

# Post HBO Bouwfysica: Geluid 1



Deel A:

## Geluid en Ruimte

2009

Ir. C.C.J.M. Hak



---

# Inhoudsopgave

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Geluid en Ruimte</b>                                     | <b>5</b>  |
| 1. Gebouw en geluid                                         | 5         |
| 1.1. Wat is geluid?                                         | 5         |
| 1.2. Voortplanting van geluid in lucht                      | 6         |
| 1.3. Geluiddruk                                             | 6         |
| 1.4. Het geluiddrukkniveau                                  | 6         |
| 1.5. De decibel                                             | 7         |
| 1.6. Het geluidvermogen                                     | 8         |
| 1.7. Het geluidvermogeniveau                                | 8         |
| 1.8. De geluidintensiteit                                   | 8         |
| 1.9. Het geluidintensiteitsniveau                           | 9         |
| 1.10. Het rekenen met decibels                              | 9         |
| 1.11. Geluid buiten                                         | 12        |
| 1.12. Verschillende typen geluidbronnen                     | 12        |
| 1.12.1. Een bolbron in het vrije veld                       | 12        |
| 1.12.2. Een bolbron op een hard oppervlak in het vrije veld | 14        |
| 1.12.3. Een bolbron in een tweevlakshoek in het vrije veld  | 14        |
| 1.12.4. Een bolbron in een drievlakshoek in het vrije veld  | 15        |
| 1.12.5. Een lijnbron                                        | 15        |
| 1.12.6. Een vlakbron                                        | 16        |
| 1.13. Geluid binnen                                         | 17        |
| 1.13.1. Diffuus geluidveld                                  | 17        |
| 1.13.2. Nagalm                                              | 19        |
| 1.13.3. Nagalmtijd                                          | 20        |
| 1.14. Zuivere tonen                                         | 20        |
| 1.15. Frequentieanalyse                                     | 21        |
| 2. Mens en geluid                                           | 24        |
| 2.1. Het menselijk oor                                      | 24        |
| 2.2. Isofonen                                               | 25        |
| 2.3. dB(A)'s                                                | 25        |
| 2.4. Fluctuerende geluiden                                  | 26        |
| 2.5. Het equivalente geluidniveau in dB(A)                  | 26        |
| 2.6. Geluidcriteria                                         | 28        |
| 3. Ontwerpen met geluid                                     | 29        |
| 3.1. Direct/diffuus geluidverdeling                         | 30        |
| 3.2. Ruimteform en volume                                   | 32        |
| 3.3. Zicht                                                  | 35        |
| 3.4. Materiaalkeuze en nagalmtijd                           | 37        |
| 3.5. Diffusiteit                                            | 39        |
| 3.6. Stoomniveau                                            | 40        |
| 3.7. Elektro-akoestische hulpmiddelen                       | 40        |
| 3.7.1. Toesprekinstallaties                                 | 41        |
| 3.7.2. Installaties voor muziekweergave                     | 41        |
| <b>Literatuur</b>                                           | <b>43</b> |



---

# Geluid en ruimte

## 1. Gebouw en geluid

Aan geluid in gebouwen kunnen we twee aspecten onderscheiden:

1. geluidhinder
2. akoestische kwaliteit van een ruimte

We willen verkeerslawaaai buitensluiten, we willen geen auditieve getuige zijn van burenruzies, we willen in de woonkamer verstoken blijven van de geluiden die onze huisgenoten op het toilet maken en we willen in onze slaap niet gestoord worden door het geluid van de centrale verwarming. Kortom we willen gebouwen waarin we niet gehinderd worden door geluid. Omgekeerd willen we ook niet dat gebouwen geluidhinder veroorzaken naar hun omgeving (denk aan een disco).

De akoestische kwaliteit van een ruimte is afhankelijk van de geometrie d.w.z. van de vorm en de afmetingen van de ruimte én van de afwerking van de scheidingsconstructies. Kleinere ruimten zoals we in woningen aantreffen geven akoestisch doorgaans weinig problemen, al kan een geheel betegelde badkamer al gauw onaangenaam "hol" klinken. Maar bij wat grotere ruimten is het met de akoestische kwaliteit altijd oppassen. Zeker als het ruimten betreft die geschikt moeten zijn voor spreken en/of muziek.

Om bij het ontwerpen van gebouwen rekening te kunnen houden met bovenstaande aspecten is kennis van geluid als natuurkundig verschijnsel nodig. Behandeld worden in dit hoofdstuk geluidsterkte en -frequentie, hoe er mee te rekenen en welke geluidbronnen we kunnen onderscheiden.

### 1.1. Wat is geluid?

Het lopen op grind, het doortrekken van een WC, pianospelen, een deur dichtdoen, dit alles brengt *geluid* voort. Wat geluid voortbrengt is in beweging. Die beweging veroorzaakt golven in de lucht: de lucht wordt in trilling gebracht. Die golven laten zich karakteriseren naar trillings*tempo* (toonhoogte) en trillings*sterkte* (luidheid). De eerste drukken we meestal uit met het aantal trillingen per seconde (bijbehorende eenheid hertz, symbool: Hz) de tweede kan op verschillende manier worden uitgedrukt. Meestal gebruiken we daarvoor de decibel (symbool: dB). Hoe we de decibel definiëren zien we later.

**Geluid:** drukschommelingen of trillingen die met het gehoor kunnen worden waargenomen

De schoenen en het grind, het water en de WC-pot, het hamertje en de snaar, de deur en het kozijn, het zijn mechanische systemen die geluid veroorzaken, het zijn geluidbronnen. Ze stoten luchtdeeltjes aan en brengen die zodoende in trilling. Deze in trilling gebrachte luchtdeeltjes stoten op hun beurt andere luchtdeeltjes aan etc. We kennen de proef waarbij een geluidbron geplaatst wordt onder een stolp waaruit de lucht wordt weggezogen: naarmate er meer lucht wordt weggezogen wordt het geluid zwakker en sterft geheel weg bij vacuüm. Voor voortplanting van geluid is dus een medium nodig. Dat beperkt zich overigens niet tot lucht. Geluid kan zich in gassen, vloeistoffen en vaste stoffen voortplanten.

**Infrasoon 'geluid':** trillingen met zo'n lage frequentie dat ze buiten het hoorbare spectrum vallen

**Ultrasoon 'geluid':** trillingen met zo'n hoge frequentie dat ze buiten het hoorbare spectrum vallen

**Longitudinale golf:** golf waarbij de bewegingsrichting van de deeltjes in het medium gelijk is aan de voortplantingsrichting van de golf

**Transversale golf:** golf waarbij de bewegingsrichting van de deeltjes loodrecht staat op de voortplantingsrichting van de golf

**Geluidssnelheid:** voortplantingssnelheid van een geluidsgolf door een medium

**Geluidsdruk:** momentane waarde van de bij de barometrische druk opgetelde drukvariëaties veroorzaakt door een geluidbron

Zoals we licht gedefiniëerd hebben aan de hand van het menselijk oog, definiëren we geluid aan de hand van het menselijk oor. Geluid noemen we golven, afkomstig van mechanische trillingen, waarvan de frequentie ligt binnen het bereik van het menselijk gehoor d.w.z. tussen de 20 Hz en 20.000 Hz. Onhoorbare trillingen met een lage frequentie noemen we *infrasoon* en onhoorbare trillingen met een hoge frequentie noemen we *ultrasoon*. Zoals er wel gesproken wordt van onzichtbaar licht, wordt er ook wel gesproken van onhoorbaar geluid. Volgens onze definitie echter bestaat onhoorbaar geluid (evenals onzichtbaar licht) dus niet.

## 1.2. Voortplanting van geluid in lucht

Luchtdeeltjes die door een geluidbron worden aangestoten komen in trilling. Dat wil zeggen dat ze zich bewegen om een evenwichtsstand. De richting waarin ze zich bewegen is gelijk of tegengesteld aan de richting waarin het geluid zich voortplant. We spreken van een *longitudinale golf* (In tegenstelling tot een *transversale golf* waarbij de bewegingsrichting van de deeltjes loodrecht is op de voortplantingsrichting). De snelheid waarmee de trilling wordt doorgegeven in de lucht is ongeveer 344 m/s. We noemen dat de *voortplantingssnelheid* ( $c$ ) van geluid wat iets anders is dan de snelheid van de luchtdeeltjes ( $v$ ).

De voortplantingssnelheid varieert met de stof. Walvissen communiceren met elkaar onder water waar geluid zich bijna 5 maal zo snel voortplant als in lucht.

## 1.3. Geluiddruk

Met de geluidsdruk wordt de sterkte van geluid beschreven als maat van de luchtdrukverandering als gevolg van een geluidbron. Zonder geluid is er sprake van een statische atmosferische luchtdruk. Deze bedraagt gemiddeld ongeveer 105 Pa (pascal [N/m<sup>2</sup>]). Een geluidsgolf gaat gepaard met drukschommelingen, zowel positief (overdruk) als negatief (onderdruk) ten opzichte van de atmosferische luchtdruk. Deze in de tijd variërende drukschommelingen noemen we de *geluidsdruk* (symbool  $p(t)$ , eenheid Pa). De  $p$  staat voor pressure en de  $(t)$  voor de tijd.

In figuur 1.6. zien we de geluidsdruk op een bepaalde plaats, veroorzaakt door een bepaalde bron, uitgezet tegen de tijd. We zien een om de 0-as golvende lijn.

Waardoor wordt nu de 'sterkte' van het geluid (de luidheid) zoals wij die ervaren, bepaald? Dat blijkt niet door de maximale geluidsdruk te zijn. Dat blijkt ook niet bepaald te worden door de gemiddelde geluidsdruk. Die is immers 0.

De luidheid blijkt af te hangen van wat we de effectieve geluidsdruk ( $p_{\text{eff}}$ ) noemen:

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{p^2(t)} \quad [\text{Pa}] \quad (1-1)$$

waarin:

|                  |   |                                                              |      |
|------------------|---|--------------------------------------------------------------|------|
| $p_{\text{eff}}$ | - | effectieve geluidsdruk                                       | [Pa] |
| $p$              | - | drukverschil t.o.v. atmosferische druk                       | [Pa] |
| $(t)$            | - | betekent dat we de gemiddelde druk over de periode $t$ nemen |      |

In woorden uitgedrukt is de effectieve geluidsdruk de wortel uit het gemiddelde kwadraat van de geluidsdruk over een bepaalde tijd  $t$  (en heeft dus altijd een positieve waarde). Dit wordt ook wel de RMS-waarde genoemd (Root Mean Square).

De effectieve geluidsdruk kan variëren van  $2 \cdot 10^{-5}$  (gehoordrempel) tot 200 Pa (pijngrens). Dit geldt bij een frequentie van 1000 Hz (zie paragraaf 2).

## 1.4. Het geluiddrukkniveau

In de praktijk gebruiken we doorgaans niet de effectieve geluidsdruk om de luidheid van een

geluid in uit te drukken. Waarom doen we dat niet? Om daarop een antwoord te geven moeten we even vooruitlopen op het onderwerp van hoofdstuk 2 'mens en geluid'.

De met ons oor waarneembare geluiden hebben een effectieve geluidsdruk die waarden kan aannemen van  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa (de gehoordrempel) tot 200 Pa (de pijngrens). Het betreft dus een zeer grote waardenrange; de bovengrens is een factor  $10^7$  groter dan de ondergrens. De wens om tot een hanteerbaardere grootte te komen resulteerde in het geluidsdrukniveau (symbool  $L_p$ , Level of pressure,):

$$L_p = 10 \lg \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \quad [dB] \quad (1-2)$$

waarin:

|           |   |                                        |      |
|-----------|---|----------------------------------------|------|
| $L_p$     | - | geluidsdrukniveau (level of pressure)  | [dB] |
| $p_{eff}$ | - | effectieve geluidsdruk                 | [Pa] |
| $p_0$     | - | referentiedruk ( $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) | [Pa] |

Het *geluidsdrukniveau* is dus de logaritme (met als grondgetal 10) van de verhouding tussen het kwadraat van de effectieve geluidsdruk en het kwadraat van een referentiedruk. Voor de laatste nemen we in het algemeen de waarde van  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa ( $p_0$ ), de gehoordrempel.

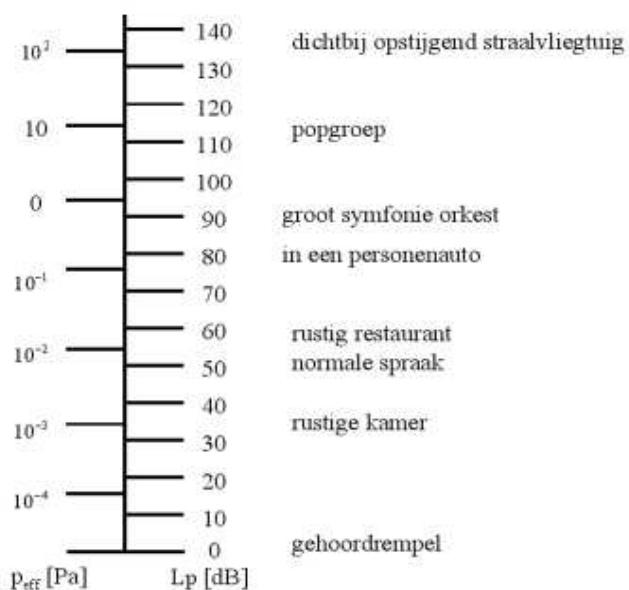
**Geluidsdrukniveau:** logaritmische maat voor de sterkte van geluid, zonder rekening te houden met de gevoeligheid van het oor

## 1.5. De decibel

$L_p$  is dus eigenlijk een dimensieloos getal maar afgesproken is daar de eenheid decibel (dB) aan te verbinden. Bel is een eerbetoon aan Alexander Graham Bell, de uitvinder van de telefoon, deci heeft betrekking op de factor 10 waarmee de uitkomst van de logaritme wordt vermenigvuldigd.

Met de decibel beschikken we over een eenheid in een overzichtelijke range van 0 dB (gehoordrempel) tot 140 dB (pijngrens), zie figuur 1.1.

Die overzichtelijkheid heeft wel een prijs; het rekenen met dB's is even wennen. In paragraaf 1.10 zullen we daarbij stilstaan.



Figuur 1.1. Voorbeelden van in de praktijk voorkomende geluidsdrukniveau.

**Geluidvermogen:** geluid-energie die per seconde door een geluidbron wordt uitgezonden



Figuur 1.2. Geluiddruk-niveaumeter.

1 decibel is ongeveer het kleinste verschil tussen twee geluidsdruk-niveaus dat met het menselijke oor net waarneembaar is onder ideale omstandigheden. Verschillen van 2 à 3 dB zijn duidelijker waar te nemen. Bij verschillen van 5 dB spreken we van een 'klasse' verschil in sterkte. Het is in de praktijk dan ook weinig zinvol om  $L_p$  in (veel) decimalen nauwkeurig te schrijven. We beperken ons tot 1 decimaal nauwkeurig.

## 1.6. Het geluidvermogen

Met het *geluidvermogen* wordt de sterkte van geluid beschreven als maat van de energiestroom die het geluid vertegenwoordigt. Geluid is een energiestroom; immers er is sprake van een hoeveelheid energie per tijdseenheid.

De geluidstroom die een bron, bijvoorbeeld een luidspreker, uitzendt kan dus uitgedrukt worden in W (watt = J/s). We noemen dat het geluidvermogen van een geluidbron. Het is wat verwarrend maar het symbool van geluidvermogen is (ook) de W. De analogie met bijvoorbeeld het elektrisch vermogen van een lamp en de capaciteit van een radiator is duidelijk. Beide zijn ook bronnen die energie uitzenden, zij het dat de vorm van de respectieve energiestromen verschilt. Maar in alle gevallen kunnen we spreken van het vermogen van de bron, uitgedrukt in W (watt).

De variatie in optredende geluidvermogens kan zeer groot zijn. Daarom gebruiken we ook hiervoor doorgaans een andere grootheid: het geluidvermogen-niveau.

## 1.7. Het geluidvermogen-niveau

Vergelijkbaar met het geluidsdruk-niveau kunnen we geluidvermogen-niveau als volgt definiëren:

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad [dB] \quad (1-3)$$

waarin:

|       |   |                                        |      |
|-------|---|----------------------------------------|------|
| $L_w$ | - | het geluidvermogen-niveau              | [dB] |
| $W$   | - | het geluidvermogen van de bron         | [W]  |
| $W_0$ | - | het referentievermogen ( $10^{-12}$ W) | [W]  |

Ook hier is eigenlijk sprake van een dimensieloze grootheid die we uitdrukken in dB's. Ter verduidelijking, zie rekenvoorbeeld 1.1.



## Rekenvoorbeeld 1.1.

*Gegeven:*

Een luidsprekerbron met een vermogen van 0,3 Watt (vergelijkbaar met het vermogen van een achterlichtje van een fiets).

*Gevraagd:*

Het (geluid)vermoggenniveau van de bron.

*Uitwerking:*

$$L_w = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{0,3}{10^{-12}} \right) = \underline{114,8 \text{ dB}}$$

*Toelichting:*

Een luidsprekerbox met een vermogen van 200 Watt zou volgens de theorie overeenkomen met een vermoggenniveau van meer dan 140 dB. Dit zou in de praktijk geluiddrukkniveaus kunnen opleveren vergelijkbaar met opstijgende straaljagers op zeer korte afstand. Echter, door het lage rendement van luidsprekerboxen (enkele procenten van het opgegeven vermogen) zal het in de praktijk 'meevallen' met het geproduceerde geluiddrukkniveau door een luidsprekerbox. Het grootste deel van de elektrische energie dat een box in gaat wordt omgezet in warmte. Hiermee is tevens duidelijk dat naast het vermogen van een luidsprekerbox ook het rendement moet worden opgegeven om een schatting te kunnen maken van het uiteindelijke geproduceerde geluid.

## 1.8. De geluidintensiteit

**Geluidintensiteit:** geluidenergie die per seconde op één vierkante meter valt

Zoals we de verlichtingssterkte uitdrukken in lumen/m<sup>2</sup> en de warmtestroomdichtheid in W/m<sup>2</sup> drukken we de *geluidintensiteit* uit in W/m<sup>2</sup>. De geluidintensiteit is de geluidstroomhoeveelheid door een (denkbeeldig) vlak van 1 m<sup>2</sup>. Dat vlak heeft een bepaalde plaats maar ook een bepaalde richting. De geluidintensiteit is dus plaats- en richtingsafhankelijk.

Als de intensiteit van het op ons oor vallende geluid 10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup> bedraagt kunnen we het nog net horen (gehoordrempel). De pijngrens wordt bereikt bij een intensiteit van ca 100 W/m<sup>2</sup>. Ook hier is weer sprake van een zeer grote range aan waarden en ook hier gebruiken we om die reden een vervangende grootheid: het geluidintensiteitsniveau.

## 1.9. Het geluidintensiteitsniveau

Het geluidintensiteitsniveau definiëren we als:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad (1-4)$$

waarin:

|       |   |                                                                   |                     |
|-------|---|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $L_I$ | - | geluidintensiteitsniveau                                          | [dB]                |
| $I$   | - | geluidintensiteit                                                 | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_0$ | - | referentiegeluidintensiteit (10 <sup>-12</sup> W/m <sup>2</sup> ) | [W/m <sup>2</sup> ] |

Ook het geluidintensiteitsniveau is dimensieloos en wordt uitgedrukt in dB's.

## 1.10. Het rekenen met decibels

In deze paragraaf schenken we aandacht aan het rekenen met decibels. We doen dat aan de hand van voorbeelden die betrekking hebben op geluiddruk(niveaus).

Stel we hebben twee geluidbronnen, dan geldt:

$$p_{eff1+2}^2 = p_{eff1}^2 + p_{eff2}^2 \quad [Pa^2] \quad (1-5)$$

Het berekenen van het totale geluidrukniveau ligt wat ingewikkelder. Met behulp van (1-2) kunnen we (1-5) herschrijven tot de logaritmische sommatieregel:

$$L_{p1+2} = 10 \lg \left( 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right) \quad [dB] \quad (1-6)$$

De sommatieregels (1-5) en (1-6) kunnen we bij meerdere geluidbronnen naar believen uitbreiden met evenzovele termen. Aan de hand van rekenvoorbeeld 1.2. verduidelijken we het gebruik van sommatieregel (1-6).

---

### Rekenvoorbeeld 1.2.

*Gegeven:*

Machine A produceert een geluidrukniveau van 83 dB

Machine B produceert een geluidrukniveau van 84 dB

Machine C produceert een geluidrukniveau van 85 dB

*Gevraagd:*

Het totale geluidrukniveau veroorzaakt door machine A, B en C gezamenlijk

*Uitwerking:*

$$L_{P_{totaal}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots \right) dB$$
$$L_{P_{totaal}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{83}{10}} + 10^{\frac{84}{10}} + 10^{\frac{85}{10}} \right) = \underline{88,8} \text{ dB}$$

---

Uit de algemene sommatieregel (1-6) kunnen we een aantal praktische vuistregels afleiden:

#### Vuistregel 1

Twee even sterke geluiden hebben samen een geluidrukniveau dat 3 dB hoger is dan het afzonderlijke niveaus:

$$L_{p1+2} = L_{p1} (\text{of } L_{p2}) + 3 \quad [dB] \quad (1-7)$$

De geluiden moeten dan wel onafhankelijk van elkaar zijn, d.w.z. dat  $L_{p1} = L_{p2}$  maar  $p_1(t)$  is ongelijk aan  $p_2(t)$ , dus gelijke effectieve geluiddruk, maar ongelijk drukverloop in de tijd. We kunnen hier ook uit afleiden dat sommatie van twee verschillende geluidrukniveaus nooit een geluidrukniveau kan opleveren dat meer dan 3 dB hoger is dan het hoogste.

#### Vuistregel 2

Drie even sterke geluiden hebben samen een geluidrukniveau dat (ca) 5 dB hoger is dan het afzonderlijke niveau, voor tien even sterke geluiden is dat 10 dB en voor 100 is dat 20 dB. Meer algemeen:

$$L_{p1...n} = L_{p1} + 10 \lg n \quad [dB] \quad (1-8)$$

Rekenvoorbeeld 1.3 laat een sommatie zien van 8 even sterke geluidbronnen.

---

### Rekenvoorbeeld 1.3.

*Gegeven:*

Acht identieke computers in een computerzaal produceren in het midden van de ruimte afzonderlijk een geluidrukniveau van 35 dB.

*Gevraagd:*

Het totale geluidrukniveau veroorzaakt door alle computers gezamenlijk.

*Uitwerking 1:*

$$L_{P\text{ totaal}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{35}{10}} + 10^{\frac{35}{10}} + 10^{\frac{35}{10}} + 10^{\frac{35}{10}} + 10^{\frac{35}{10}} + 10^{\frac{35}{10}} + 10^{\frac{35}{10}} + 10^{\frac{35}{10}} \right) = \underline{44,0 \text{ dB}}$$

*Uitwerking 2:*

$$L_{P\text{ totaal}} = 35 + 10 \lg(n) = 35 + 10 \lg 8 = 35 + 9 = \underline{44,0 \text{ dB}}$$

*Uitwerking 3:*

(m.b.v. vuistregel)

|            |    |    |    |       |    |    |    |    |
|------------|----|----|----|-------|----|----|----|----|
| computer   | 1  | 2  | 3  | 4     | 5  | 6  | 7  | 8  |
| $L_p$ [dB] | 35 | 35 | 35 | 35    | 35 | 35 | 35 | 35 |
|            |    | 38 |    | 38    |    | 38 |    | 38 |
|            |    |    | 41 |       |    | 41 |    |    |
|            |    |    |    | 44 dB |    |    |    |    |

---

### Rekenvoorbeeld 1.4.

*Gegeven:*

Machine A produceert een geluidrukniveau van 80 dB

Machine B produceert een geluidrukniveau van 80 dB

Machine C produceert een geluidrukniveau van 85 dB

Machine D produceert een geluidrukniveau van 76 dB

*Gevraagd:*

Het totale geluidrukniveau veroorzaakt door machine A, B, C en D gezamenlijk

*Uitwerking:*

$$A+B = 80 \text{ dB} + 80 \text{ dB} = 83 \text{ dB}$$

$$(A+B)+C = 10 \lg \left( 10^{\frac{83}{10}} + 10^{\frac{85}{10}} \right) = 87,1 \text{ dB}$$

$$(A+B+C)+D = 87,1 \text{ dB} + 76 \text{ dB} = 87,1 \text{ dB}$$

Het geluidrukniveau van machine D ligt meer dan 10 dB onder het niveau van de machines A+B+C. Het geluidrukniveau van machine D mag daarom worden verwaarloosd.

Het werkelijke geluidrukniveau (zonder gebruik te maken van vuistregels) kan als volgt worden berekend.

$$L_{P\text{ totaal}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{85}{10}} + 10^{\frac{76}{10}} \right) = \underline{87,5 \text{ dB}}$$

*Toelichting:*

Het verschil tussen de globale (snelle) berekening en de exacte berekening bedraagt 0,4 dB. Dit verschil is voor het gehoor te verwaarlozen.

### Vuistregel 3

Wanneer twee geluidsdrukniveaus meer dan 10 dB verschillen, is het totale geluidsdrukniveau (vrijwel) gelijk aan het hoogste geluidsdrukniveau. Sommeren heeft dan geen zin. Ga dit zelf na en zie ook rekenvoorbeeld 1.4.

## 1.11. Geluid buiten

Geluid gedraagt zich buiten anders dan binnen. We spreken van de vrije ruimte of ook wel van het vrije veld, als het geluid ongehinderd alle kanten op kan. De vrije ruimte kent dus geen obstakels. Een voorbeeld van een geluidbron in de vrije ruimte is een vliegend vliegtuig. Het geluid plant zich voort als een bol die steeds groter wordt. Bij een auto is al niet meer sprake van een vrije ruimte: de weg vormt een vlak waartegen de helft van het geluid weerkaatst. Je zou kunnen spreken van een halve vrije ruimte. Deze voorbeelden kunnen we uitbreiden met meerdere vlakken (zie hierna). Maar steeds gaat het om een geluidbron buiten; het geluid plant zich, al dan niet naar alle kanten, voort in de "oneindige" buitenruimte.

## 1.12. Verschillende typen geluidbronnen

Deze paragraaf gaat over verschillende typen geluidbronnen. Een geluidbron veroorzaakt een geluidveld met een karakteristiek die afhankelijk is van het type bron en van de ruimtelijke omstandigheid waarin de bron verkeert. We zullen zien welke typen bronnen we kunnen onderscheiden en hoe we, afhankelijk van de ruimtelijke conditie, de in de vorige paragraaf behandelde grootheden kunnen berekenen.

In de berekening kunnen veel geluidbronnen benaderd worden als één van de onderstaande ideaaltypen:

**Bolbron:** geluidbron waarbij in het vrije veld het geluidsniveau 6 dB per afstandverdubbeling afneemt

**Lijnbron:** geluidbron waarbij in het vrije veld het geluidsdrukniveau 3 dB per afstandverdubbeling afneemt

- een *bolbron*: deze straalt in alle richtingen (3 dimensionaal) evenveel energie uit, zendt dus bolvormige geluidgolven uit. De meeste 'losse' bronnen als huishoudelijke apparaten, compressoren, pompen, blaffende honden, afzonderlijke auto's kunnen vaak als een bolbron (meestal op een vlak: het aanrecht, de vloer, de weg, etc.) worden beschouwd.
- een *lijnbron*: een in één dimensie oneindig lange bron zendt evenveel energie uit in alle richtingen loodrecht op de lijn, zendt dus cilindervormige geluidgolven uit. Een aaneenschakeling van zeer veel losse geluidbronnen tot een lange rij kan worden geschematiseerd tot een lijnbron. Voorbeeld hiervan is een drukke verkeersweg of een file.
- een *vlakbron*: een in 2 dimensies oneindig grote bron zendt evenveel energie uit in alle richtingen loodrecht op het vlak, zendt dus vlakke geluidgolven uit. Bij een vlakbron kan gedacht worden aan een (dichtbij gelegen) gevel van een fabriekshal of ketelhuis.

In de praktijk komen bovenstaande typen niet in zuivere vorm voor (daarom zijn ze ook ideaaltypisch). Ter vereenvoudiging van het rekenwerk beschouwen we veel geluidbronnen toch als zodanig.

Hierna wordt nader ingegaan op de verschillende typen bronnen, eerst de bolbron, dan de lijnbron en tenslotte de vlakbron. Ze worden eerst geplaatst gedacht in de vrije ruimte (in het geheel geen reflecterende oppervlakken in de buurt), vervolgens tegen 1 of meerdere vlakken.

### 1.12.1. Een bolbron in het vrije veld

We nemen weer het voorbeeld van een vliegend vliegtuig. Elk punt op een afstand  $r$  van de bron ontvangt evenveel geluid. De verzameling van al deze punten is een bol met een oppervlakte van  $4\pi r^2$ . Op elke  $m^2$  van deze bol valt evenveel geluidvermogen.

De geluidintensiteit  $I$  (vermogen gedeeld door boloppervlakte) is dan:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [W / m^2] \quad (1-9)$$

waarin:

|     |   |                     |           |
|-----|---|---------------------|-----------|
| $I$ | - | geluidintensiteit   | $[W/m^2]$ |
| $W$ | - | geluidvermogen bron | $[W]$     |
| $r$ | - | afstand tot bron    | $[m]$     |

Dit is een wiskundige formulering van het ervaringsgegeven dat de sterkte van geluid in de vrije ruimte afneemt bij toenemende afstand tot de bron. We noemen dit verschijnsel de kwadratische afstandswet; net als de verlichtingssterkte, neemt de geluidintensiteit af, omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de bron.

Zowel de geluiddruk  $p$  als de geluidintensiteit  $I$  zijn bruikbaar als maat voor de sterkte van geluid. Er moet dus een verband bestaan tussen deze twee grootheden. Dat verband kunnen we als volgt uitdrukken:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad [W / m^2] \quad (1-10)$$

waarin:

|        |   |                                      |                              |
|--------|---|--------------------------------------|------------------------------|
| $I$    | - | geluidintensiteit                    | $[W/m^2]$                    |
| $p$    | - | geluiddruk                           | $[Pa]$                       |
| $\rho$ | - | dichtheid van het medium             | $[kg/m^3, \text{lucht}=1,2]$ |
| $c$    | - | voortplantingssnelheid in het medium | $[m/s, \text{lucht}=340]$    |

Dit verband geldt voor vlakke lopende golven in het vrije veld. Bol- en cilindergolven met een grote straal (dus golven op relatief grote afstand van de bron, d.w.z. groter dan enkele malen de afmeting van de bron) mogen we in goede benadering als vlakke lopende golven beschouwen. Zo eenvoudig als de vergelijking is waarmee het verband wordt uitgedrukt, zo omslachtig is de afleiding. We zullen deze hier dan ook niet geven.

## Intermezzo 1

Geluidrukniveau van een puntbron in het vrije veld (afleiding):

$$\text{geluidintensiteit } I = \frac{P_{\text{eff}}^2}{\rho c} [W / m^2] \quad (\rho c = 410 \text{ } Ns/m^3)$$

$$\text{geluidrukniveau } L_p = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{eff}}^2}{P_0^2} \right) [dB], \quad (P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ } Pa)$$

$$\text{geluidvermoggenniveau } L_w = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) [dB], \quad (W_0 = 10^{-12} \text{ } W)$$

$$W_{\text{bol}} = I \cdot 4\pi r^2, \quad I = \frac{P_{\text{eff}}^2}{\rho c} \Rightarrow W = \frac{P_{\text{eff}}^2}{\rho c} \cdot 4\pi r^2$$

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{eff}}^2}{P_0^2} \right) = 10 \lg \left( \frac{W \rho c}{P_0^2 4\pi r^2} \right)$$

( $W_0$  "inbrengen")

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) + 10 \lg \left( \frac{1}{4\pi r^2} \right) + 10 \lg \left( \frac{W_0 \rho c}{P_0^2} \right),$$

$$10 \lg \left( \frac{W_0 \rho c}{P_0^2} \right) \approx 10 \lg(1) = 0 \Rightarrow$$

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) + 10 \lg \left( \frac{1}{4\pi r^2} \right) = L_w + 10 \lg \left( \frac{1}{4\pi r^2} \right) [dB]$$

Met behulp van de definities voor het geluiddrukkniveau en het geluidvermogenkniveau kunnen we afleiden (zie intermezzo 1):

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{1}{4\pi r^2} \quad [dB] \quad (1-11)$$

Dit betekent dat het geluiddrukkniveau op een afstand  $r$  van een bolbron in de vrije ruimte 6 dB daalt bij elke verdubbeling van de afstand (factor 2 in de afstand is een factor 4 in de boloppervlakte en een factor  $\frac{1}{4}$  in de intensiteit:  $10 \lg \frac{1}{4} = -6$  dB. Ga na).

In de praktijk geldt dit verband voor elke niet te grote geluidbron in de vrije ruimte als de afstand ertoe groter is dan enkele keren de afmeting van de bron.

### 1.12.2. Een bolbron op een hard oppervlak in het vrije veld

Als we een bolbron plaatsen op een hard oppervlak (een auto op een betonweg of een ontruimingsalarm tegen een harde wand of gevel, zie figuur 1.3.), dan straalt deze bron zijn geluidenergie in een halve bol uit. De intensiteit wordt dus verdubbeld ten opzichte van het vorige geval (alle geluidenergie wordt verdeeld over een halve bol). Het geluiddrukkniveau stijgt dan met 3 dB:

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{1}{2\pi r^2} \quad [dB] \quad (1-12)$$

De afname van het geluiddrukkniveau bij afstandsverdubbeling blijft echter 6 dB!

### 1.12.3. Een bolbron in een tweevlakshoek in het vrije veld

Plaatsen we een bolbron in een tweevlakshoek (bijvoorbeeld de hoek tussen een gevel en een straat), dan straalt deze bron zijn geluidenergie in een kwart bol uit. Het verband tussen het geluiddrukkniveau en het geluidvermogenkniveau wordt dan:

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{1}{\pi r^2} \quad [dB] \quad (1-13)$$

Het geluiddrukkniveau stijgt dan met 6 dB t.o.v. de vrije ruimte. Ook hier neemt het geluiddrukkniveau binnen de hoek even snel af: 6 dB per afstandsverdubbeling. Voor toepassing kunnen we denken aan een open raam of ventilatierooster maaiveldhoogte in de aan de straat gelegen gevel.



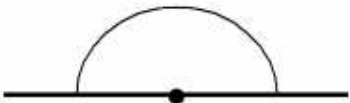
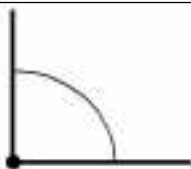
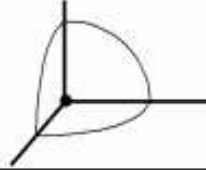
Figuur 1.3. Ontruimingsalarm: bolbron op hard vlak.

#### 1.12.4. Een bolbron in een drievlakshoek in het vrije veld

Net als in voorgaande voorbeelden kunnen we berekenen dat hier de verhoging van het geluidrukniveau 9 dB bedraagt ten opzichten van de vrije ruimte.

Bovenstaande kunnen we onderbrengen in één tabel, tabel 1.1.

Tabel 1.1. Posities van bolbronnen en de verhogingen van de geluidniveaus t. o. v. die van een bolbron in het vrije veld.

| Positie bolbron                                                                     | Geluidrukniveau-verhoging t.o.v. vrije veld | Afname per afstandverdubbeling |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|
|    | + 0 dB                                      | 6 dB                           |
|    | + 3 dB                                      | 6 dB                           |
|   | + 6 dB                                      | 6 dB                           |
|  | + 9 dB                                      | 6 dB                           |

De hierboven gebruikte vergelijkingen geven de relatie tussen het door een bolbron geproduceerde vermogen en het geluidrukniveau op een afstand  $r$  van de bron. Algemeen kunnen we schrijven:

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{Q}{4\pi r^2} \quad [dB] \quad (1-14)$$

$Q$  is hierin de zogenoemde richtfactor van de bolbron. Het is een maat voor de richtwerking van het geluid ten gevolge van bijvoorbeeld een of meer vlakken zoals hierboven behandeld is.  $Q$  is voor de bovenstaande gevallen dus respectievelijk 1, 2, 4 en 8 (ga na).

#### 1.12.5. Een lijnbron

Elk punt op afstand  $r$  van een lijnbron in de vrije ruimte ontvangt evenveel geluid. Al deze punten vormen een cilinder met de lijnbron in de as. Het geluidvermogen van een lijnbron drukken we uit in W/m. De oppervlakte van 1 m cilindermantel bedraagt  $2\pi r$ . De geluidintensiteit wordt:

$$I = \frac{W^1}{2\pi r} \quad [W / m^2] \quad (1-15)$$

waarin:

$W^1$  - geluidvermogen per m<sup>1</sup> [W]

Analoog aan de afleiding van het verband tussen geluiddrukkniveau en het geluidvermoggenniveau van een bolbron (zie intermezzo 1), kunnen we dat verband ook voor een lijnbron afleiden:

$$L_p = L_{w'} + 10 \lg \frac{1}{2\pi r} \quad [dB] \quad (1-16)$$

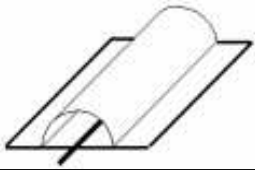
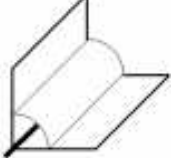
waarin:

$L_{w'}$  - geluidvermoggenniveau per  $m^1$  [dB]

Het geluiddrukkniveau van een lijnbron in de vrije ruimte neemt dus 3 dB af bij elke verdubbeling van de afstand. Dit treedt in de praktijk op bij (drukke) autowegen en spoorlijnen.

We kunnen de invloed van reflecterende oppervlakken op dezelfde manier bepalen als we bij de bolbron gedaan hebben (met uitzondering uiteraard van het driehoeksvlak). We krijgen dan onderstaande tabel:

Tabel 1.2. Posities van lijnbronnen en de verhogingen van het geluiddrukkniveau t.o.v. die van een lijnbron in het vrije veld.

| Positie bolbron                                                                     | Geluiddrukkniveau t.o.v. vrije veld | Afname per afstandverdubbeling |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
|    | + 0 dB                              | 3 dB                           |
|   | + 3 dB                              | 3 dB                           |
|  | + 6 dB                              | 3 dB                           |



Figuur 1.4. Een drukke verkeersweg kan worden geschematiseerd tot een lijnbron op een hard vlak.

### 1.12.6. Een vlakbron

Een vlakbron zendt in de vrije ruimte vlakke lopende golven uit. Bij een vlakbron (van oneindige afmetingen) wordt de geproduceerde geluidenergie door steeds hetzelfde oppervlak getransporteerd. De intensiteit en de geluiddruk blijven daardoor ook steeds hetzelfde.





*Figuur 1.5. Voorbeeld van een vlakbron (Ketelhuis TU/e).*

In de praktijk betekent dit dat dichtbij een groot vlak zoals een gevel het geluiddrukkniveau niet afneemt bij vergroting van de afstand. Wordt de afstand veel groter dan beide afmetingen, dan kunnen we het vlak beschouwen als een puntbron.

### 1.13. Geluid binnen

Hierboven hebben we steeds te maken gehad met geluidbronnen in de vrije ruimte, al dan niet geplaatst tegen 1 of meerdere vlakken. We richten nu onze aandacht op een binnenruimte, een ruimte die met scheidingsconstructies geheel afgezonderd is van de vrije ruimte. In zo'n binnenruimte gedraagt het geluid zich anders dan in de vrije ruimte. Het geluid wordt er immers door de scheidingsconstructies (wanden, vloer en plafond) weerkaatst. Toch dooft het meestal door verschillende oorzaken snel uit; het geluid verdwijnt. Dat gebeurt op verschillende manieren:

- Door doorlating  
Het invallende geluid brengt de scheidingsconstructie aan het trillen. Daardoor wordt ook de lucht buiten de ruimte aan het trillen gebracht; een deel van het geluid wordt dus doorgelaten. Hoeveel is afhankelijk van de constructie. Een rijstpapieren wand in een Japans huis laat gemakkelijker geluid door dan een wand van 300 mm beton. We spreken wel, analoog aan warmtetransmissie, van geluidtransmissie.
- Door dissipatie  
Door de trilling van de scheidingsconstructie wordt geluidenergie omgezet in warmte. We noemen dat dissipatie. Er treedt echter nog op een andere wijze absorptie op: in poriën van het materiaal aan het oppervlak van de scheidingsconstructie. Ook in die poriën wordt geluidenergie omgezet in warmte. De laatste vorm van dissipatie is dus een gevolg van een materiaaleigenschap, de eerste van een constructie-eigenschap.

Scheidingsconstructies zijn het onderwerp van Geluid en Constructie. Er zal daar nog uitvoerig worden ingegaan op wat hierboven is aangestipt. Voor de ruimteakoestiek is het vooral van belang hoeveel van de op een scheidingsconstructie vallend geluid weerkaatst wordt of hoeveel er van verdwijnt uit de ruimte. Hoe het eruit verdwijnt is hier niet van belang.

#### 1.13.1. Diffuus geluidveld

Door weerkaatsingen van het geluid komt het geluid niet alleen rechtstreeks van de bron tot ons (direct geluid), maar ook door weerkaatsing (indirect geluid). Het geluid in een ruimte komt dus van alle kanten tot ons. Als er van alle kanten evenveel geluid komt er is sprake van diffuus geluid. We spreken van een diffuus geluidveld als in elk punt van dat veld uit alle richtingen vlakke lopende golven met dezelfde intensiteit aankomen (evenveel geluid uit alle richtingen). In een diffuus geluidveld is de geluiddruk overal even groot. De geluidintensiteit op een willekeurig vlak in een diffuus geluidveld is overigens netto nul; er valt immers op de ene kant van het (denkbeeldige) vlak evenveel geluid als op de andere kant. Alleen de richtingen

zijn tegengesteld. Daarom is de geluidintensiteit, gezien de definitie, netto nul. In een diffuus geluidveld geldt:

$$I = \frac{p^2}{4\rho c} \quad [W / m^2] \quad (1-17)$$

Hierin is I de intensiteit van het aan één zijde op het oppervlak (zoals de wand van een vertrek) invallende geluid. Omzetting van geluidintensiteit en geluiddruk naar geluidintensiteitsniveau en geluiddrukkniveau levert:

$$L_I = L_p - 6 \quad [dB] \quad (1-18)$$

Hier staat dus dat het geluidintensiteitsniveau van geluid dat in een diffuus geluidveld aan één zijde van een vlak invalt 6 dB lager is dan het geluiddrukkniveau.

De relatie tussen geluiddrukkniveau en geluidvermogeniveau in een diffuus geluidveld is:

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{4}{A} \quad [dB] \quad (1-19)$$

Hierin is A de totale geluidabsorptie uitgedrukt in m<sup>2</sup> open raam. De geluidabsorptiecoëfficiënt van een open raam is 1, immers alle invallend geluid verdwijnt naar buiten en zijn we dus kwijt. Anders gezegd de reflectiecoëfficiënt is nul. Elke m<sup>2</sup> van een scheidingsconstructie kunnen we omrekenen in m<sup>2</sup> open raam (m<sup>2</sup> o.r.). Voorbeeld: 20 m<sup>2</sup> van een scheidingsconstructie heeft een absorptiecoëfficiënt  $\alpha$  van 0,4. De absorptie van die 20 m<sup>2</sup> is dan gelijk aan 20 x 0,4 = 8 m<sup>2</sup> o.r. In formulevorm:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad [m^2 \text{ open raam}] \quad (1-20)$$

waarin:

|            |   |                                       |                       |
|------------|---|---------------------------------------|-----------------------|
| A          | - | de totale geluidabsorptie             | [m <sup>2</sup> o.r.] |
| $\alpha_i$ | - | geluidabsorptiecoëfficiënt van vlak i | [-]                   |
| $S_i$      | - | oppervlakte van vlak i                | [m <sup>2</sup> ]     |

Het zal duidelijk zijn dat de totale geluiddruk op een willekeurig punt in een ruimte afhankelijk is van de afstand tot de bron (direct geluid) en de eigenschappen van de ruimte (nagalm). Het geluiddrukkniveau op een punt in die ruimte kunnen we bij benadering beschrijven met:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad [dB] \quad (1-21)$$

waarin:

|   |   |                         |     |
|---|---|-------------------------|-----|
| Q | - | richtfactor van de bron | [-] |
|---|---|-------------------------|-----|

We herkennen in bovenstaande vergelijking die van 1.14., de algemene vergelijking die geldt voor een bolbron buiten. Alleen is de vergelijking uitgebreid met 4/A om het effect van weerkaatsing/absorptie te verwerken. De vergelijking laat zien dat het geluiddrukkniveau binnen hoger is dan het buiten zou zijn. Hoe groter echter de A, des te minder het geluiddrukkniveau verschilt met dat onder buitencondities, op gelijke afstand tot de bron.

## Intermezzo 2

Geluidrukniveau van een bron in een diffuus veld (afleiding):

$$\text{geluidintensiteit } I_{\text{diff}} = \frac{P_{\text{eff}}^2}{4\rho c} \left[ W / m^2 \right], \quad (\rho c = 410 \text{ Ns}/m^3)$$

$$\text{geluidrukniveau } L_p = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{eff}}^2}{p_0^2} \right) [dB], \quad (p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa})$$

$$\text{geluidvermogeniveau } L_w = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) [dB], \quad (W_0 = 10^{-12} \text{ W})$$

$$W = I \cdot A, \quad I = \frac{P_{\text{eff}}^2}{4\rho c} \Rightarrow W = \frac{P_{\text{eff}}^2}{4\rho c} \cdot A$$

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{eff}}^2}{p_0^2} \right) = 10 \lg \left( \frac{W \cdot 4 \cdot \rho c}{A \cdot p_0^2} \right)$$

( $W_0$  "inbrengen")

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) + 10 \lg \left( \frac{1}{A} \right) + 10 \lg \left( \frac{W_0 \cdot 4 \cdot \rho c}{p_0^2} \right),$$

$$10 \lg \left( \frac{W_0 \cdot 4 \cdot \rho c}{p_0^2} \right) \approx 10 \lg(4) \Rightarrow$$

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) + 10 \lg \left( \frac{1}{A} \right) + 10 \lg(4) = L_w + 10 \lg \left( \frac{4}{A} \right) [dB]$$

In niet al te grote ruimten nemen we ter wille van de eenvoud vaak een diffuus geluidveld aan, zodat we simpele formules zoals de bovenstaande kunnen gebruiken. In grote ruimten, zoals fabriekshallen en kantoortuinen, zeker als ze een ingewikkelde vorm hebben, leidt deze aanname tot te onnauwkeurige uitkomsten.

We hebben een richtfactor nodig als de bron niet in alle richtingen evenveel geluid uitzendt. De richtfactor is de verhouding tussen de geluidintensiteit, gemeten recht voor de bron en de geluidintensiteit, indien alle energie gelijkmatig (bolvormig) over de bron zou zijn verdeeld. Voor een bron met een gelijkmatige uitstraling in een hele bol (een zuivere bolbron) geldt:  $Q = 1$ . Voor een stem in de richting van de luisteraar geldt:  $Q = 3$ . Voor een luidsprekerzuil gericht op de luisteraar geldt:  $Q = \text{ca. } 20$  (aan de achterzijde ervan geldt:  $Q = \text{ca. } 1/20$ ).

### 1.13.2. Nagalm

We weten allemaal uit ervaring wat een echo is; geluid komt rechtstreeks van de bron tot ons en even later (meestal maar een fractie van een seconde) bereikt het geluid, verzwakt, ons nogmaals. Wat ons in tweede instantie bereikt noemen we een echo. Echo is dus weerkaatst geluid. Het komt tot stand doordat het geluid ons bereikt langs twee (of meer) wegen. Deze wegen moeten wel voldoende in lengte verschillen anders ervaart ons gehoor slechts één geluid; de echo versterkt in de waarneming dan het eerste geluid. Maar als er tussen direct geluid en echo minstens 1/10 seconde verstrijken nemen we beide geluiden gescheiden waar. Als we buiten op een afstand van 17 meter van een muur in onze handen klappen zullen we dus 1/10 seconde later de echo van de klap horen (controleer).

We richten onze aandacht nu op de binnenruimte. Geluid wordt daarin weerkaatst door wanden, vloer en plafond. Weerkaatste geluidgolven planten zich opnieuw voort tot ze wederom weerkaatst worden, enz. Bij de voortplanting door de lucht gaat in het algemeen weinig geluidenergie verloren maar bij de weerkaatsing wordt veel geluid(energie) geabsorbeerd. Zodoende is na enige tijd een geluidsgolf uitgedoofd. Stopt de bron met het uitzenden van geluid, dan klinkt dat geluid nog enige ogenblikken na. Dat verschijnsel noemen we nagalm.

### 1.13.3. Nagalmtijd

**Nagalmtijd:** verstreken tijd tussen het moment van abrupt uitschakelen van een geluidbron en het moment waarop het geluidsdrukkniveau 60 dB is gedaald

De *nagalmtijd* is gedefinieerd als de tijd die zit tussen stoppen met uitzenden van het geluid en het moment dat het geluidsdrukkniveau 60 dB is gedaald. Deze nagalmtijd is een belangrijke parameter in de zaalakoestiek. Hij bepaalt in hoeverre de akoestiek van een zaal geschikt is voor zijn functie (zie tabel 1.6.)

Uit bovenstaande beschouwing kunnen we begrijpen dat de nagalmtijd van een binnenruimte samenhangt met zijn afmetingen (eigenlijk met hoeveel vlakken een geluidsgolf gedurende een bepaalde tijd op zijn weg tegenkomt). Ook kunnen we begrijpen dat de nagalmtijd samenhangt met de mate waarin de vlakken geluidabsorberend zijn. We kunnen het niet alleen begrijpen maar het stemt ook overeen met onze ervaring: een grote ruimte met betonnen wanden heeft een lange nagalmtijd en in een kleine ruimte met veel pluche door gordijnen, vloerkleden en meubilair ervaren we vrijwel in het geheel geen nagalm.

Langs experimentele weg lukte het de Amerikaan W.C. Sabine een relatie af te leiden tussen de ruimteafmetingen, uitgedrukt in het volume van de ruimte, de in de ruimte aanwezige geluidabsorptie en de nagalmtijd van die ruimte. Deze nagalmformule van Sabine luidt:

$$T_{60} = \frac{V}{6A} \quad [s] \quad (1-22)$$

waarin:

|          |   |                        |                       |
|----------|---|------------------------|-----------------------|
| $T_{60}$ | - | nagalmtijd             | [s]                   |
| $V$      | - | volume van de ruimte   | [m <sup>3</sup> ]     |
| $A$      | - | totale geluidabsorptie | [m <sup>2</sup> o.r.] |

V/A geeft niet de dimensie s. Om tot deze dimensie te komen moet 6 dimensie s/m hebben.

### 1.14. Zuivere tonen

Zoals we gezien hebben bepaalt de hevigheid waarmee de luchtdeeltjes bewegen in geluidgolven de sterkte van het geluid. We kunnen die hevigheid uitdrukken in de deeltjessnelheid ( $v$ ) maar ook in de geluidsdruk  $p$ . Aan die laatste geven we de voorkeur.

De wijze waarop de geluidsdruk in de tijd varieert, bepaalt het karakter van het geluid. De geluidsdruk kan regelmatig in de tijd verlopen maar ook volkomen onregelmatig, chaotisch.

Dat laatste is het geval met veruit het meeste geluid. Slechts bij uitzondering horen we geluid waarvan de geluidsdruk regelmatig verloopt. We spreken dan van een harmonische trilling, een *zuivere toon*. Een stemvork en een fluit produceren zo'n zuivere toon.

Ondanks het feit dat ze zo zeldzaam zijn, zijn we hier toch geïnteresseerd in die zuivere tonen omdat ze zich gemakkelijk wiskundig laten beschrijven en zo hun dienst kunnen bewijzen in de theoretische onderbouwing van geluid. We kunnen de geluidsdruk van een zuivere toon beschrijven met de volgende vergelijking:

$$p(t) = \hat{p} \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (1-23)$$

waarin:

|           |   |                                 |      |
|-----------|---|---------------------------------|------|
| $p(t)$    | - | tijdsafhankelijke geluidsdruk   | [Pa] |
| $\hat{p}$ | - | maximaal optredende geluidsdruk | [Pa] |
| $t$       | - | tijd                            | [s]  |
| $T$       | - | herhalingstijd of periode       | [s]  |

$T$  noemen we de herhalingstijd of periode van de harmonische trilling. Hij wordt uitgedrukt in seconden, immers na  $T$  seconden neemt  $p(t)$  dezelfde waarde weer aan.

De reciproke waarde  $1/T$  is het aantal trillingen dat per seconde wordt uitgevoerd. Dit noemen we de *frequentie*  $f$ , uitgedrukt in hertz (Hz) of ( $s^{-1}$ ):

**Zuivere toon:** toon met sinusvormig drukverloop in de tijd

**Frequentie:** aantal trillingen per seconde

$$f = \frac{1}{T} \quad [Hz] \quad (1-24)$$

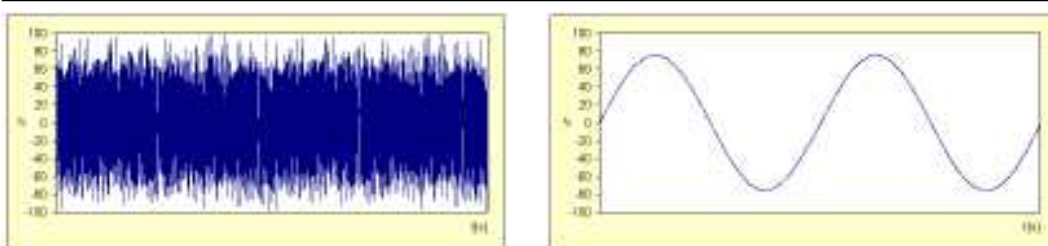
In een tijd, gelijk aan de periode  $T$  heeft het geluid een afstand  $cT$  afgelegd. Deze afstand noemen we de golflengte  $\lambda$  (m). Op plaatsen in een vlakke lopende golf die in de voortplantingsrichting op een afstand  $\lambda$  van elkaar zijn gelegen, bevinden de luchtdeeltjes zich in dezelfde fase (trillingstoestand). De golflengte  $\lambda$  is dus gelijk aan:

$$\lambda = cT \quad [m] \quad (1-25)$$

Met behulp van (1-24) kan dit geschreven worden als:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m] \quad (1-26)$$

Zoals gezegd hebben de meeste geluiden die wij waarnemen een chaotisch karakter; bij elke frequentie wordt in meerdere of mindere mate geluid geproduceerd. Van zo'n geluid kunnen we door meting wel bepalen hoe de geluidenergie over het hoorbare frequentiegebied (van 20 - 20.000 Hz) verdeeld is. Dat doen we door dit frequentiegebied op te delen in zogenoemde frequentiebanden. Door per frequentieband het geluidsdrukniveau te meten kunnen we de spectrale samenstelling van het geluid vastleggen. We zullen later zien dat we die informatie nodig hebben om uitspraken te kunnen doen over de mate van hinderlijkheid van een geluid en voor het nemen van maatregelen voor lawaaibestrijding.



Figuur 1.6. Grafisch weergave  $p(t)$  van een ruisachtig signaal en een zuivere toon (sinus).

## 1.15. Frequentieanalyse

In de akoestiek wordt er gebruik gemaakt van twee opdelingen van het hoorbare frequentiegebied.

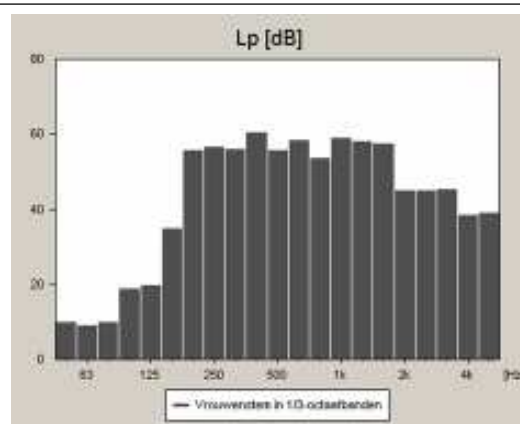
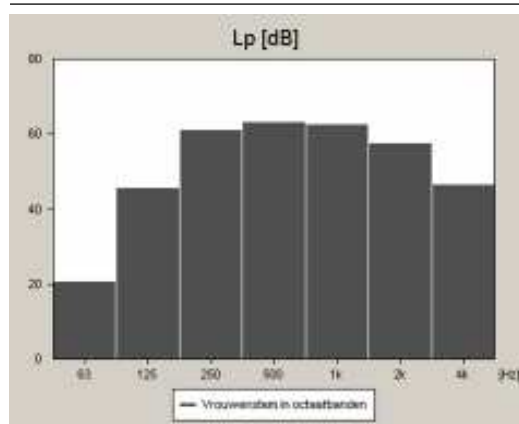
- De octaafbanden. Dit is een opdeling van het hoorbare frequentiegebied in 8 frequentiebanden.
- De 1/3-octaafbanden, ook wel tertsbanden genoemd. Dit is een opdeling in 24 frequentiebanden.

We spreken van een frequentieanalyse van een geluid als we het geluidsdrukniveau per frequentieband meten. We spreken van een octaafbandanalyse en van een tertsbandanalyse. De grafische weergave van zo'n analyse heet een octaafbandspectrum en een tertsbandspectrum. Figuur 1.7. geeft een voorbeeld van het resultaat van een octaaf- en tertsbandanalyse van een vrouwenstem.

Met een tertsbandanalyse rafelen we het geluid iets fijner uiteen dan met een octaafbandanalyse. In de bouwakoestiek geeft de octaafbandanalyse meestal een voldoende nauwkeurig beeld van het spectrum. De banden worden aangeduid met hun genormaliseerde middenfrequenties  $f_m$ . Ze staan vetgedrukt in tabel 1.3.

Tabel 1.3. Genormaliseerde frequentiebanden en hun middenfrequenties (vet) in Hz.

| $f_m$ (octaaf) | $f_{1(oct)} - f_{2(oct)}$ | $f_m$ (1/3-octaaf) | $f_{1(1/3 oct)} - f_{2(1/3 oct)}$ |
|----------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 63             | 44 - 88                   | 50                 | 44,7 - 56,2                       |
|                |                           | 63                 | 56,2 - 70,7                       |
|                |                           | 80                 | 70,7 - 89,1                       |
|                |                           | 100                | 89,1 - 112                        |
| 125            | 88 - 177                  | 125                | 112 - 141                         |
|                |                           | 160                | 141 - 178                         |
|                |                           | 200                | 178 - 224                         |
|                |                           | 250                | 224 - 282                         |
| 250            | 177 - 355                 | 315                | 282 - 355                         |
|                |                           | 400                | 355 - 447                         |
|                |                           | 500                | 447 - 562                         |
|                |                           | 630                | 562 - 708                         |
| 500            | 355 - 710                 | 800                | 708 - 891                         |
|                |                           | 1000               | 891 - 1122                        |
|                |                           | 1250               | 1122 - 1413                       |
|                |                           | 1600               | 1413 - 1778                       |
| 1000           | 710 - 1420                | 2000               | 1778 - 2239                       |
|                |                           | 2500               | 2239 - 2818                       |
|                |                           | 3150               | 2818 - 3548                       |
|                |                           | 4000               | 3548 - 4467                       |
| 2000           | 1420 - 2840               | 5000               | 4467 - 5623                       |
|                |                           | 6300               | 5623 - 7079                       |
|                |                           | 8000               | 7079 - 8913                       |
|                |                           | 10000              | 8913 - 11220                      |
| 4000           | 2840 - 5680               |                    |                                   |
|                |                           |                    |                                   |
|                |                           |                    |                                   |
|                |                           |                    |                                   |
| 8000           | 5680 - 11360              |                    |                                   |
|                |                           |                    |                                   |
|                |                           |                    |                                   |
|                |                           |                    |                                   |



Figuur 1.7. Octaaf- en tertsbandanalyse van een vrouwenstem.

De som van de geluidrukniveaus van alle frequentiebanden tezamen noemen we het totale geluidrukniveau, vaak aangeduid met "lineair" of "overall". Zie rekenvoorbeeld 1.5.

---

### Rekenvoorbeeld 1.5.

*Gegeven:*

Een geluidbron met het volgende gemeten tertsbandspectrum.

|                               |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Tertsband $f_m$ [Hz]          | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 |
| Geluidsdrukkniveau $L_p$ [dB] | 87  | 91  | 85  | 80  | 75  | 62  |

*Gevraagd:*

A Het geluidsdrukkniveau in de octaafbanden 125 Hz en 250 Hz.

B Het lineaire of overall geluidsdrukkniveau.

*Uitwerking:*

A

De 125 Hz-octaafband bestaat uit de 100 Hz-, de 125 Hz- en de 160-Hz tertsband. Energetisch sommeren van deze tertsband-geluidsdrukkniveaus levert het octaafband-geluidsdrukkniveau.

$$L_{p\ 125\text{Hz octaaf}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{87}{10}} + 10^{\frac{91}{10}} + 10^{\frac{85}{10}} \right) = \underline{93,2\ dB}$$

De 250 Hz-octaafband bestaat uit de 200 Hz-, de 250 Hz- en de 315-Hz tertsband.

$$L_{p\ 250\text{Hz octaaf}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{75}{10}} + 10^{\frac{62}{10}} \right) = \underline{81,2\ dB}$$

B

Het lineaire of overall geluidsdrukkniveau is het totale geluidsdrukkniveau, m.a.w. de energetische som van alle ongewogen octaafbandniveaus of alle ongewogen tertsbandniveaus.

$$L_{p\ \text{lineair}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{9,32}{10}} + 10^{\frac{8,12}{10}} \right) = \underline{93,5\ dB}$$

of

$$L_{p\ \text{lineair}} = 10 \lg \left( 10^{\frac{87}{10}} + 10^{\frac{91}{10}} + 10^{\frac{85}{10}} + 10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{75}{10}} + 10^{\frac{62}{10}} \right) = \underline{93,4\ dB}$$

---

## 2. Mens en geluid

Zoals we gezien hebben zijn licht en geluid twee zeer verschillende verschijnselen. Voor het waarnemen ervan heeft ons lichaam ook twee zeer verschillende organen. Toch zijn er natuurkundig overeenkomsten. Beide verschijnselen zijn golfverschijnselen. Dat wil zeggen dat ze te karakteriseren zijn met frequentie (aantal trillingen per seconde, Hz) en golflengte (in m). Als de ene gegeven is, is ook de andere bekend (immers  $\lambda = c/f$ ). Als de golflengte of frequentie van licht verandert, dan verandert de kleur en als de golflengte of frequentie van geluid verandert, verandert de toonhoogte.

Licht is een deel uit een heel breed spectrum van electromagnetische golven en geluid is een deel uit een heel breed spectrum van luchtgolven (we beperken ons hier tot geluid in lucht). Voor licht zijn dat EM-golven met een lengte tussen de 340 nm en de 780 nm. Voor geluid zijn dat luchtgolven met een lengte tussen de 17 m en de 17 mm of, liever gezegd, die met een frequentie tussen 20 en 20.000 Hz. Voor geluid gebruiken we eerder de frequentie dan de golflengte.

Zowel voor licht als voor geluid geldt natuurlijk ook nog dat de sterkte een bepaalde waarde dient te overschrijden om door onze zintuigen geregistreerd te kunnen worden. Net zoals het oog niet even gevoelig is voor golflengten van de hele range van 340 nm tot 780 nm, is het oor niet even gevoelig voor alle frequenties van de hele range van 20 tot 20.000 Hz.

### 2.1. Het menselijk oor

Populair gezegd zit er in ons oor een barometer met daaraan gekoppeld een harp. De barometer komt in werking als hij geraakt wordt door geluidgolven die immers luchtdrukverschillen veroorzaken. De harp zorgt ervoor dat we onderscheid kunnen maken in de frequentie van de geluidgolven of, anders gezegd, in de toonhoogte. De korte snaren van de harp worden in trilling gebracht door geluid met een hoge frequentie en de lange snaren door geluid met een lage frequentie.

Meer in detail bestaat het menselijk gehoorzintuig uit drie delen:

1. Het uitwendige oor
2. Het middenoor
3. Het binnenoor

Ad 1. De oorschelp en de gehoorgang vormen het uitwendige oor. De oorschelp helpt enigszins de richting van het geluid te bepalen. De gehoorgang fungeert als een



Figuur 1.8. Het menselijk oor.



frequentieselectieve pijp; het geeft frequenties tussen 2000 en 4000 Hz versterkt door. Het geluid waarmee de moeder met haar baby communiceert zou in deze range liggen, een prachtige, romantische veronderstelling. Tussen het uitwendige oor en het middenoor zit het trommelvlies (de barometer).

Ad 2. Achter het trommelvlies bevinden zich de gehoorbeentjes: hamer, aambeel en stijgbeugel. Ze brengen de trillingen versterkt over van het trommelvlies op het zogenoemde ovale venster. Dit bevindt zich tussen het middenoor en het binnenoor.

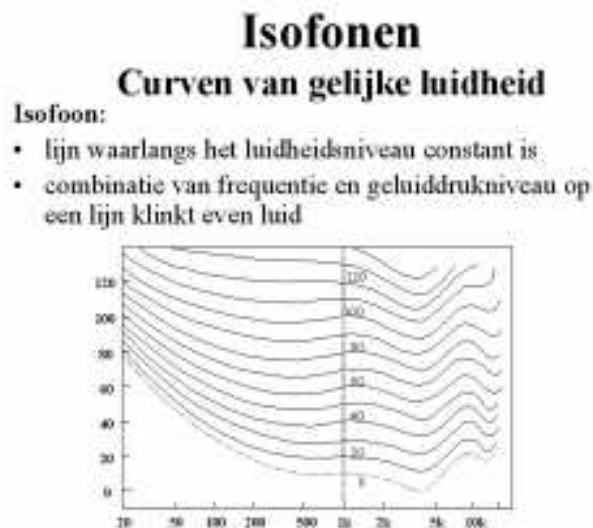
Ad 3. Het binnenoor bevat het met vloeistof gevulde slakkenhuis, waar de trillingen door middel van trilhaartjes (de harp) worden omgezet in signalen in de gehoorzenuwen.

## 2.2. Isofonen

De mens is wonderlijk goed in staat complexe geluiden uiteen te rafelen in afzonderlijke frequenties. Zoals eerder opgemerkt, worden niet alle frequenties door de mens even sterk waargenomen, ook al is hun geluidsdruk even groot. We ervaren bijvoorbeeld bij een gelijk geluidsdruk niveau een toon van 100 Hz minder luid dan een toon van 1000 Hz. Om de toon van 100 Hz even luid te laten klinken als die van 1000 Hz moet het geluidsdruk niveau bij 100 Hz verhoogd worden. Deze verhoging, uitgedrukt in dB's, geeft het verschil in oorgevoeligheid aan tussen 100 en 1000 Hz.

Deze eigenschap van het gehoor kan vastgelegd worden in zogenoemde isofonen (iso van gelijk en foon van geluid). Figuur 1.13 laat een aantal isofonen zien. We zien dat ten opzichte van 1000 Hz het menselijk gehoor ongevoeliger is naarmate de frequentie lager is, dat de maximale gevoeligheid rond de 3000 Hz ligt en dat de gevoeligheid weer afneemt bij nog hogere frequenties.

Een isofoon is een lijn waarvan op elk punt van de lijn het luidheidsniveau (uitgedrukt in foons) constant is, dat wil zeggen dat elke combinatie van frequentie en bijbehorend geluidsdruk niveau op de lijn even luid klinkt.



Figuur 1.9. Isofonen.

## 2.3. dB(A)'s

Hoewel de gevoeligheid van het gehoor frequentieafhankelijk is, geeft het wel een totaaloordeel over de luidheid van een geluid (dat opgebouwd is uit allerlei frequenties). Door nu de oorgevoeligheid in een meetinstrument in te bouwen, krijgen we een meetresultaat dat correspondeert met dat totaaloordeel. Het instrument corrigeert per frequentie het geluidsdruk niveau voor de oorgevoeligheid. Deze gecorrigeerde geluidsdruk niveau's worden

vervolgens opgeteld. Het resultaat is dan een "gewogen" geluidrukniveau, gewogen voor het menselijk oor. Ter onderscheiding van het "fysische" geluidrukniveau dat we uitdrukken in dB, drukken we dit gewogen geluidrukniveau uit in dB(A):

$$L_A = 10 \lg \left( 10^{\frac{L_{p1} + A_1}{10}} + 10^{\frac{L_{p2} + A_2}{10}} + 10^{\frac{L_{p3} + A_3}{10}} + \dots \right) \text{ dB(A)} \quad (1-27)$$

Tabel 1.4. De genormaliseerde A-correcties.

De correcties  $A_i$  die per frequentieband aangebracht worden, de zogenaamde A-correcties,

| $f_m$ (Hz) | $A_i$ (dB) |
|------------|------------|
| 63         | -26,2      |
| 125        | -16,1      |
| 250        | -8,6       |
| 500        | -3,2       |
| 1000       | 0          |
| 2000       | 1          |
| 4000       | 1,1        |
| 8000       | -1         |

staan vermeld in tabel 1.4. Uit de tabel valt op te maken dat het oor het minst gevoelig is voor de laagste octaafbanden en het gevoeligst voor de 4 kHz *octaafband*. Zie voor een berekening van een geluidrukniveau in dB(A) rekenvoorbeeld 1.6.

**Octaafband:** deel van het geluidsspectrum waarvoor geldt dat de laagste frequentie en de hoogste frequentie zich verhouden als 1 : 2

**Tertsband:** 1/3 deel van een octaafband

## 2.4. Fluctuerende geluiden

De sterkte en frequenties van veel geluiden veranderen voortdurend in de tijd. Dat veranderen wordt ook wel fluctueren genoemd. We ervaren een geluid nog als redelijk constant wanneer het geluidrukniveau niet meer dan 5 of 6 dB(A) in de tijd varieert. Als er bij een meting sprake is van een dergelijke variatie mogen we de gemiddelde waarde aflezen als maat voor de sterkte van het geluid.

Veel geluiden, zoals van wegverkeer, railverkeer, muziek, etc., fluctueren echter veel sterker in de tijd. En dan betreft het niet alleen het geluidniveau maar ook de frequenties of, anders gezegd, de spectrale samenstelling. Hoe stellen we daar de luidheid van vast? We kunnen dan niet volstaan met een schatting van de gemiddelde waarde. Voor een meer objectieve maatstaf hebben we een statistische benadering nodig. Aan de hand van de statistische verdeling van geluidrukniveaus over een zekere periode kunnen we vaststellen welke niveaus gedurende een bepaald percentage van de tijd overschreden worden. Zo definiëren we  $L_1$ ,  $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  en  $L_{95}$  als de geluidniveaus die respectievelijk 1, 5, 10, 50 en 95% van de tijd worden overschreden.  $L_{10}$  betekent dan het geluidrukniveau dat gedurende 10% van de tijd wordt overschreden.  $L_1$  of  $L_5$  wordt gehanteerd voor bijvoorbeeld sanitair lawaai.  $L_{95}$  voor achtergrondgeluid.

## 2.5. Het equivalente geluidniveau in dB(A)

In Nederland is het echter gebruikelijker om te kijken naar de energie-inhoud van een fluctuerend geluid en die als maatstaf voor hinder te nemen. Dat komt er op neer dat we bij het meten het geluidrukniveau over een langere tijd (kwartier, uur, dagdeel) "energetisch middelen". Het resultaat hiervan wordt het equivalente geluidrukniveau genoemd, het symbool ervoor  $L_{eq}$ . Ook bij de bepaling van  $L_{eq}$  kunnen we A-weging toepassen zodat we het equivalente geluidrukniveau in dB(A) verkrijgen. Het symbool hiervoor is  $L_{Aeq}$ , het A-gewogen equivalente geluidrukniveau. Dit is een veel gebruikte maatstaf voor het opstellen van criteria voor toelaatbare geluidniveaus van fluctuerende geluiden. Zie voor een berekening van een equivalent geluidniveau rekenvoorbeeld 1.7.

**Het geluidniveau:** één-getalsaanduiding die rekening houdt met de frequentie-afhankelijke gevoeligheid van het gehoor

**Equivalent geluidniveau:** energetisch gemiddelde geluidrukniveau over een bepaalde tijd

---

**Rekenvoorbeeld 1.6.**

*Gegeven:*

Een geluidbron waarvan de volgende octaafbandwaarden zijn gemeten.

|                          |      |     |     |     |      |      |      |
|--------------------------|------|-----|-----|-----|------|------|------|
| Octaafband $f_m$         | [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Geluidsdrukkniveau $L_p$ | [dB] | 87  | 91  | 85  | 80   | 75   | 62   |

*Gevraagd:*

Het door de bron veroorzaakte geluidniveau in dB(A).

*Uitwerking:*

|                          |      |       |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Octaafband $f_m$         | [Hz] | 125   | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
| Geluidsdrukkniveau $L_p$ | [dB] | 87    | 91   | 85   | 80   | 75   | 62   |
| A-correctie              | [dB] | -16,1 | -8,6 | -3,2 | 0    | 1    | 1,1  |
| $L_p$ A-gewogen          | [dB] | 70,9  | 82,4 | 81,8 | 80   | 76   | 63,1 |

$$L_A = 10 \lg \left( 10^{\frac{L_{p1} + A_1}{10}} + 10^{\frac{L_{p2} + A_2}{10}} + 10^{\frac{L_{p3} + A_3}{10}} + \dots \right) \text{ dB(A)}$$

$$L_A = 10 \lg \left( 10^{\frac{70,9}{10}} + 10^{\frac{82,4}{10}} + 10^{\frac{81,8}{10}} + 10^{\frac{80,0}{10}} + 10^{\frac{76,0}{10}} + 10^{\frac{63,1}{10}} \right) = \underline{86,8} \text{ dB(A)}$$

*Toelichting:*

De A-gewogen geluidsdrukkniveaus voor 125 Hz en 4000 Hz liggen meer dan 10 dB onder de overige waarden. Dit betekent dat we deze waarden mogen verwaarlozen in de berekening. Energetische optelling van de overige waarden levert een geluidniveau op van 86,7 dB(A). Dit betekent een verschil van 0,1 dB(A) met de exacte berekening.

---

---

**Rekenvoorbeeld 1.7.**

*Gegeven:*

Een machine die in bedrijf een stationair geluidniveau produceert van 60 dB(A) en om het half uur 10 minuten lang een niveau produceert van 80 dB(A).

*Gevraagd:*

Het equivalente geluidniveau  $L_{Aeq}$ .

*Uitwerking:*

$$L_{Aeq} = 10 \lg \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \left( \Delta t_i \cdot 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \text{ dB(A)}$$

$$L_{Aeq} = 10 \lg \frac{1}{30} \left( 20 \cdot 10^{\frac{60}{10}} + 10 \cdot 10^{\frac{80}{10}} \right) = \underline{75,3} \text{ dB(A)}$$

---

---

## 2.6. Geluidcriteria

Mensen zijn gevoelig voor stoorgeluiden. In welke mate hangt onder meer af van de activiteit die ze uitvoeren. Als we bezig zijn met een ingewikkeld ontwerpprobleem ervaren we harde muziek al gauw als storend. Als het ontwerp klaar is en we bezig zijn met het uittekenen, dan is muziek een welkome afleiding. Voor elke activiteit kunnen we nagaan hoe groot de hinder is van een bepaalde dosis stoorgeluid: de dosis-effect-relatie. Op grond van dit soort onderzoek kunnen we criteria opstellen voor het toelaatbare stoorgeluid. Daarbij moeten we wel bedenken dat niet elk mens in gelijke mate gevoelig is voor storend geluid. Onderzoek wijst uit dat 20 à 30% van de mensen erg gevoelig is, 40 à 50% enigszins gevoelig en zo'n 30% geluidongevoelig. Criteria dienen uiteraard zo te worden gekozen dat het merendeel van de mensen geen hinder ondervindt. Ze worden meestal uitgedrukt in  $L_{Aeq}$ , het equivalente geluidniveau in dB(A). Deze waarde mag dan niet worden overschreden.

### Vragen:

- 5.17. Waar ligt ruwweg voor een mens, het hoorbare frequentiegebied (tussen welke frequentiegrenzen)?
- 5.18. Wat is de relatie tussen frequentie  $f$  [Hz] en golflengte  $\lambda$  [m]?
- 5.19. Wat is een octaafband en een tertsband?
- 5.20. Voor welke octaafband is het menselijk oor het gevoeligst?
- 5.21. Wat is het verschil tussen geluiddruk-niveau en geluidniveau?
- 5.22. Wat wordt verstaan onder het equivalente geluid(druk)niveau?

---

### 3. Ontwerpen met geluid

Meer dan wat in de voorgaande hoofdstukken is besproken, spreekt de zaalakoestiek tot de verbeelding. Bij het ontwerpen van zalen hoeft niet in alle gevallen een geluidspecialist ingeschakeld te worden. Ook hier geldt dat we met gezond verstand een heel eind kunnen komen. Willen we ons echter vooraf indekken voor een mislukking, dan is het aan te bevelen een aantal grondregels goed te bestuderen en er rekening mee te houden. In dit hoofdstuk zullen wij enkele van deze grondregels kort bespreken. In wezen gelden ze naast de specifiek akoestische ruimten ook voor elke willekeurige andere ruimte waarin menselijke activiteiten plaatsvinden.

Niet iedere ruimte is zonder meer geschikt voor elke menselijke activiteit. Voor bepaalde activiteiten zal de ruimte de mogelijkheid moeten hebben dat informatieoverdracht optimaal kan plaatsvinden (spraak, muziek). In andere ruimten zal de overdracht juist zo minimaal mogelijk moeten zijn (fabriekshal, werkplaats). Wanneer het optimaliseren van genoemde informatieoverdracht van belang is, wordt de akoestiek van de ruimte belangrijk. Het begrip zaalakoestiek is dan ook duidelijk verbonden met het optimaliseren van een ruimte voor een specifieke functie of activiteit. In zijn algemeenheid maken we hierbij onderscheid naar het optimaliseren van:

- muziekoverdracht (concertzaal);
- spraakoverdracht (schouwburg, collegezaal);
- een tussenvorm hiervan (opera/cabaret/musical/kerk).

Zowel een spreek- als een muziekzaal moet aan een aantal specifieke basisvoorwaarden voldoen. Moeilijker wordt het echter wanneer een zaal voor beide doeleinden geschikt moet zijn. De behoefte aan dergelijke multifunctionele zalen wordt veelal uit de financiële nood geboren. Vooraf dient echter duidelijk onderkend te worden dat zo'n zaal nooit zal kunnen concurreren op akoestisch gebied met de twee eerstgenoemde soorten zalen; ondanks of misschien juist dankzij allerlei kunstgrepen. De aspecten, waaraan te allen tijde aandacht zal moeten worden besteed, worden hieronder aangegeven.

Het zal duidelijk zijn dat niet alle punten voor elke ruimte even zwaar tellen. In een grote schouwburg voor 1500 personen wegen ze zwaarder dan voor een collegezaal voor zo'n 200 personen. Een dergelijke zaal is weer kritischer dan een gewoon leslokaal. Zaalakoestische aandachtspunten zijn in het algemeen:



*Figuur 1.10. De Akoestiek van dit Griekse amfitheater (Epidauros) wordt in belangrijke mate bepaald door directe geluidoverdracht en een reflectie via de vloer.*

---

- Direct/diffuus geluidverdeling;
- Ruimteform en volume;
- Zicht;
- Materiaalkeuze en nagalmtijd;
- Diffusiteit;
- Stoomniveau;
- Elektro-akoestische hulpmiddelen.

### 3.1. Direct/diffuus geluidverdeling

Bij het behandelen van de basisbegrippen in paragraaf 1.1 is duidelijk gemaakt dat het gedrag van geluid in een afgesloten ruimte anders is dan onder vrije-veldcondities (figuur 1.10.).

Als gevolg van zeer vele reflecties tegen al dan niet speciaal behandelde of gerichte oppervlakken zal zich een ingewikkeld golfpatroon in de ruimte instellen. Het direct van de bron afkomstige geluid interfereert met het gereflecteerde geluid. Dicht bij de bron overheerst in het algemeen het directe geluid en kunnen tot op zekere hoogte de wetmatigheden die in de open lucht (vrije veld) gelden, worden aangehouden ( $L_p$  afhankelijk van afstand). Wat verder van de bron kan de situatie veranderen; hier wordt het geluidrukniveau bepaald door de overblijvende energie van de tegen de begrenzingen gereflecteerde golven en dus van de *geluidabsorptie* daarvan. In een omsloten ruimte kan dan ook binnen zekere grenzen onderscheid gemaakt worden tussen het directe geluidveld en het indirecte of nagalmveld. De relatie tussen het geproduceerde vermogen en het geluidrukniveau op een afstand  $r$  van de bron is:

**Geluidabsorptie:** mate waarin het geluid uit een ruimte verdwijnt

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{Q}{4\pi r^2} \quad [dB] \quad (1-28)$$

waarin:  $Q$  = de richtfactor van de bron, is een maat voor de richtwerking van de bron. Het is de verhouding tussen de geluidintensiteit, gemeten recht voor de bron en de geluidintensiteit, indien alle energie gelijkmatig (bolvormig) over de bron zou zijn verdeeld. Voor een bron met gelijkmatige geluiduitstraling in een hele bol (een echte bolbron) geldt:  $Q = 1$ . Voor een stem in de richting van de luisteraar geldt:  $Q = \text{ca. } 3$ . Voor een luidsprekerzuil (lijnvormige luidsprekerconfiguratie van meerdere luidsprekers meestal boven elkaar), gericht op de luisteraar geldt:  $Q = \text{ca. } 20$ . Draaien we de luidsprekerzuil om dan geldt:  $Q = \text{ca. } 1/20$ . Voor een diffuus geluidveld geldt:

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{4}{A} \quad [dB] \quad (1-29)$$



Figuur 1.11. Geluidbron met een lage  $Q$  ( $Q \approx 2$ , inblaasrooster t.b.v. luchtbehandeling in de collegezalen van het Auditorium TU/e).



Figuur 1.12. Geluidbron met een hoge  $Q$  ( $Q \approx 10$ , luidsprekerzuil t.b.v. spraakoverdracht in de dorgelozaal van het bestuursgebouw, TU/e).

Hierbij is  $A$  de totale geluidabsorptie van de ruimte.

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad [m^2 \text{ open raam}] \quad (1-30)$$

waarin:

- |            |   |                                         |                   |
|------------|---|-----------------------------------------|-------------------|
| $\alpha_i$ | - | geluidabsorptiecoëfficiënt van vlak $i$ | [-]               |
| $S_i$      | - | de oppervlakte van vlak $i$             | [m <sup>2</sup> ] |

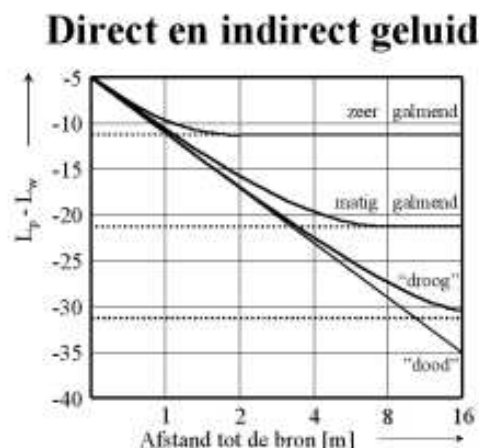
Van veel materialen en bouwkundige constructies zijn de geluidabsorptiecoëfficiënten bekend en frequentieafhankelijk weergegeven in tabellenboeken en brochures van fabrikanten.

Het zal duidelijk zijn dat de totale geluiddruk op een willekeurig punt in de ruimte afhankelijk is van de afstand tot de bron (direct geluid) en de overige eigenschappen van de ruimte (nagalmveld).

Het geluidsdruk niveau dat op dat punt te meten is, laat zich bij benadering beschrijven door de volgende relatie 1-31 met figuur 1.13 als grafische weergave.

$$L_p = L_w + 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad [dB] \quad (1-31)$$

Uit het voorgaande valt op te maken dat op een zekere afstand tot de bron het directe geluid even sterk is als het indirecte, gereflecteerde geluid. Hier gaat het directe geluidveld over in het galmveld.



Figuur 1.13. Combinatie van het directe veld en het galmveld.

### Rekenvoorbeeld 1.8.

*Gegeven:*

Een ruimte van  $l \times b \times h = 15 \times 10 \times 3 \text{ m}^3$  met een gemiddelde geluidabsorptiecoëfficiënt voor de vloer ( $\alpha_{v \text{ gem}}$ ) van 0,05, een gemiddelde geluidabsorptiecoëfficiënt voor de wanden, ( $\alpha_{w \text{ gem}}$ ) van 0,2 en een gemiddelde geluidabsorptiecoëfficiënt voor het plafond ( $\alpha_{p \text{ gem}}$ ) van 0,6.

*Gevraagd:*

De gemiddelde nagalmtijd  $T_{60 \text{ gem}}$ .

*Uitwerking:*

$$T_{60} = \frac{V}{6A} [s] \quad A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i [m^2 \text{ o.r.}]$$

volume : 450 m<sup>3</sup>  
vloeropp. : 150 m<sup>2</sup>  
wandopp. : 150 m<sup>2</sup>  
plafondopp.: 150 m<sup>2</sup>

$$A_{\text{totaal}} = (150 \cdot 0,05) + (150 \cdot 0,2) + (150 \cdot 0,6) = 127,5$$

$$T_{60 \text{ gem}} = \frac{450}{6 \cdot 127,5} = 0,59 [s]$$

*Toelichting:*

Wanneer in de akoestiek wordt gesproken over de nagalmtijd of de gemiddelde nagalmtijd ( $T_{60 \text{ gem}}$ ) wordt meestal bedoeld  $(T_{60(500 \text{ Hz})} + T_{60(1000 \text{ Hz})})/2$ .

**Galmstraal:** afstand tussen geluidbron en -ontvanger waarvoor geldt dat ter plaatse van de ontvanger het directe geluid even sterk is als het diffuse geluidveld

Deze afstand wordt de *galmstraal*  $r_k$  [m] (critical distance, Hallradius) genoemd.  $r_k$  kan worden berekend met de formule:

$$r_k = \sqrt{\frac{Q \cdot A}{16\pi}} [m] \quad (1-32)$$

Afhankelijk van de functie van de ruimte dient de hoeveelheid direct geluid in een bepaalde verhouding te staan tot het indirecte geluid. Dit is o.a. van invloed op het richtinghoren. Voor spraak bijvoorbeeld is het kunnen lokaliseren van de bron (spreker) van veel groter belang dan bij muziek. Bij het laatste speelt juist de ruimtelijkheid (veel gereflecteerd geluid) een grote rol.

## 3.2. Ruimteform en volume

Een goede hoofdvorm van de zaal is van eminent belang voor het realiseren van een goede akoestiek. In de vorige paragraaf is gesproken over direct en indirect geluid. Het indirecte geluid bereikt de luisteraar via een of meerdere reflecties tegen plafond of wanden. Wanneer deze echter te laat arriveren en daarbij nog voldoende energie-inhoud hebben, worden ze gehoord als een storende echo. Te laat in die zin dat het gereflecteerde geluid op die plaats en dat tijdstip sterker is (ca. 5 à 10 dB) dan het directe geluid en minimaal 50 ms later arriveert. Geluid dat binnen ca. 50 ms (1/20 s) na het directe geluid arriveert, wordt door het oor geïntegreerd en verhoogt aldus het geluidniveau (een tijdsverschil van 50 ms komt overeen met een omweg van het geluid van 17 m). De gereflecteerde geluidgolven worden als het ware door het directe geluid gemaskeerd. Gereflecteerde geluidgolven, waarvan het niveau ten minste 5 à 10 dB hoger is dan het directe geluid kunnen afzonderlijk worden gehoord. Wanneer deze binnen 50 ms (spraak) of 80 ms (muziek) de ontvanger bereiken, worden ze als nuttig ervaren.



---

## Rekenvoorbeeld 1.9.

### Gegeven:

Een trompettist die speelt in een concertzaal met een volume van 13000 m<sup>3</sup> en een gemiddelde nagalmtijd van 2s. De trompettist produceert een gemiddeld vermogenniveau van 80 dB en zijn trompet heeft een gemiddelde richtfaktor Q van 10.

### Gevraagd:

Het gemiddelde geluidrukniveau op een afstand van resp. 4m, 15m en 40m.

### Uitwerking 1:

$$L_{p(r)} = L_w + 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) [dB] \quad A = \frac{V}{6T} = \frac{13000}{6 \cdot 2} = 1083 [m^2 \text{ o. r.}]$$

$$L_{p(4m)} = 80 + 10 \lg \left( \frac{10}{4\pi \cdot 16} + \frac{4}{1083} \right) = 67,3 [dB]$$

$$L_{p(15m)} = 80 + 10 \lg \left( \frac{10}{4\pi \cdot 225} + \frac{4}{1083} \right) = 58,6 [dB]$$

$$L_{p(40m)} = 80 + 10 \lg \left( \frac{10}{4\pi \cdot 1600} + \frac{4}{1083} \right) = 56,2 [dB]$$

### Uitwerking 2:

Bereken eerst de galmstraal om te onderzoeken of de ontvangposities zich in het directe of het diffuse veld bevinden. Dit kan in veel gevallen rekentijd bekorten en de kans op het maken van rekenfouten verkleinen.

$$r_k = \sqrt{\frac{Q \cdot A}{16\pi}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 1083}{16\pi}} = 14,7 [m]$$

Dit betekent dat ontvangpositie 1 (op 4m van de trompettist) in het directe veld ligt. Ontvangpositie 2 (op 15m van de trompettist) ligt nagenoeg 'op' de galmstraal en ontvangpositie 3 ligt in het galmveld (=diffuse veld).

$$L_{p(4m)} = 80 + 10 \lg \left( \frac{10}{4\pi r^2} \right) = 80 - 13,0 = 67,0 [dB]$$

$$L_{p(15m)} = 80 + 10 \lg \left( \frac{10}{4\pi 225} \right) + 3 = 80 - 24,5 + 3 = 58,5 [dB]$$

$$L_{p(40m)} = 80 + 10 \lg \left( \frac{4}{1083} \right) = 80 - 24,3 = 55,7 [dB]$$

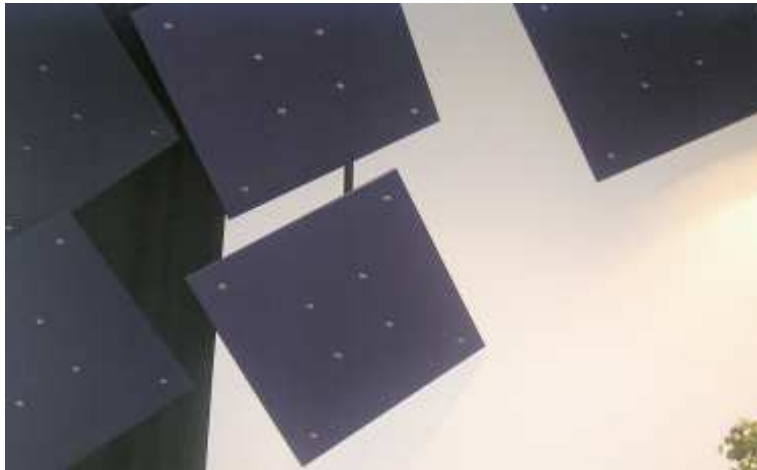
### Toelichting:

De uitkomsten van uitwerking 2 zijn nagenoeg gelijk aan die van uitwerking 1.

Voor de berekening van het geluidrukniveau op 15m van de trompettist nemen we de bijdrage van het directe veld (zoals in uitwerking 2) of de bijdrage van het diffuse veld. Beide zijn op die afstand tot de bron gelijk. Twee gelijke niveaus optellen betekent één van de twee niveaus + 3 dB (vuistregel).

---

Belangrijk is dat dergelijke nuttige reflecties niet alleen van het plafond komen. De via de zijwanden gereflecteerde geluidgolven, laterale reflecties, dragen bij aan de ervaring van ruimtelijkheid. Een zaal mag daarom nooit te breed zijn of te veel waaivormig, er valt dan namelijk een 'gat' in het middengedeelte van de zaal voor wat betreft deze reflecties. Voor de hogere frequenties, waarvoor geldt dat de golf lengte zeer klein is ten opzichte van de afmetingen



*Figuur 1.14. Klankkaatsers ter plaatse van het podium in de Blauwe Zaal van het Auditorium (TU/e) zorgen voor een verbetering van de spraakverstaanbaarheid.*

van de zaal, mogen geluidgolven worden beschouwd als lichtstralen (geometrische akoestiek). Hiervoor geldt dat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing. Van dit principe wordt ook gebruik gemaakt in computerprogramma's (zie intermezzo geometrische akoestiek). Het ligt voor de hand, bij de eerste schetsen van een nieuwe zaal, de stralen vanaf een denkbeeldige bron naar bepaalde ontvangposities te volgen om na te gaan of de omweg groter dan 17 m kan worden. Is dit het geval, dan moet óf de zaalvorm aangepast worden (hoogte, helling van oppervlakken) óf de betreffende vlakken dienen een speciale behandeling te krijgen (absorberend of geluidverstrooiend).

Naast de laterale reflecties kunnen ook reflecties van het plafond gewenst zijn. Zeker wanneer er sprake is van een breed aaneengesloten publieksvlak zullen voor het middengedeelte de nuttige reflecties van boven moeten komen. Dit stelt eisen aan de vorm en afwerking van het plafond. Omwille van het altijd benodigde directe geluid mag een zaal niet te diep zijn, opdat de afstand bron-ontvanger niet te groot wordt. Hierbij dient bedacht te worden dat veel energie verloren gaat doordat het directe geluid, veelal scherend, over een goed geluidabsorberend vlak (publiek) gaat.

In verband met een niet te hoog maar ook niet te laag geluidsdrukkniveau en de gewenste nagalmtijd is een zeker luchtvolume per persoon gewenst. Er is een relatie tussen de inhoud van een zaal en het vermogen van de bron. Een groot symfonieorkest dat niveaus van boven de 100 dB kan produceren, moet men niet in een te kleine ruimte onderbrengen. De muziek zou als veel te luid ervaren worden. Een klacht van veel orkestleden met betrekking tot een, ten opzichte van de zaal, kleine repetitieruimte hangt met bovenstaande samen. Omgekeerd moet men kamermuziek niet ten gehore brengen in een te grote zaal. Doordat het vermogen van de bron te laag is, worden te hoge eisen gesteld aan de discipline van het publiek, daar een laag zendniveau alleen goed gehoord kan worden bij een zeer laag stoorniveau.

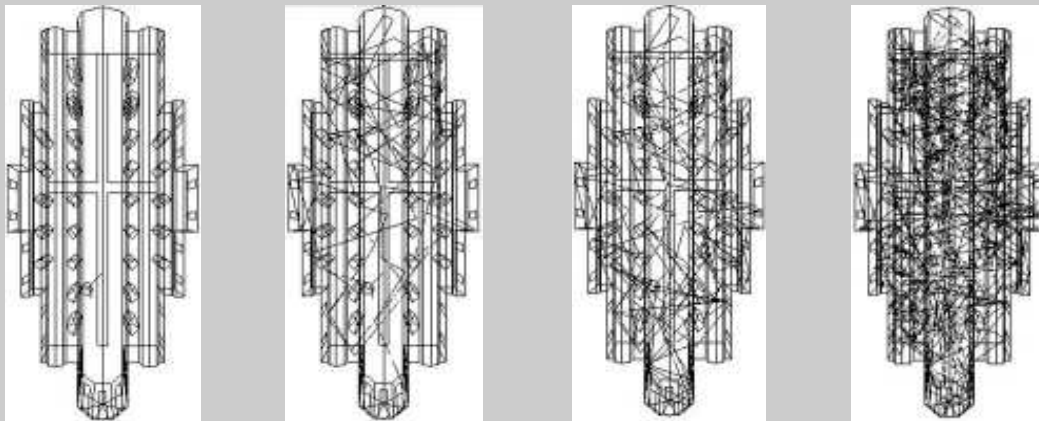
De zaalgrootte hangt ook direct af van het aantal toehoorders (publiek). In veel gevallen geldt dat de voornaamste absorptie in de ruimte geleverd wordt door het publiek. Is nu een langere nagalmtijd gewenst (concertzaal), dan is een groot volume per persoon gewenst, tot zo'n 12 m<sup>3</sup> per persoon, om deze te kunnen realiseren. Voor zalen waarvoor een minder lange nagalmtijd nodig is (bioscoop, schouwburg) volstaat een kleiner volume per persoon (3-8 m<sup>3</sup> pp), afhankelijk van de meest voorkomende van de activiteiten. Een te groot zaalvolume biedt echter altijd nog de mogelijkheid, door het inbrengen van extra absorptiemateriaal, de nagalmtijd aan te passen. Omgekeerd kan dit veelal niet. Hierbij dienen we echter wel bedacht te zijn op de noodzaak van nuttige reflecties. Wordt de zaal te groot, dan is natuurlijke bespreekbaarheid niet meer mogelijk. Een doorsnee-spreker kan een zaal aan van maximaal zo'n 3000 m<sup>3</sup>. Een geoefend spreker kan maximaal een twee maal zo groot volume bespreken. Worden deze kengetallen ruimschoots overschreden, dan is men zonder meer aangewezen op het toepassen van elektro-akoestische installaties.

### Praktijkvoorbeeld 1.1.

Om voorspellingen te doen m.b.t. de akoestiek in een ruimte zijn er diverse computerprogramma's ontwikkeld die werken volgens het geluidstralenprincipe (hoek van inval is hoek van terugkaatsing). Een geschematiseerde geluidbron zendt duizenden stralen uit die afzonderlijk worden gevolgd tot ze, ten gevolge van de vele reflecties, zijn uitgestorven. Als voorbeeld is gegeven de tot een 3D-draadmodel geschematiseerde Grundtvigs kirke uit Kopenhagen. In de gegeven plaatjes is het aantal door de bron uitgezonden stralen beperkt tot 1, 2 en 4, terwijl er maar enkele reflecties zijn weergegeven. De voor een 'echte berekening' benodigde duizenden stralen en reflecties kleuren het model volledig zwart, waarbij de rekentijd kan oplopen tot vele uren. Het uiteindelijke resultaat wordt weergegeven in de vorm van een reflectogram (geluidenergie als functie van tijd). Uit het verloop hiervan kan dan de nagalmtijd worden bepaald.



foto van de kerk



plattegronden van de kerk met 0, 1, 2, en 4 geluidstralen

### 3.3. Zicht

Een veelvuldig gebezigde uitdrukking in de zaalakoestiek is 'Goed zien is goed horen'. Hiermee wordt het belang van goede zichtlijnen aangegeven. Het is bekend, dat visueel contact met een spreker de verstaanbaarheid vergemakkelijkt (liplezen, gelaatsuitdrukking). Verder spreekt het vanzelf, dat wanneer de bron niet wordt gezien er sprake zal zijn van een zekere afscherming van het directe geluid. In de zaalakoestiek moet dan ook gelden dat voor alle zaalposities (zitplaatsen) een onbelemmerd zicht op het podium of toneel te allen tijde mogelijk is. Het realiseren van goede zichtlijnen is voor een zaal met oplopende zaalvloer (zie figuur 1.15)



*Figuur 1.15. De grote Concertzaal van het Muziekcentrum in Eindhoven (MCE) geeft vanaf elke positie in de zaal gegarandeerd vrij zicht op het podium door een oplopende vloer.*

eenvoudiger dan voor een zaal met een vlakke zaalvloer. Zalen met een vlakke zaalvloer zijn hierdoor beperkter van afmetingen en hebben daarom als het goed is een verhoogd podium (zie figuur 1.16).

Afhankelijk van de groepering van het publiek, de afstand tussen de rijen (meestal h.o.h. 0,85 à 0,90 m), zitplaatsen recht achter elkaar of verschoven, wordt de helling van de oplopende vloer bepaald. Het is gebruikelijk uit te gaan van een kruinenlijn, waarbij het oog van de persoon boven de kruin van de voor hem zittende persoon wordt gekozen. Vanaf dit punt moet een vrij uitzicht op een willekeurig punt op het podium gegarandeerd zijn. Wanneer we voor een groot aantal plaatsen recht achter elkaar de vrije zichtlijnen tekenen (éénkruinenlijn), krijgen we een exponentieel verlopende vloerhelling. Gaan we uit van verschoven rijen, waarbij iedere toehoorder als het ware tussen twee hoofden doorkijkt (tweekruinenlijn) en de rijafstand hierdoor in horizontale zin verdubbelt, dan verloopt de benodigde vloerhelling minder steil). Op dergelijke wijze kan ook de vereiste helling voor hoger gelegen delen (balkon, balustrade) worden bepaald. De helling zal hierbij zonder meer steiler worden als gevolg van het verschil in hoogte ten opzichte van het zichtpunt op het podium. De marge waarbinnen ontworpen kan worden dient



*Figuur 1.16. De grote Concertzaal van het Concertgebouw in Amsterdam geeft vanaf elke positie in de zaal vrij zicht op het podium door toepassing van een extra hoog podium.*

verder te zijn gebaseerd op het gegeven dat de verticale zichthoek van het oog zonder het hoofd te bewegen begrensd is op 30° naar boven en beneden ten opzichte van de ooghorizon (bioscoop). Bij benadering wordt uitgegaan van de ooghoogte van een zittend persoon van gemiddelde lengte, d.w.z. ca. 1,2 m en een kruin-oog-afstand van 0.13 m. Dit impliceert dat personen die grote afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde vertonen het algemene beeld verstoren.

### 3.4. Materiaalkeuze en nagalmtijd

De hier gedefinieerde nagalmtijd wordt ook wel de klassieke nagalmtijd ( $T_{60}$ ) genoemd. Langs experimentele weg lukte het de Amerikaan W.C. Sabine een relatie af te leiden tussen de ruimte-absorptie ( $A$ ) en de nagalmtijd ( $T_{60}$ ). De resultaten van zijn onderzoek kunnen als volgt worden samengevat:

- de nagalmtijd is over de gehele ruimte gelijk;
- de nagalmtijd is niet afhankelijk van de plaats van de bron;
- de nagalmtijd is niet afhankelijk van de plaats van de geluidabsorberende materialen in de ruimte.

Het is duidelijk dat bovenvermelde uitspraken slechts gelden voor een homogeen geluidveld (statistisch verdeeld), wat alleen goed mogelijk is indien de geluidabsorberende materialen evenredig over de wandoppervlakken zijn verdeeld. Deze uitgangspunten leiden tot de beroemde, empirisch bepaalde nagalmformule van Sabine:

$$T_{60} = \frac{V}{6A} \quad [s] \quad (1-33)$$

waarin:

|     |   |                                     |                       |
|-----|---|-------------------------------------|-----------------------|
| $T$ | - | nagalmtijd                          | [s]                   |
| $V$ | - | volume van de ruimte                | [m <sup>3</sup> ]     |
| $A$ | - | totale geluidabsorptie in de ruimte | [m <sup>2</sup> o.r.] |

Wanneer rekening wordt gehouden met de absorptie als gevolg van de vochtigheid van de ruimtelucht wordt de formule:

$$T_{60} = \frac{V}{6(A + 4mV)} \quad [s] \quad (1-34)$$

waarin:

|     |   |                                                    |     |
|-----|---|----------------------------------------------------|-----|
| $m$ | - | damping per meter voor vochtige lucht (tabel 1.5.) | [-] |
|-----|---|----------------------------------------------------|-----|

Tabel 1.5. Damping van vochtige lucht per meter.

| relatieve vochtigheid [%] |       | 3000 Hz | 4000 Hz | 6000 Hz |
|---------------------------|-------|---------|---------|---------|
| 20                        | 0,01  | 0,016   | 0,032   |         |
| 50                        | 0,005 | 0,008   | 0,015   |         |
| 70                        | 0,004 | 0,006   | 0,013   |         |

Deze correctie is echter zeer gering en valt binnen het nauwkeurigheidsbereik van de nagalmformule, zodat ze in het algemeen verwaarloosd mag worden. Dit geldt niet voor metingen aan verkleinde schaalmodellen waarbij met evenredig hogere frequenties moet worden gemeten, daar de invloed van de luchtdamping toeneemt bij de (zeer) hoge frequenties. Het voornaamste bezwaar tegen de formule van Sabine is dat de nagalmtijd altijd eindig is, d.w.z. nooit nul kan worden. Dit houdt in dat de formule niet geldig is voor sterk gedempte ruimten met veel absorptie. Door anderen is de empirisch bepaalde relatie van Sabine theoretisch afgeleid op basis van



dezelfde aannamen. De bekendste formule, naast die van Sabine, is die van C.S. Eyring, die uitgaat van geluidstralen die na elke reflectie een deel van hun energie verliezen:

$$I_n = I_0(1 - \alpha)^n \quad [W / m^2] \quad (1-35)$$

waarin:

|       |   |                                                      |           |
|-------|---|------------------------------------------------------|-----------|
| $I_0$ | - | Intensiteit van een geluidstraal op tijdstip $t = 0$ | $[W/m^2]$ |
| $I_n$ | - | Intensiteit van een geluidstraal na $n$ reflecties   | $[W/m^2]$ |

Het verschil tussen de formules van Eyring en Sabine is voor lage absorptiecoëfficiënten gering, bij hogere absorptiewaarden echter kan dit verschil aanzienlijk worden. Wanneer de luchtabsorptie eveneens wordt meegenomen (zie 1-34), dan luidt de formule van Eyring:

$$T = \frac{0,16V}{-S_t \cdot \ln(1 - \alpha_m) + mV} \quad [s] \quad (1-36)$$

Een juiste (klassieke) nagalmtijd blijft een belangrijke voorwaarde voor het realiseren van een goede zaalakoestiek, hoewel het niet de enige allesbepalende grootheid genoemd mag worden. Uit tabel 1.6. kan worden afgeleid welke nagalmtijd voor een zaal met zekere functie en volume gewenst is. Als over nagalmtijd gesproken wordt zonder verdere toevoeging, dan doelen wij op het rekenkundig gemiddelde van de nagalmtijd bij 500 en 1000 Hz. Voor een goede balans in de zaal mag de nagalmtijd in de overige frequentiebanden hier niet te veel van afwijken. Een afwijking van ca. 20% naar boven voor de lagere frequenties en 20% naar beneden voor de hogere frequenties geldt als een aanvaardbaar criterium.

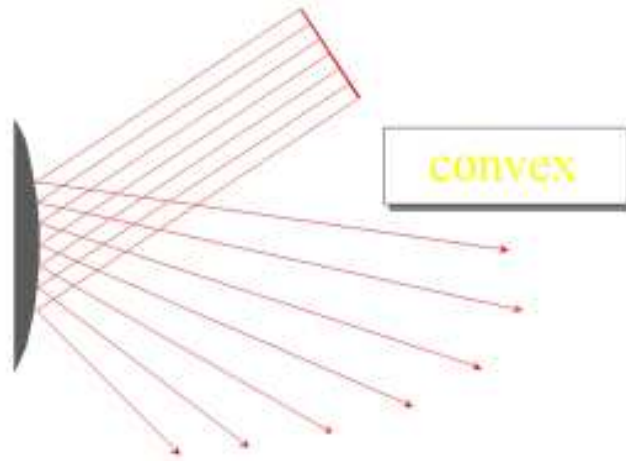
Tabel 1.6. Richtwaarden voor gemiddelde nagalmtijd (500-1000 Hz) voor diverse ruimten.

| volume [m <sup>3</sup> ] | vergad-<br>erruimte | kantoor<br>normaal | kantoor<br>open | studio<br>spraak | studio<br>muziek | studio<br>TV | bios-<br>coop | concert-<br>zaal | kerk      |
|--------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|------------------|------------------|--------------|---------------|------------------|-----------|
| 50                       | ca. 0,4             | 0,5 - 0,6          | --              | 0,3 - 0,4        | --               | --           | 0,4 - 0,5     | --               | --        |
| 100                      | ca. 0,5             | 0,6 - 0,7          | --              | 0,3 - 0,4        | --               | 0,5 - 0,6    | 0,5 - 0,6     | --               | --        |
| 500                      | 0,6 - 0,7           | --                 | ca. 0,3         | --               | ca. 0,8          | 0,6 - 0,7    | 0,7 - 0,8     | --               | 1,5 - 1,8 |
| 1000                     | 0,7 - 0,8           | --                 | ca. 0,3         | --               | 0,9 - 1,0        | 0,7 - 0,8    | 0,8 - 0,9     | 1,0 - 1,2        | 1,7 - 2,3 |
| 5000                     | --                  | --                 | 0,3 - 0,4       | --               | 1,4 - 1,5        | 0,8 - 0,9    | 1,0 - 1,1     | 1,3 - 1,7        | 2,3 - ..  |
| 10000                    | --                  | --                 | 0,3 - 0,4       | --               | 1,6 - 1,8        | 0,9 - 1,0    | 1,1 - 1,2     | 1,5 - 2,0        | 2,6 - ..  |



Figuur 1.17. Deze koeltoren in Kalkar (Duitsland), eertijds bedoeld als onderdeel van een kerncentrale, is nu een attractie in een kinderpark (Kernwasser Wunderland). Sterke geluidconcentraties t.g.v. de zuiver ronde vorm (concaaf) en de enorme afmetingen ( $d=50m$ ) veroorzaken hier spectaculaire geluidseffecten.

## Diffusoren



Figuur 1.18. Convexe vlakken zorgen voor geluidverstrooiing.

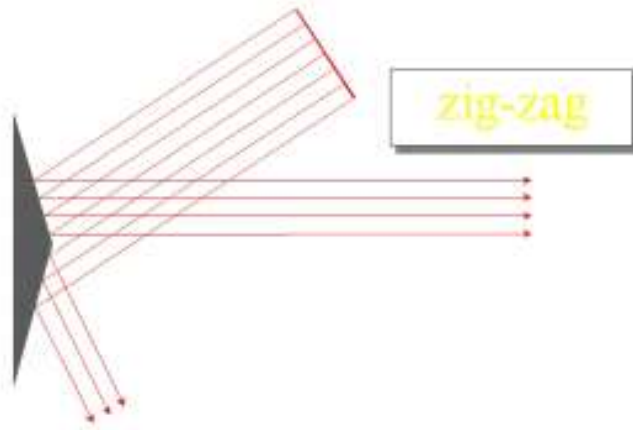
Een belangrijke zaalakoestische grootheid die naast de klassieke nagalmtijd steeds meer in de beschouwing wordt meegenomen is de Early Decay Time (EDT). Hierbij wordt gedoeld op het verloop van de nagalmkromme over de eerste 10 à 15 dB, d.w.z. de tijd waarin  $L_p$  daalt over de eerste 10 à 15 dB geëxtrapoleerd naar 60 dB. De EDT zou een betere maat zijn voor de subjectieve indruk van galm in een zaal. Samen met de Laterale Energieverdeling in de ruimte zou zij een belangrijk zaalakoestisch criterium vormen.

### 3.5. Diffusiteit

In voorgaande paragrafen is meerdere malen gesproken over een diffuus geluidveld. Vrijwel alle theorievorming in omsloten ruimten stoelt in meer of mindere mate op de aanname van een homogeen geluidveld. Tegenwoordig zaalakoestisch onderzoek concentreert zich steeds meer op dit fenomeen. De *diffusiteit* van een ruimte is een moeilijk te definiëren begrip. Bedoeld wordt een homogenisering van het geluidveld. In de zin van de klassieke golftheorie moet dan het ontstaan van eigen-frequenties (ruimteresonanties of staande golven) verhinderd worden. Een in de zaalakoestiek berucht verschijnsel, de zogenaamde flutterecho, ontstaat als gevolg van lopende golven tussen twee harde evenwijdige vlakken. Bij het beschouwen van een diffuus geluidveld kunnen we het beste uitgaan van de klassieke golftheorie of geometrische akoestiek.

**Diffusiteit:** mate van geluidverstrooiing

## Diffusoren



Figuur 1.19. Verstrooiing van geluid door zig-zag vormen.

Als de golflengte van het geluid zeer klein is ten opzichte van de afmetingen van de ruimte mogen ze worden voorgesteld als lichtstralen. Dit houdt in dat de normale kaatsingswetten kunnen worden aangehouden (hoek van inval is hoek van terugkaatsing). Op basis hiervan kan voor een ruimte nagegaan worden hoe de geluidverdeling zal zijn wanneer een bepaalde bron (met een zekere richtkarakteristiek) zich op een zekere plaats bevindt. Afhankelijk van de vorm en afmetingen van de vlakken reflecteren de geluidgolven. Bolle (convexe) vlakken zorgen voor een verstrooiing of verdunning van het geluid (divergentie). Holle (concave) vlakken (figuur 1.18) zorgen voor een meestal ongewenste concentratie of focussing van het geluid (convergentie). Om een goede diffuse ruimte te kunnen krijgen is het meestal gewenst alle vlakken scheef ten opzichte van elkaar te plaatsen. Dergelijke ruimten treffen we wel aan in akoestische laboratoria.

Een andere mogelijkheid is de oppervlakken zo onregelmatig mogelijk uit te voeren, bijvoorbeeld zig-zag plaatsen van wanden of elementen (figuur 1.19), afwisselend vooroverhellend, de wand voorzien van grote elementen of de wanden afwisselend hard en absorberend te maken.

### 3.6. Stoorniveau

Een te hoog achtergrondniveau kan tot verstoring van activiteiten leiden. Een uitgezonden signaal is bijvoorbeeld niet sterk genoeg om goed te kunnen worden waargenomen (verstaanbaarheid) en leidt tot informatieverlies. Als gevolg van te hoge bijgeluiden kan men zich niet goed concentreren (werk, luisteren naar muziek). Dit kan tot irritatie aanleiding geven. Op grond van de ten minste vereiste verschillen tussen zendniveau (signaal) en stoorniveau (ruis) (signaal-ruisverhouding) bij verschillende activiteiten zijn criteria vastgesteld met betrekking tot het maximaal toelaatbaar stoorniveau. Veel van deze criteria stammen uit de installatie-technische wereld. Immers, een technische installatie mag nooit aanleiding geven tot klachten op het gebied van geluid. Dat geluid een bijna onvermijdelijke consequentie is van het toepassen van mechanische apparatuur kunnen we dagelijks ervaren. Als we geluidopwekking niet kunnen vermijden is het van belang te trachten de geluidproductie zoveel mogelijk in de hand te houden. Naast het geluid van technische installaties kunnen we ook geconfronteerd worden met stoorgeluid in de directe buitenomgeving (verkeerslawai, vliegtuigen, metro) of binnenomgeving. Het is dan zaak door middel van een doelmatige geluidwering de resulterende niveaus in de betreffende ruimte beneden bepaalde grenzen te houden. Het toelaatbaar stoorniveau is dus steeds afhankelijk van de sterkte en de soort geluidbron, waarvan informatie moet worden verkregen en van de activiteit die in de betreffende ruimte moet kunnen plaatsvinden. In tabel 1.7. is voor een aantal ruimten het maximaal toelaatbaar stoorniveau.

Tabel 1.7. Maximaal toelaatbaar stoorniveau.

| Ruimte                                                    | dB(A) |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| <i>werkplaatsen</i>                                       | 65-75 |
| <i>kantoren met apparatuur</i>                            | 55-60 |
| <i>gymzalen, sportzalen, zwembaden</i>                    | 45-55 |
| <i>restaurant, bar, cafetaria</i>                         | 40-50 |
| <i>privé-kantoor, leeszaal, rechtszaal</i>                | 35-45 |
| <i>bioscoop, ziekenhuis, kerk, kleine conferentiezaal</i> | 30-40 |
| <i>leslokalen, tv-studio's, grote conferentiezalen</i>    | 25-35 |
| <i>concertzaal, schouwburg, onderzoekkamers</i>           | 25-30 |
| <i>audiometer-kamers</i>                                  | 15-25 |

### 3.7. Elektro-akoestische hulpmiddelen

De aanwezigheid van een elektro-akoestische installatie was nog niet eens zo lang geleden min of meer een aanwijzing, dat niet (geheel) aan de akoestische criteria werd voldaan. Tegenwoordig vormen dergelijke voorzieningen steeds meer een onderdeel van en een aanvulling



---

op de akoestiek van een zaal. Er wordt in het ontwerpstadium reeds rekening mee gehouden. Dit heeft onder meer te maken met de mogelijkheden van pluriform gebruik van de zaal. Ook de behoefte om van uitvoeringen, lezingen, e.d. directe opnamen te kunnen maken, heeft hierbij een rol gespeeld. Bij de audiotecnische hulpmiddelen ten behoeve van de zaalakoestiek kan grofweg een onderscheid gemaakt worden naar:

- toespreekinstallaties
- installaties voor muziekweergave

### 3.7.1. Toespreekinstallaties

Het gebruik van toespreekinstallaties vindt steeds veelvuldiger toepassing, denk aan congreszalen, kerken, collegezalen en zelfs vergaderzalen. Als gevolg hiervan komen geoefende sprekers nauwelijks nog voor waardoor ook op plaatsen waar een dergelijke installatie akoestisch niet per se nodig is, men toch gedwongen wordt tot het gebruik ervan over te gaan. De meest eenvoudige uitvoering van een toespreekinstallatie ondersteunt alleen het directe geluid. Via luidsprekers (weergaveposten) die op een verantwoorde manier gegroepeerd in de ruimte zijn aangebracht, wordt het directe geluid versterkt weergegeven. Afhankelijk van de plaats ten opzichte van de bron zal een zekere elektronische tijdvertraging ingebouwd moeten worden, opdat de subjectieve ervaring geen geweld wordt aangedaan. Gebleken is, dat in ruimten met een goede natuurlijke akoestiek het aanbrengen van een audiotecnische installatie meestal weinig problemen geeft. Omwille van dergelijke installaties biedt een wat 'drogere' akoestiek (lagere T) meer mogelijkheden de installatie optimaal te gebruiken en komen in het algemeen minder problemen voor. Vaak moeten omwille van een goede natuurlijke spraakverstaanbaarheid aangebrachte reflecterende vlakken absorberend bekleed worden om 'rondzingen' e.d. te voorkomen. De eisen, die samenhangen met een goede natuurlijke akoestiek, gaan lang niet altijd samen met eisen die het optimaal gebruik van zo'n installatie moeten waarborgen. Dit speelt vooral in de ontwerpfase van een zaal, wanneer fundamentele beslissingen genomen moeten worden. Wat hierbij veelal vergeten wordt, is dat het goed functioneren van een elektro-akoestische installatie mede afhankelijk is van de microfoontechniek van de spreker. Bij systemen voor spraakoverdracht dient ook aandacht besteed te worden aan voorzieningen voor slechthorenden. Hiervoor gebruikt men meestal een audiofrequent lussysteem, dat magnetische transmissie bewerkstelligt naar de ontvangspoel van het gehoorapparaat van de slechthorende. Op deze wijze wordt deze niet gestoord door omgevingsgeluid in de zaal.



*Figuur 1.20. Geluidinstallatie bedoeld voor spraak.*

---

### 3.7.2. Installaties voor muziekweergave

Deze elektro-akoestische installaties zijn meestal bedoeld voor de weergave en versterking van de moderne muziek. Hierbij wordt op ruime schaal gebruik gemaakt van elektronische effecten. Indien gebruik gemaakt wordt van een vaste zaalopstelling is een zeer goede geluidverdeling mogelijk. Helaas wordt in de meeste gevallen gebruik gemaakt van een eigen verplaatsbare installatie, waarmee vanuit een frontopstelling het publiek bestookt wordt met steeds grotere vermogens over een groot frequentiebereik. Met dergelijke voorzieningen is bij het ontwerp van een zaal nauwelijks rekening te houden, een zeer goede geluidisolatie van de omhulling ter vermindering van overlast van de omgeving daargelaten. Naast bovengenoemde installaties is het met elektro-akoestische middelen mogelijk een zaal met een slechte akoestiek te verbeteren, evenals de podiumomstandigheden voor musici.

#### Vragen:

- 5.23. Wat wordt verstaan onder de totale geluidabsorptie van een ruimte?
- 5.24. Hoe luidt de 'formule van Sabine'?
- 5.25. Wat is de galmstraal?
- 5.26. Wat is het verschil 'in gebruik' tussen de 'formule van Eyring' en de 'formule van Sabine'?
- 5.27. Wat is de invloed van de relatieve vochtigheid op de nagalmtijd van een ruimte (in relatie tot frequentiegebied en grootte van de ruimte)?
- 5.28. Wat wordt verstaan onder diffusiteit?
- 5.29. Wat is het verschil tussen een concave en een convexe vorm?
- 5.30. Wat doet in principe een goede geluidinstallatie (toespreekinstallatie) in een sterk galmende ruimte?

---

## Literatuur

- [1] Aarts, M.P.J.; Bakker, F.E; Hak C.C.J.M.; Schellen, H.L. **(2003)**. Dictaat 7S000 "Bouwfysisch ontwerpen 1", TU/e fac B
- [2] Bobran, H. **(1967)**. "Handbuch der Bauphysik", Frankfurt, Ullstein.
- [3] Brüel en Kjær **(1980)**. "Architectural Acoustics".
- [4] Barron, M. **(1993)**. "Auditorium Acoustics and Architectural Design", 1<sup>st</sup> edition, E & FN Spon, London.
- [5] Kosten, C.W. **(1972)**. "Bouwfysica", 3<sup>e</sup> 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.

