

# **A Herhaling fysica i.v.m. geluid**

## A.1 Algemene achtergrond

Om zich voort te planten hebben geluidsgolven een medium nodig: een gas, een vloeistof of een vaste stof. Wanneer we een geluidsbron in vacuüm plaatsen, horen we niets.

Bij golfverschijnselen is het nooit de materie die zich voortplant, maar wel de verstoring van de evenwichtstoestand. De deeltjes bewegen heen en weer rond een evenwichtspositie, terwijl het golffront zich verder beweegt. De schijnbare verplaatsing is een gevolg van het opeenvolgende karakter van de beweging van de materiedeeltjes. Op die manier ontstaan er plaatsen waar de geluidsdruk  $p$  hoog is en naastliggende plaatsen waar de druk laag is.

De voortplanting van de geluidsgolf gebeurt zuiver longitudinaal, dit wil zeggen in de richting van de verplaatsing van de luchtdaeltjes.



De voortplanting van een geluidsgolf wordt meestal beschreven door de voortplanting van het golffronten of door geluidsstralen. Golffronten worden gevormd door het verbindingsoppervlak van alle aansluitende punten die in fase bewegen. Geluidsstralen worden gevormd door de doorlopende lijnen die loodrecht staan op de golffronten.



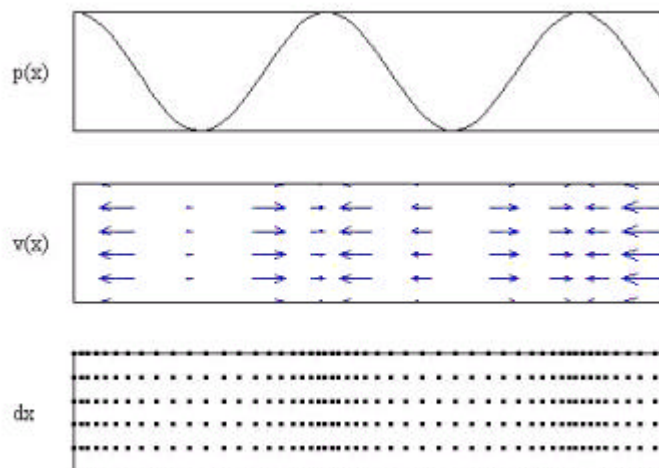
De frequentie  $f$  is het aantal keren dat deze schommeling per seconde zich voordoet. De eenheid van frequentie is Hertz [Hz]. De periode  $T$  [s] is dan de tijd die nodig is voor 1 cyclus. Er geldt  $T=1/f$ .



De afstand die het geluid aflegt per seconde, noemen we de golfvoortplantingssnelheid  $c$  (m/s).

De verplaatsing  $x$  van de luchtdaeltjes in de  $x$ -richting wordt beschreven door de volgende vergelijking:

$$\xi = A \cdot g\left(t - \frac{x}{c}\right)$$



KUL, Labo Bouwfysica, 1999

$g$  is een functie afhankelijk van de tijd  $t$  en de afstand  $x$ .  $A$  is de amplitude van de beweging. De amplitude is de maximale waarde van de uitwijking van de trillende deeltjes.

- Voor zuiver harmonische bewegingen ziet het verband voor de deeltjessnelheid eruit als volgt:

$$\begin{aligned}\xi &= A \cdot \cos\left(t - \frac{x}{c}\right) \\ &= A \cdot \cos(\omega t - kx)\end{aligned}$$

Hierbij is  $w$  is de cirkelfrequentie ( $w = 2\pi f$ ) en  $k$  het golfgetal ( $k = w/c$ ). Uit deze vergelijking leiden we af dat op elke positie  $x$  de beweging in functie van de tijd harmonisch is. Op dezelfde manier zien we dat op elk tijdstip  $t$  de positie van de bewegende deeltjes een harmonisch verloop kent.

In het volgende luistervoorbeeld horen we een zuivere toon van 440 Hz. Het videotje eraast geeft bovenaan het drukverloop in functie van de afstand  $x$ , in het midden de deeltjessnelheid, voorgesteld door middel van pijltjes en onderaan de deeltjesbeweging.

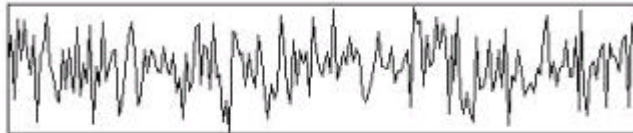
We merken op dat daar waar de deeltjesdichtheid maximaal is, de druk het grootst wordt. Ter plaatse van een drukextremum staan de deeltjes stil. Links en rechts van dit extremum is de zin van de beweging van deeltjes tegengesteld. Voor een afstand  $\lambda$  tussen de deeltjes waarvoor geldt dat

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

zijn de waarden van  $x$  allemaal dezelfde. De deeltjes die zich op deze tussenafstand bevinden, bewegen in fase.  $\lambda$  noemen we de golflengte.



- Voor een ruissignaal is het verband tussen de druk en de tijd en de plaats niet meer zo eenvoudig. Het drukverloop ziet er dan eerder willekeurig uit.



© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

## A.2 Geluidsdruk

De veldgrootheden die een geluidsgolf kunnen beschrijven zijn de akoestische druk en de deeltjessnelheid. De akoestische druk is gelijk aan het verschil tussen de atmosferische druk en de ogenblikkelijk heersende druk op een bepaald punt:  $p(t) = P(t) - P_0$ . Deze heeft bijzonder kleine waarden: bij normale spraak ongeveer 0,1 Pa, bij de pijngrens 100 Pa en dit ten opzichte van de atmosferische druk gelijk aan ongeveer 100.000 Pa! Ook de verplaatsingen van de luchtdeeltjes zijn bijzonder klein: bij lage frequenties en de hoogste intensiteiten: 1 tot 2 mm; bij de hoogste frequenties en laagst waarneembare intensiteiten:  $10^{-7}$  mm, d.i. van de orde grootte van de afmetingen van de atomen!

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

## A.3 Geluidvoortplantingssnelheid

Bij harmonische golfopwekking met periode  $T$  is de golflengte  $\lambda$  de afstand tussen twee punten die in fase bewegen. Er geldt dan:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

$c$  is frequentieonafhankelijk.

De voortplantingssnelheid in lucht is afhankelijk van de temperatuur volgens de relatie,

$$c = 20\sqrt{T}$$

waarbij  $T$  de absolute temperatuur in Kelvin is. Nominaal bedraagt  $c$  340 m/s

De voortplantingssnelheid is eveneens afhankelijk van het materiaal waar de golf doorheen gaat. Voor een materiaal met dichtheid  $\rho$  en modulus van Young  $E$  kunnen we de voortplantingssnelheid schrijven als:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$



Voor richtwaarden van de voortplantingssnelheid in verschillende materialen klik je [hier](#)

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

## A.4 De golfvergelijking

De golfvergelijking geeft een beschrijving van het geluidveld door relaties te zoeken tussen voor het geluidveld relevante grootheden, zoals de geluidsdruk  $p$  en de deeltjessnelheid  $v$ . Ze wordt bepaald uit het dynamisch en kinematisch evenwicht van een volume-element.

$$\nabla^2 \phi + k^2 \cdot \phi = 0$$

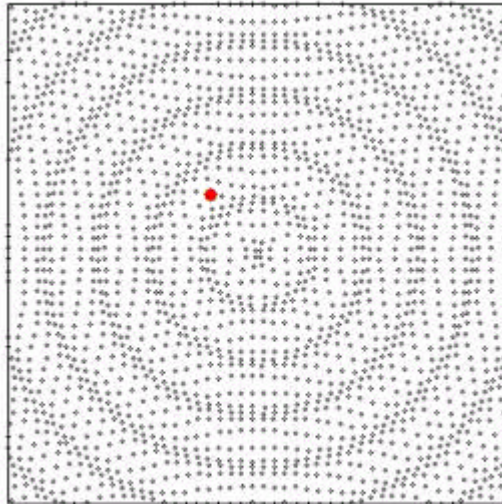
De variabele  $f$  kan zowel vervangen worden door de geluidsdruk als door de deeltjessnelheid

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

## A.5 Geometrische akoestiek

**sferische golf:**

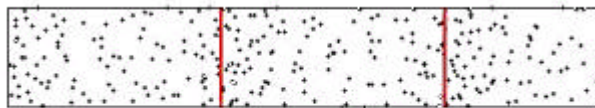
Een sferische golf heeft bolvormige golffronten. De deeltjes bewegen heen en weer in een richting volgens de straal van de cirkel. De golffronten breiden zich uit in sferische richting. De golffronten vormen boloppervlakken met de bron in het middelpunt van de bol. De stralen zijn rechten die vanuit de bron vertrekken, loodrecht op de boloppervlakken.



KUL, Labo bouwfysica, 1999

### vlakke golf:

Dit is een golf waarbij een golffront een vlak vormt. De deeltjes bewegen in een richting loodrecht op dit vlak. In het voorbeeld hieronder worden de golffronten weergegeven door rode lijnen.



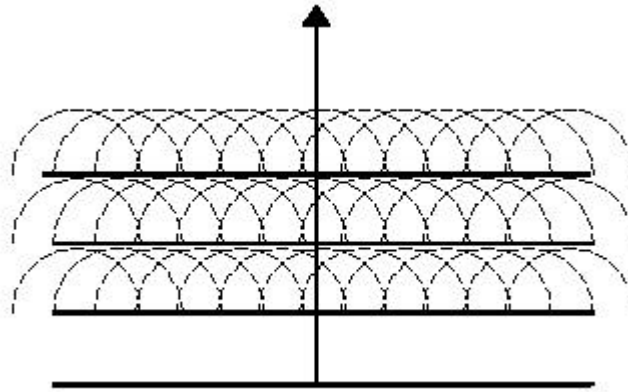
KUL, Labo Bouwfysica, 1999

De basiswetten van de geometrische akoestiek zijn vervat in de principes van Fermat en Huyghens.

Volgens **Fermat** plant een golf zich niet noodzakelijk voort volgens de kortste weg, maar wel volgens de snelste weg. In een homogeen medium zal de geluidsstraal dus zijn weg vervolgen aangegeven door de startrichting. Dit principe brengt mee dat bij spiegelende reflectie de invalrichting, de loodlijn op het weerkaatsingsoppervlak en de weerkaatsingsrichting coplanair zijn. Bovendien zijn de inval- en weerkaatsingshoek aan elkaar gelijk.

Refractie of afbuiging is mogelijk wanneer een straal door twee media gaat met verschillende voortplantingssnelheid. Optisch is het effect bekend onder de vorm van lenswerking. Sabine signaleerde een dergelijk effect in de zaalakoestische context bij de doorgang van het geluid door een kolom van opstijgende warme lucht, maar het effect treedt vooral op bij de geluidvoortplanting buiten. In het geval van temperatuurinversie is er immers een temperatuurstijging met toename van de hoogte in de luchtlagen bij de grond. Dit veroorzaakt een afbuiging van de geluidsstralen naar het aardoppervlak toe.

Volgens **Huyghens** kan de verdere voortplanting van een golffront gevonden worden door elk punt van het voortschrijdend golffront als een kleine sferische uitstraler te beschouwen en door het raakoppervlak te construeren aan de naburige bolvormige golfjes.



Meer animatie over het golfconcept vind je op de volgende pagina  
<http://www.acs.psu.edu/users/sparrow/movies/animations5.html>

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

## **B Rekenen met decibels**

Als de informatie-inhoud van een geluidssignaal onbelangrijk is, wordt bij de studie van geluid bijna altijd gebruik gemaakt van een logaritmische schaal: de decibel. Een van de redenen hiervoor is het grote dynamische bereik van het menselijk oor. Vermits we enkel in de sterkte van het geluid geïnteresseerd zijn introduceren we eerst de effectieve waarde van een signaal.

Misschien herinneren sommigen zich dat zowel het begrip effectieve waarde als decibel ook in andere disciplines gebruikt worden.

© INTEC, Universiteit Gent

## B.1 Effectieve waarde

### B.1.1 Inleiding

Onderstellen we dat een gegeven geluidsbron een geluid voortbrengt, d.w.z. dat de snel schommelende luchtdruk ons trommelvlies doet trillen, waardoor via ons oor en ons zenuwstelsel in onze hersenen een geluidgewaarwording ontstaat.

De totale luchtdruk  $p$  is de som van de relatief traag variërende atmosferische druk  $p_{atm}$  en de relatief snel variërende **geluidsdruk**  $p_{geluid}$ .

$$p = p_{atm} + p_{geluid}$$

De geluidgewaarwording door de mens heeft alles te maken met  $p_{geluid}$  en is niet beïnvloed door de steeds aanwezige  $p_{atm}$ . Daarom kunnen we voor de eenvoud van notatie steeds  $p$  gebruiken i.p.v.  $p_{geluid}$ .

De luchtdrukvariëaties nemen -afhankelijk van de aard van de geluidsbron - diverse vormen aan.

Enkele voorbeelden :

- een **zuivere sinustoon** wordt bij benadering voortgebracht door een toongenerator.



500 Hz toon

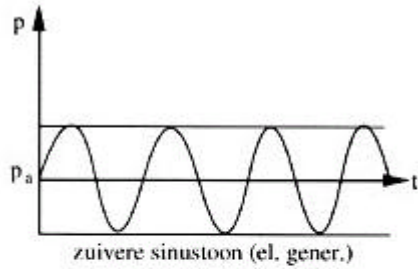


1000 Hz toon



2000 Hz toon





- **stochastisch geluid :**

voorbeelden zijn witte ruis (vlak frequentiespectrum), stoomafblazen, draaiende ventilatoren, vliegtuig ; algemener : industrielawaai, verkeerslawai,



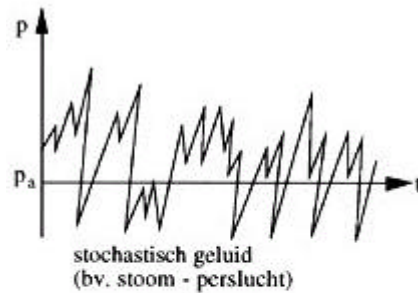
witte ruis



assemblage machine



autoweg



Je zou op simplistische wijze redenerend kunnen denken dat, indien je (subjectief) de indruk hebt dat de geluidssterkte van de geluidsbron constant is, dit (objectief) betekent dat de geluidsdruk een constante in de tijd zou zijn. Niets blijkt minder waar te zijn.

Het geluid dat met een constante geluidssterkte wordt waargenomen mag zowel een zuivere sinustoon zijn als een stochastisch geluid, voortgebracht door een geluidsbron waarvan de parameters constant blijven : de geluidsdruk  $p(t)$  (ook wel **ogenblikkelijke geluidsdruk**)

genoemd) is uiterst ingewikkeld, en nochtans heeft het menselijk oor de indruk dat de geluidssterkte constant is.

Het is onze bedoeling de geluidssterkte wiskundig te beschrijven. Nu reeds kunnen we enkele conclusies formuleren :

- de ogenblikkelijke waarde en zeer zeker de algebraïsch gemiddelde waarde van de geluidsdruk doen niets ter zake (deze laatste is eventueel zelfs nul) ;
- het menselijk oor is ook vrij ongevoelig voor de scherpe positieve en negatieve pieken, die zelfs afgesneden mogen worden ;
- bepalend voor de geluidsgewaarwording door de mens is echter wel de energie afgeleid van de geluidsdruk, die uitgeoefend wordt door de geluidsgolven op het trommelvlies : als je klikt op het icoon links, krijg je hieromtrent meer info.



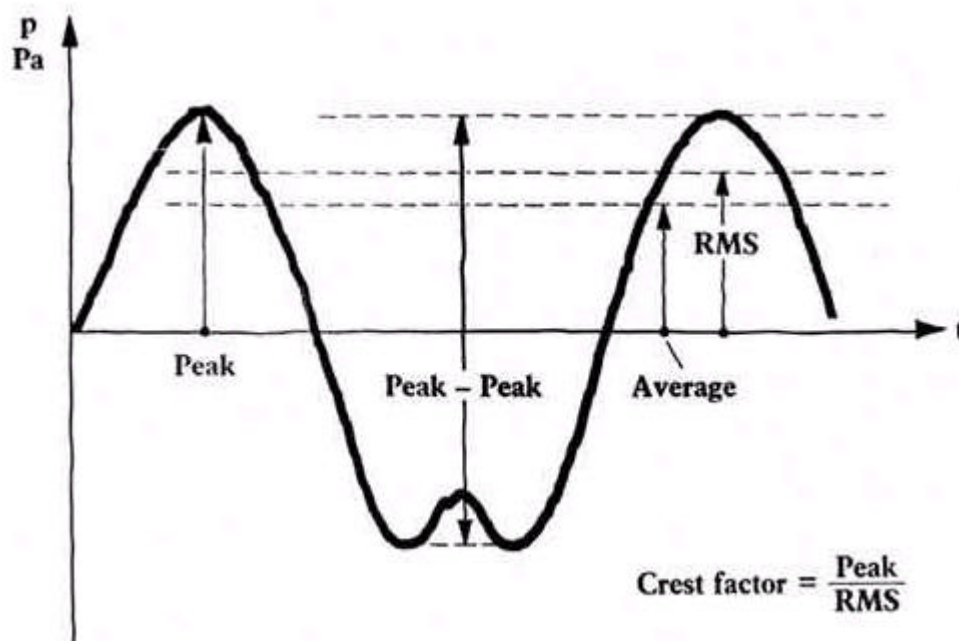
## B.1.2 Effectieve waarde van de geluidsdruk

De gemiddelde waarde van de gekwadrateerde geluidsdruk  $p(t)$  over een bepaalde tijd  $T$  (de integratietijd) is evenredig met de energie van de geluidsgolven (de geluidenergie) in die tijd  $T$ . Het kwadrateren van  $p(t)$  houdt in dat de arbeid nodig om een onderdruk te creëren t.o.v.  $p_{atm}$  gelijk is aan de arbeid nodig om de corresponderende overdruk te creëren.

De geluidsgewaarwording door de mens is bepaald door de geluidenergie afgeleid van de geluidsdruk, die uitgeoefend wordt door de geluidsgolven op het trommelvlies. Dit alles leidt ertoe, dat we de RMS waarde of **effectieve waarde** van de geluidsdruk gemeten over de tijd  $T$ , als maat voor de geluidssterkte nemen. De **effectieve geluidsdruk** wordt als volgt gedefinieerd :

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}$$

waarin  $p(t)$  de geluidsdruk is, en  $T = t_2 - t_1$  de integratietijd is.



- Op de figuur hiernaast zijn voor een golf een aantal parameters aangeduid.
- Het is de RMS waarde of effectieve waarde  $p_{eff}$ , en niet b.v. de piek (Peak) waarde  $p_{max}$ , die een maat geeft voor de energie van de golf.

- Voor een harmonische golf geldt:

$$p_{eff} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}$$

## B.2 De decibel

### B.2.1 Het geluidsdrukniveau in dB



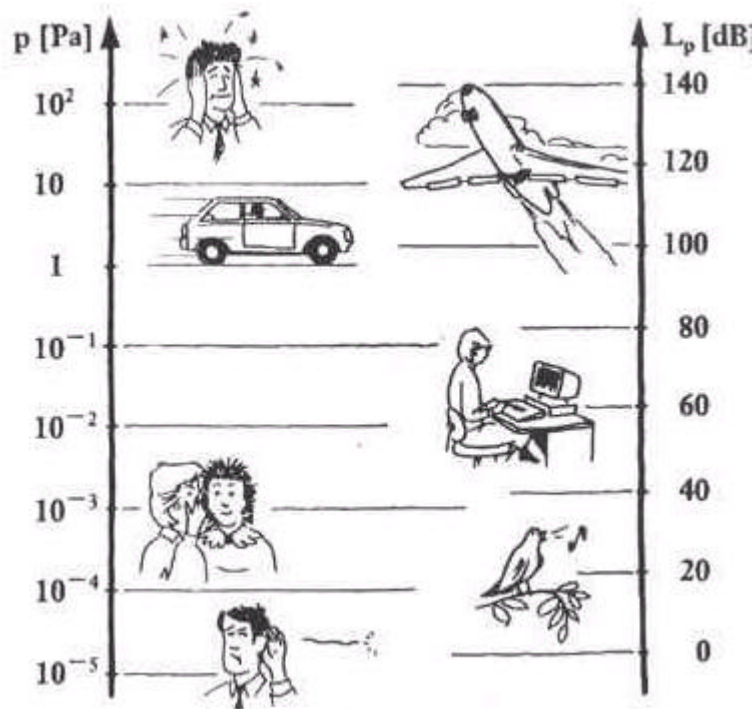
De dB-schaal laat ons toe om geluid op een correcte wijze, zoals een mens het waarneemt, te meten. Het **geluidsdrukniveau** wordt als volgt gedefinieerd (norm : [ISO 131-1979](#))

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_0} \text{ dB}$$

waarin  $p_0$  de referentie geluidsdruk is :

$$p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

Voor de eenvoud van notatie kunnen we vaak  $p$  gebruiken i.p.v.  $p_{eff}$ .



- Bovenstaande figuur toont hoe de dB-schaal eruit ziet in vergelijking met de lineaire schaal.
- De hoorbaarheidsgrens komt overeen met 0 dB, de pijngrens ligt in de omgeving van 120 dB.



Als je klikt op het icoon links, kan je een demo uitvoeren ter illustratie van de dB-schaal.

## B.2.2 Geluidintensiteit- en geluidvermogniveau in dB

Een geluidbron wordt gekenmerkt door zijn geluidvermogen  $W$ . Een waarnemingspunt op afstand  $r$  van de geluidbron gelegen, wordt gekenmerkt door de geluiddruk  $p$  of geluidintensiteit  $I$  die er heersen. Je moet goed opletten voor misverstanden, aangezien alle in dB worden uitgedrukt. De definities van de dB zijn echter lichtjes verschillend.

Het geluidintensiteitsniveau is gedefinieerd als :

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (\text{re } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2)$$

Het geluidvermogniveau wordt als volgt gedefiniëerd (norm : ISO 131-1979) :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (\text{re } W_0 = 10^{-12} \text{ W})$$

$$W_0 = I_0 S_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 = 10^{-12} \text{ W}$$

© INTEC, Universiteit Gent

## B.3 Rekenen met geluidsdrukniveaus

Om het bijzondere van de dB-schaal te benadrukken, schotelen we hier een meerkeuzevraag voor. Onderstel 2 identieke voertuigen, waarbij elk voertuig afzonderlijk een geluidsdrukniveau van 70 dB produceert op een bepaalde plaats. Welk geluidsdrukniveau in dB produceren beide voertuigen samen op die plaats ?

1. 70 dB
2. 73 dB
3. 76 dB
4. 140 dB

Het rekenen met dB-waarden geeft vaak aanleiding tot problemen, omdat we gewoon zijn met lineaire schalen te werken. Optellen en aftrekken van dB-waarden kan je het best uitvoeren door over te gaan op de lineaire waarden, die op te tellen en vervolgens opnieuw over te gaan op de dB-schaal.

Onderstel dat we 2 geluidsdrukniveaus  $L_{p1}$  en  $L_{p2}$  moeten samentellen (b.v. 2 geluidsbronnen, die afzonderlijk geluidsdrukniveaus  $L_{p1}$  en  $L_{p2}$  produceren in een gegeven waarnemingspunt), dan kunnen we als volgt tewerkgaan :

$$L_{p_1} = 10 \log \frac{p_1^2}{p_0^2} \Rightarrow \frac{p_1^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_{p_1}}{10}}$$

$$L_{p_2} = 10 \log \frac{p_2^2}{p_0^2} \Rightarrow \frac{p_2^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_{p_2}}{10}}$$

**Alleen** als de 2 geluidsbronnen [niet-coherente geluidsbronnen](#) zijn, mag je de volgende optelling maken (als je klikt op het icoon links, krijg je hieromtrent meer info) :

$$p_{tot}^2 = p_1^2 + p_2^2$$

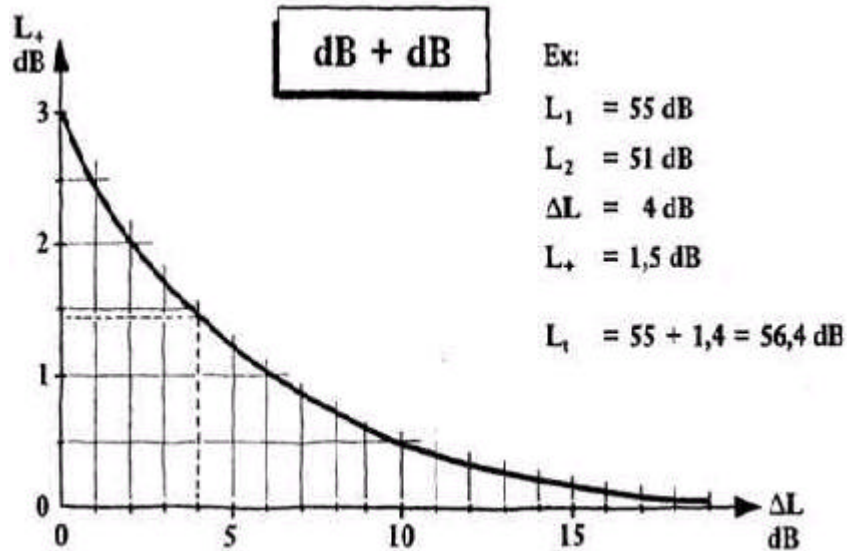
$$L_{p_{tot}} = 10 \log \frac{p_{tot}^2}{p_0^2} = 10 \log \left( \frac{p_1^2}{p_0^2} + \frac{p_2^2}{p_0^2} \right)$$

$$L_{p_{tot}} = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{p_1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p_2}}{10}} \right)$$

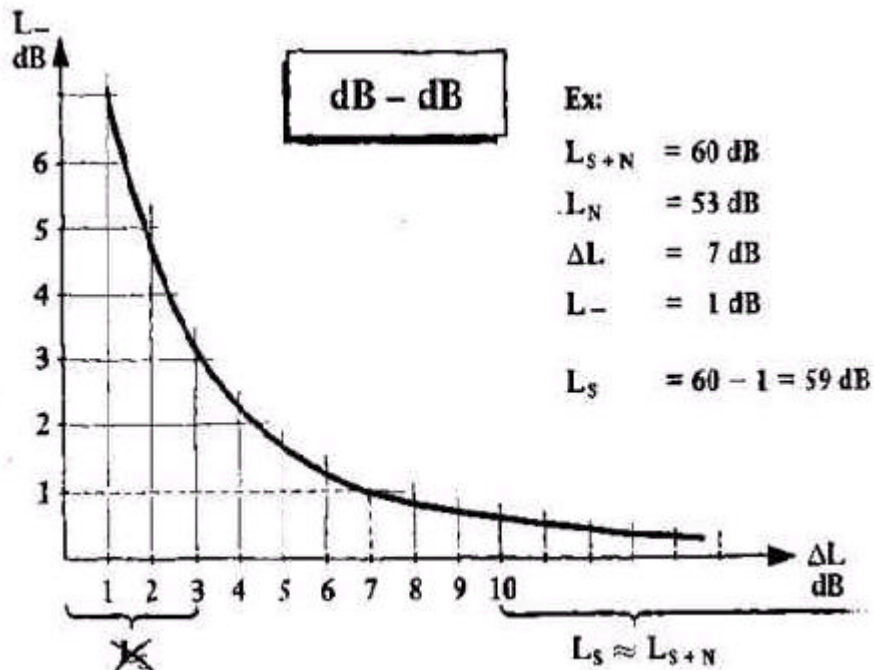
Met behulp van de laatste formule kan je de meerkeuzevraag hierboven gemakkelijk oplossen

Optellen en aftrekken van dB-waarden kan je ook handig uitvoeren door gebruik te maken van de 2 nomogrammen, die hieronder weergegeven zijn of met de javascript die op de CD-rom of op het internet te vinden is.

- Optellen van dB-waarden



- Aftrekken van dB-waarden



Test nu jezelf :

- een airconditioningsysteem produceert een geluidsdruk niveau van 55 dB op een bepaalde plaats in een ruimte. Een ventilator wordt bijgeplaatst en produceert, met het airconditioning-systeem uitgeschakeld, een geluidsdruk niveau van 60 dB op diezelfde plaats. Welk geluidsdruk niveau in dB produceren airconditioningsysteem en ventilator samen op die plaats ?
- het gecombineerde geluidsdruk niveau van 2 geluidsbronnen op een bepaalde plaats is 80 dB. Het geluidsdruk niveau op diezelfde plaats met 1 van de geluidsbronnen uitgeschakeld bedraagt 75 dB. Wat is het geluidsdruk niveau in dB op die plaats, als alleen die geluidsbron aangeschakeld is?

Je merkt in het nomogram voor het aftrekken van dB-waarden ook op, dat als op een gegeven plaats een bepaalde geluidsbron een geluidsdruk niveau  $L_N$  produceert dat 10 dB

lager ligt dan het geluidsdrukkniveau  $L_S$  van een andere geluidsbron, die eerste geluidsbron geen noemenswaardige invloed heeft (kleiner dan 1 dB) op het geluidsdrukkniveau  $L_{S+N}$  op die plaats. Dat zal ons toelaten metingen uit te voeren van geluidsbronnen zonder al de andere geluidsbronnen te moeten uitschakelen.

Ten slotte kunnen we uit de definitie van het geluidsdrukkniveau afleiden:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

waarin  $p = p_{eff}$  en  $p_0$  de referentie geluidsdruk is en uit het feit dat  $p_{eff}^2$  (de gekwadrateerde ogenblikkelijke geluidsdruk  $p(t)$ , gemiddeld over een bepaalde tijd) evenredig is met de geluidenergie, enkele interessante conclusies trekken wat betreft het geluidsdrukkniveau : je kan ze als oefening zelf terugvinden.

Het geluid gereflecteerd door een starre wand illustreert voorgaande conclusies.

## B.4 Praktische implicaties van het gebruik van de dB

De studie van geluidsdruk en geluidsdrukkniveau laten ons toe een aantal praktische conclusies te formuleren.

- Geven twee niet-coherente geluidbronnen in een gegeven punt aanleiding tot geluidsdrukkniveaus die meer dan 10 dB van elkaar verschillen, dan is het resulterend geluidsdrukkniveau op een verwaarloosbaar verschil na gelijk aan het hoogste van de twee geluidsdrukkniveaus. Voorbeeld : je wenst het lawaai van een machine te verminderen, dan moet je alle aandacht vestigen op de sterkste geluidbronnen ervan ; kleintjes spelen geen rol.
- Je wenst in een omgeving met veel storend geluid (in een bedrijfshal, in een straat, ...) het geluidsdrukkniveau te meten dat geproduceerd wordt in een gegeven punt door een gegeven machine of auto die zich in een ander punt bevindt. Dan mag je die meting zonder correctie uitvoeren, indien het **achtergrondgeluid** minstens 10 dB lager ligt dan het geluidsdrukkniveau dat gemeten wordt, wanneer de machine in werking is of de auto voorbijrijdt. Je moet dus wel eerst de machine stilleggen of wachten tot er geen auto's te bespeuren vallen om het achtergrondgeluid te meten.
- Wat betreft **communicatie via spraak** : hinderlijke muziek blijft hinderlijk zolang het geluidsdrukkniveau ervan niet lager daalt dan 10 dB beneden het niveau van het achtergrondgeluid (wanneer dit laatste ruis is waarvan het geluidsdrukkniveau ongeveer constant is in de tijd). Muziek, spraak, in de tijd fluctuerend geluid, het zijn informatie waaraan de mens eerder aandacht schenkt, m.a.w. door gehinderd wordt.

© WERK, Vrije Universiteit Brussel

## Appendices

A	Herhaling fysica i.v.m. geluid .....	A-1
A.1	Algemene achtergrond.....	A-2
A.2	Geluidsdruk .....	A-3
A.3	Geluidvoortplantingssnelheid.....	A-4
A.4	De golfvergelijking .....	A-4
A.5	Geometrische akoestiek .....	A-4
B	Rekenen met decibels.....	B-1
B.1	Effectieve waarde.....	B-2
B.1.1	Inleiding.....	B-2
B.1.2	Effectieve waarde van de geluidsdruk .....	B-4
B.2	De decibel.....	B-5
B.2.1	Het geluidsdrukniveau in dB .....	B-5
B.2.2	Geluidintensiteit- en geluidvermogeniveau in dB .....	B-6
B.3	Rekenen met geluidsdruk niveaus .....	B-6
B.4	Praktische implicaties van het gebruik van de dB.....	B-9



