (diffuse) geluid even groot:

$$r_g = \sqrt{\frac{QA}{16\pi}} [m] \quad (4-62)$$

Het geluiddrukkniveau verloopt met toenemende afstand tot de bron voor een direct veld (vrij veld: -6 dB per afstandsverdubbeling) anders dan voor een indirect veld (diffuus veld: onafhankelijk van de afstand). De galmstraal neemt toe door vergroting van de geluidabsorptie en bij een bron met een hogere richtingsfactor, zoals bijvoorbeeld een luidsprekerzuil.



Figuur 4.19. Geluidreductie in een zwembad door toepassing van baffles (hangende mineraalwolplaten ingepakt in een vezeldicht vlies).

3.1.2. Geluiddemping in ventilatiekanalen

Bij een mechanische ventilatie-inrichting worden via kanalen ruimten gekoppeld aan een centrale luchttoevoer of -afvoer. Door dit kanalsysteem kan het geluid van de ventilator overgebracht worden naar de ruimte (stoorlawaaï) en kunnen tevens ruimten met elkaar in contact gebracht worden (overspraak). Door het inwendig bekleden van de kanalen met geluidabsorberend materiaal (van glasvlies voorziene minerale wol, ductliner of opencellig schuimrubber, e.d.) kan echter een zekere geluidreductie worden bewerkstelligd. Het meest effectief is absorptiemateriaal voor en na de laatste bochten. Wanneer zeer veel demping wordt vereist dan is relatief veel lengte bekleed kanaal nodig, of wel het opnemen van speciale geluiddempers in het systeem. Geluiddempers zijn in vele varianten in de handel. De meest bekende zijn de coulissendempers (fig. 4.20., rechter foto), waarbij dikke schotten geluidabsorberend materiaal als het ware in het kanaal worden opgenomen. Hoe meer geluiddemping in het systeem vereist is, des te groter zal het drukverlies over het systeem zijn, waardoor soms extra hoge lichtsnelheden in een kanaal nodig blijken. Te hoge lichtsnelheden in een kanaal kunnen op zich weer een bron voor geluidopwekking vormen.



Figuur 4.20. Ronde geluiddempers voor kleine en coulissendempers voor grote luchtbehandelingsystemen.

3.1.3. Echo-onderdrukking

In een omsloten ruimte is er sprake van direct geluid, nuttige reflecties en hinderlijke reflecties. Deze laatste worden om hun sterkte en late tijdstip van arriveren ook wel echo's genoemd. Een echo komt altijd van een hard reflecterend vlak, dan wel van een hol gekromd vlak, waardoor geluidstralen gebundeld worden. Een speciale vorm van echo is een flutter. Deze ontstaat tussen twee harde evenwijdige vlakken. De geluidgolven weerkaatsen zonder al te veel energieverlies tussen deze vlakken en worden als een metaalachtige ratel gehoord. Door nu de betreffende reflecterende oppervlakken geluidabsorberend te bekleden of uit te voeren, kunnen echo's effectief onderdrukt worden (fig. 4.21.).



Figuur 4.21. In enkele hallen van het sportcentrum van de TU/e zijn geluidabsorberende 'deken's' (zachte vulling in 'geperforeerde hoezen') aangebracht ter onderdrukking van flutterecho's, veroorzaakt door lucht- en contactgeluid (bal tegen muur).

3.1.4. Nagalmtijd verkorten

Voor specifieke functionele ruimten dient de nagalmtijd binnen zekere grenzen te liggen (auditoria, concertzalen). Een ruimte met een te lange nagalmtijd wordt veelal als onaangenaam ervaren (constructiewerkplaats). In zo'n geval noemt men 'de akoestiek' van de ruimte slecht. Uit formule (4-63) blijkt dat de nagalmtijd is te verkorten door het toevoegen van extra absorptie

$$T = \frac{1}{6} \frac{V}{A} \approx 0,16 \frac{V}{A} \quad (4-63)$$

aan de ruimte. Zowel T als A zijn hierbij frequentie-afhankelijk. Voor het treffen van maatregelen is het wel zaak de nagalmtijd te meten voor de middenfrequenties van de octaafbanden van 125 .. 4000 Hz. Het toevoegen van extra absorptie is in veel gevallen eenvoudiger dan het verkleinen van het volume, wat een zelfde effect bewerkstelligt.

3.2. Niet akoestische eigenschappen van absorptiematerialen

De keuze van toe te passen geluidabsorberende materialen zal op de eerste plaats afhangen van de absorptiekaracteristiek van het materiaal. In veel situaties zal de benodigde hoeveelheid absorptie alleen te realiseren zijn door het combineren van verschillende materiaalsoorten. Het zal duidelijk zijn dat de architect niet zo maar willekeurige materialen, alle met hun eigen uiterlijk (textuur), door elkaar toepast in een ruimte alleen vanwege de akoestiek. Hiermee samenhangend zullen eisen gesteld kunnen worden aan de mogelijkheid van schoonmaken of onderhouden. Vooral in ziekenhuizen en keukens zullen hygiënische eisen worden gesteld. Verder kan de brandweer eisen stellen aan de brandwerendheid (vlamoverslag, rookontwikkeling) van in een ruimte toe te passen materialen. Zeker in ruimten waar veel mensen samenkomen zal dit het geval zijn. Ook in ruimten waar sprake is van een verhoogd risico, zoals bij laswerkzaamheden en bepaalde laboratoriumwerkzaamheden. In bepaalde vochtige ruimten zal geen hygroscopisch materiaal mogen worden toegepast. Afhankelijk van de plaats van aanbrengen van geluidabsorberend materiaal zullen zeker ook eisen gesteld kunnen worden aan de mechanische eigenschappen (sterkte en stijfheid). Maar al te vaak zijn zachtere materialen erg uitnodigend gebleken om er met vingers of andere puntige voorwerpen in te prikken en ze zo onherstelbaar te beschadigen. Een ander belangrijk aspect, dat vooral geldt voor de poreuze materialen, is dat deze veelal een lage λ -waarde (warmtegeleidingscoëfficiënt) hebben, waardoor ze thermisch goed isoleren. Het vervelende is, dat ze om akoestische redenen aan de thermisch verkeerde kant van de constructie moeten worden toegepast (thermisch isolerende materialen altijd aan de koude zijde aanbrengen). Het moet in de meeste gevallen dan ook worden afgeraden, akoestische materialen van bovengenoemd type op buitenmuren of onder tegen daken aan te brengen. Tenslotte zal bij de keuze van de in aanmerking komende materialen ook de duurzaamheid een belangrijke rol kunnen spelen. In bepaalde gevallen, bijvoorbeeld bij toepassing van geluidabsorberende materialen in luchtbehandelingskanalen of boven verlaagde plafonds, kan de stofvrijheid en onderlinge samenhang van het materiaal (stuifvrijheid) van belang zijn. Bovenstaande moge duidelijk maken, dat bij de selectie van geluidabsorberende materialen voor specifieke toepassingen nogal wat overwegingen een rol kunnen spelen.

3.3. Praktische geluidwering

De akoestische kwaliteit van een gebouw kan niet los worden gezien van zijn omgeving en het daarbij behorende geluid. Gebruik en beleving van tuin, terras, serre en balkon hangen

bijvoorbeeld ook af van het omgevingsgeluidniveau. Een te hoge geluidbeslating op één of meer gevels beperkt de indelingsvrijheid van een plattegrond. Geluidgevoelige ruimten moeten dan aan de geluidluwe zijde worden geplaatst. Bij geluidbelastingen van meer dan 55 dB(A) zijn extra geluidwerende voorzieningen aan gevel en dak nodig. Bij een geluidbelasting van 65 dB(A) of meer wordt het realiseren van de vereiste geluidwering technisch moeilijker en dus ook kostbaarder. In een zeer stille omgeving is het geluid uit een aangrenzend gebouw eerder waarneembaar. Waar normaal kan worden volstaan met het voldoen aan wettelijke eisen is dan een hogere waarde voor de geluidwering vereist. Geluidwering moet bij het ontwerpen extra aandacht krijgen. Voor de bouwkundig ontwerper zijn daarom de volgende aanwijzingen van belang.

3.3.1. Bescherming tegen geluid van buiten

- Plaats geluidgevoelige ruimten aan de geluidluwe zijde;
- Houd het glasoppervlak klein;
- Gebruik geen draaiende delen (ramen en deuren) in de geluidbelaste gevel;
- Gebruik een mechanisch ventilatiesysteem of suskast (fig. 4.22);



Figuur 4.22. Doorgezaagde suskast: natuurlijke ventilatie en geluidwering (mineraal-wolvulling!) in één.

3.3.2. Geluidwering tussen ruimten

- De woningscheidende constructie bepaalt de lucht- en contactgeluidisolatie;
- Een (slaap)kamer onder een hellend dak vraagt om extra maatregelen en is uitvoeringsgevoelig;
- Gebruik geen schoonmetselwerk voor een woningscheidende wand;
- Plaats geen wandcontactdozen tegenover elkaar in een woningscheidende wand;
- Voorkom omloopgeluid via het luchtkanalen;
- Voorkom omloop geluid via relecterende vlakke zoals openstaande ramen bij gespiegelde ruimten of woningen;
- Zorg voor het afdichten van leidingdoorvoeren en cv-installaties door kamerscheidende wanden en vloeren;
- Let op situering van geluidgevoelige en geluidintensieve ruimten;
- Gebruik geen openhaard met gemeenschappelijk schoorsteen-kanaal;
- Bij gebruik van parket- of tegelvloer een speciale tussenlaag aanbrengen en het geheel vrijhouden van de omringende wanden;
- Zorg voor een trillingsvrije oplegging van een gemeenschappelijke trap;
- Plafonds in gemeenschappelijke ruimten geluidabsorberend uitvoeren.

3.3.3. Bescherming tegen geluid van installaties

- Gebruik geluidarme installaties;
- Installaties verend ondersteunen of ophangen;
- Regel de installaties goed af;
- Plaats de installaties in een aparte ruimte;
- Plaats het sanitair vrij van de woningscheiding;
- Bevestig geen leidingen star tegen woningscheidende constructie

Literatuur

- [1] Bakker, F.E; Hak C.C.J.M.; Schellen, H.L. **(2003)**. Dictaat 7S200 "Bouwfysisch ontwerpen 2" , TU/e fac B
- [2] Bobran, H. **(1967)**. "Handbuch der Bauphysik", Frankfurt, Ullstein.
- [3] Brüel en Kjær **(1980)**. "Architectural Acoustics".
- [4] ISO-354 **(1985)**. Measurement of Absorption in a Reverberation Room.
- [5] Kosten, C.W. **(1972)**. "Bouwfysica", 3^e druk, Delftsche Uitgeversmij.
- [6] Linden, A.C. van der e.a. **(1996)**. "Bouwfysica", Spruyt, Van Mantgem & De Does bv, Leiden.
- [7] Luxemburg, L.C.J. v. en Martin, H.J. **(1984)**. "Jellema Bouwkunde 7a", Waltman, Delft.
- [8] Müller, M. en Möser, M. **(2004)**. "Taschenbuch der Technischen Akustik", 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

