

## Geluidwaarneming

Kennisbank Bouwfysica

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

De mens ervaart geluid op basis van twee aspecten: frequentie en geluidsterkte. Hoe fraai, lelijk of complex geluid ook moge klinken, het bestaat uit een samenstel van afzonderlijke golven, elk met een eigen frequentie en amplitude, maar onderling in fase verschoven. Voor de totale momentane geluiddruk geldt het superpositie-beginsel:

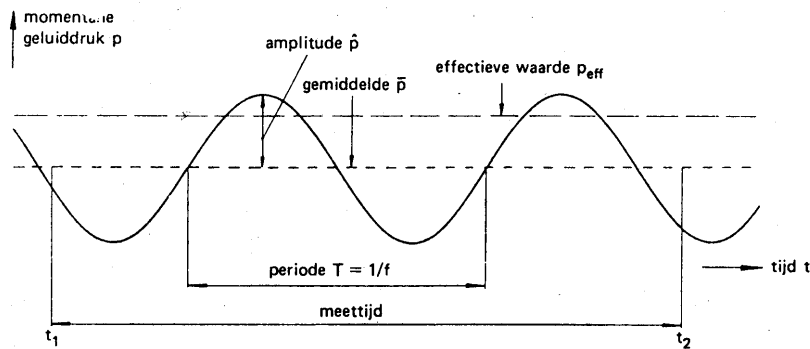
$$p(t) = \sum_i \hat{p}_i \cdot \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

Intuïtief zal men aanvoelen dat de geluidsterkte bepaald wordt door de geluiddruk, althans de amplitude daarvan. Fysiologisch begint het horen met een mechanische beweging van onderdelen van het gehoororgaan en komt de waarneming van geluidsterkte in feite neer op een overdracht van akoestische golfenergie, welke evenredig is met het kwadraat van de golfamplitude (formule (8) zie module A-1; Golfkarakter van geluid).

Als karakteristieke grootheid voor de geluidsterkte wordt daarom de effectieve geluiddruk over een periode  $t_2 - t_1$  gehanteerd, die gedefinieerd is als:

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

Eenvoudig valt aan te tonen dat voor een zuiver sinusvormige golf met frequentie  $f$  en amplitude  $\hat{p}_i$  geldt:  $p_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2} \cdot \hat{p}$  indien  $t_2 - t_1 \gg 1/f$  (zie figuur 1).



$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} p^2 dt &= \int_{t_1}^{t_2} [\hat{p} \cos(2\pi ft)]^2 dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} (\hat{p})^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} (\hat{p})^2 \cos(4\pi ft) dt \\ &= \frac{1}{2} (\hat{p})^2 (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} (\hat{p})^2 \left[ \frac{\sin(4\pi ft_2)}{4\pi f} - \frac{\sin(4\pi ft_1)}{4\pi f} \right] \end{aligned}$$

zodat

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\hat{p})^2 + \frac{1}{2} (\hat{p})^2 \frac{T}{4\pi(t_2 - t_1)} [\sin(4\pi ft_2) - \sin(4\pi ft_1)]}$$

Indien de meettijd  $(t_2 - t_1) \gg T$  genomen wordt, gaat dit over in:

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\hat{p})^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{p}$$

Zoals intuïtief verwacht kon worden, is de strekte afhankelijk van de amplitude en constant in de tijd.

figuur 1. berekening van  $p_{\text{eff}}$  voor een sinusvormige toon op een vaste plaats

Op grond van (1) en (2) kan eveneens worden afgeleid dat voor samengesteld geluid, mits bestaande uit onderling ongecorreleerde golven, geldt:

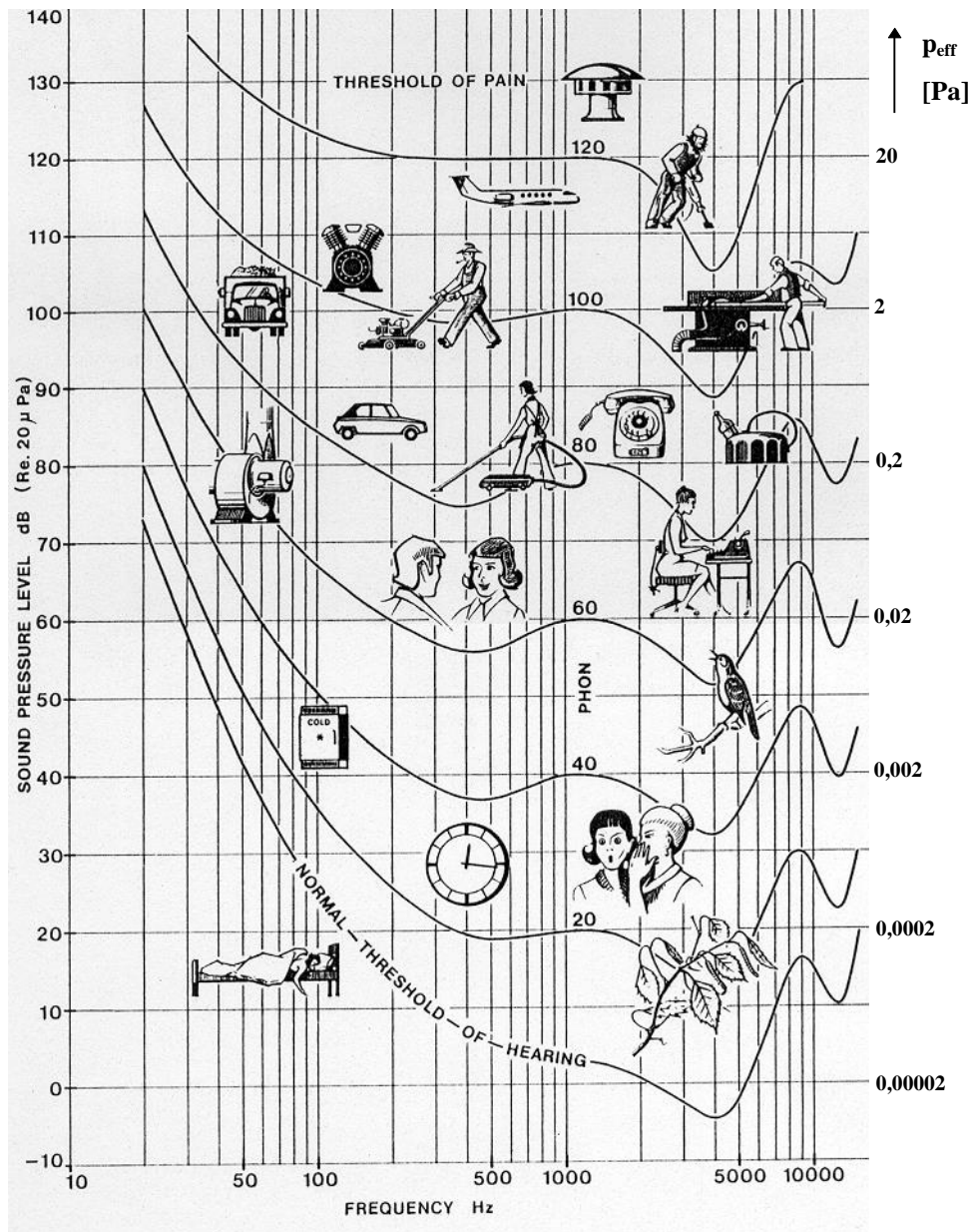
$$p_{\text{eff,totaal}}^2 = \sum_i p_{\text{eff},i}^2 \quad (3)$$

Ongecorreleerd wil zeggen  $\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p_i p_j dt = 0$  voor elke combinatie van golven  $i \neq j$ ;

een situatie die zich praktisch altijd voordoet. Een geval waarbij dat niet zo is, kan bij voorbeeld optreden bij reflectie: rechtstreeks en gereflecteerd geluid zijn dan gecorreleerd door hun weglengteverschil  $\delta$ , zodanig dat  $p_j(x,t) = p_i(x,t + \delta/c)$ . Afhankelijk van  $\delta$  zal (zie formule 2) dan waarden tussen 0 en  $2p_{\text{eff},i}$  opleveren; er is dan sprake van interferentie.

Uit metingen blijkt, dat jonge mensen een effectieve geluidsdruk van  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa ( $\approx 2 \cdot 10^{-10}$  atm!) bij 1000 Hz nog juist kunnen waarnemen. Echter, ons gehoororgaan is niet voor alle frequenties even gevoelig en met name bij lagere frequenties moet de amplitude veel groter zijn om dezelfde subjectieve geluidsterkte te ervaren (zie ook figuur 2).

Bij  $p_{\text{eff}} \approx 200$  Pa kan beschadiging van het gehoororgaan optreden, zoals scheuren van het trommelvlies, en spreekt men van de pijngrens.



figuur 2. geluidrukniveaus in de dagelijkse omgeving  
— isofonen volgens ISO-R220 (1961)

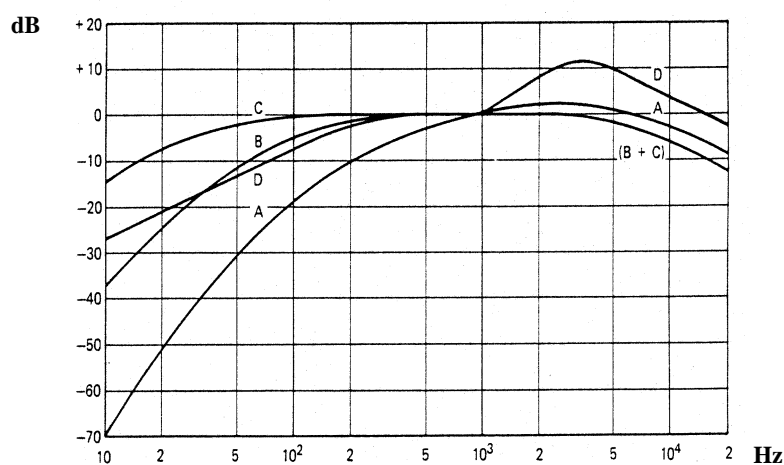
De grote range in de optredende effectieve geluiddruk bij diverse geluiden heeft ertoe geleid dat in de akoestiek een handzamer maat voor de geluidsterkte is geïntroduceerd: het geluidrukniveau  $L_p$  met als eenheid de decibel (dB):

$$L_p = 10 \log \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2} \text{ dB} \quad (4)$$

Hierin is  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa de zogenaamde referentiewaarde, overeenkomend met de effectieve geluiddruk van de eerder genoemde gehoordrempel bij 1000 Hz.

Voor enkele typische geluiden is in figuur 2 de ordegrrootte van  $p_{\text{eff}}$  en  $L_p$  uitgezet.

Het begrip geluidrukniveau is weliswaar fysisch een handzame grootheid, maar kent als maat voor de "hardheid" of "luidheid" van geluid toch beperkingen. Uitgaande van een zuivere toon van 1000 Hz en een bepaald geluidrukniveau kan men bepalen hoeveel het geluidrukniveau bij andere frequenties moet bedragen om het daar als even "luid" te ervaren. Zo'n oorgevoelingsmeting geeft uiteraard individuele verschillen ten gevolge van fysiologie, leeftijd en eventuele gehoorschadigingen. Figuur 2 toont zulke isofonen (lijnen van gelijk luidheidsniveau), zoals vastgesteld door de "International Standardization Organization" in publicatie ISO-R220 uit 1961. De krommen zijn geldig voor zuivere tonen in een vrij geluidveld, waargenomen met beide oren en met middeling over alle leeftijden; de aangegeven gehoordrempel ligt daardoor bij 1000 Hz niet op 0 dB.



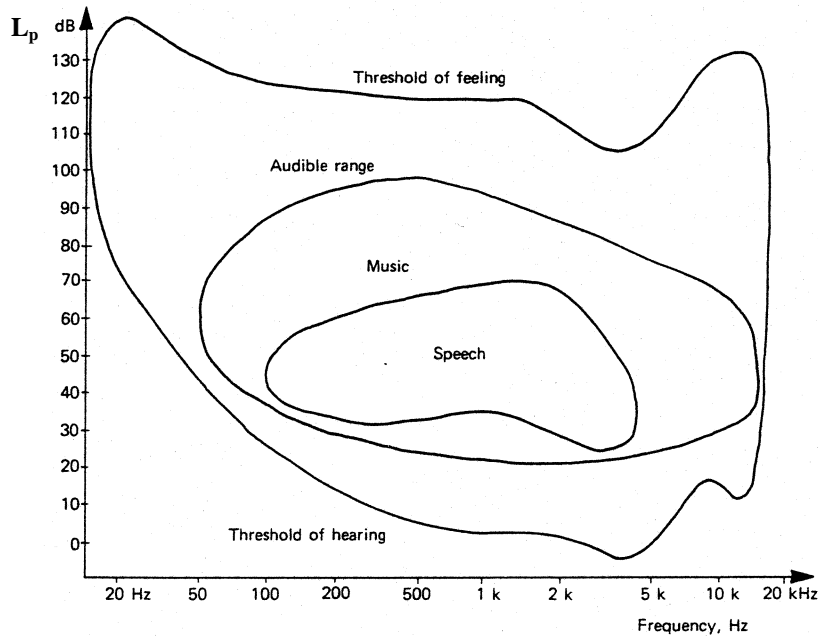
figuur 3. weegfuncties A, B, C en D

Op grond van de oorgevoeligheid is het dus zinvol om bij de kwantificering van de mate van geluidhinder (sterkte) op enigerlei wijze de frequentie van het geluid mee te wegen. Dit komt neer op het inbouwen van een frequentie-afhankelijk referentieniveau  $p_0(f)$  in formule 4. Omdat isofonen niet equidistantieel verlopen (zie figuur 2) zou eigenlijk ook nog rekening moeten worden gehouden met de hoogte van het geluidrukniveau, doch dit zou onherroepelijk tot niet-lineaire en dus onhandelbare formules leiden.

Men heeft een aantal weegfuncties gedefinieerd (figuur 3 en tabel 2), maar de meest gangbare is de A-weging, die leidt tot het geluidniveau  $L_A$  uitgedrukt in dB(A):

$$\begin{aligned}
 L_A &= 10 \log \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2(f)} \quad [\text{dB(A)}] = \\
 &= 10 \log \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2} + 10 \log \frac{p_0^2}{p_0^2(f)} = L_p \text{ [dB]} - 10 \log \frac{p_0^2(f)}{p_0^2} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Formule (5) laat zien dat in een bepaald frequentiegebied het geluidniveau  $L_A$  in dB(A) uit het geluidrukniveau  $L_p$  in dB is af te leiden (en omgekeerd) door middel van een correctieterm, die in feite het geluidrukniveau in dB voorstelt van een fictieve, geïdealiseerde gehoordrempel.



figuur 4. enkele karakteristieke geluiden

Figuur 4 brengt de grenzen in beeld van het hoorbare geluid en die van spraak en muziek. Het frequentiebereik van het menselijke gehoor ligt globaal tussen 16 Hz en 16000 Hz en beslaat 10 octaven. Een octaafband is een frequentiegebied, dat omvat wordt door een ondergrens  $f_1$  en bovengrens  $f_2$ , waarvoor per definitie geldt:  $f_2 = 2 \cdot f_1$ .

Naast octaven kent men ook halve octaven ( $f_2 = \sqrt{2} \cdot f_1$ ) en tertsen ( $f_2 = \sqrt[3]{2} \cdot f_1$ ).

Gebruikelijk is om zulke frequentiebanden aan te duiden met hun zogeheten middenfrequentie, gedefinieerd als:

$$f_m = \sqrt{f_2 \cdot f_1} \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

In de akoestiek hanteert men voor berekeningen en beoordelingen een reeks voorkeurfrequenties, die bij afspraak zijn vastgelegd als de middenfrequenties van de internationaal genormaliseerde octaafbanden van tabel 1.

octaafband nummer	frequentiegebied [Hz]	middenfrequentie [Hz]
1	45 - 90	63
2	90 - 180	125
3	180 - 355	250
4	355 - 710	500
5	710 - 1415	1000
6	1415 - 2830	2000
7	2830 - 5660	4000
8	5660 - 11320	8000

tabel 1. genormaliseerde octaafbanden

Elke octaafband kan weer onderverdeeld worden in drie genormaliseerde tertsbanden met middenfrequenties zoals in tabel 2.

Strikt genomen zijn de in tabel 2 opgenomen correctietermen voor de conversie van dB naar dB(A) alleen geldig voor de vermelde tertsbanden; echter, in de praktijk worden ze ook voor octaafbanden gebruikt.

frequentie [Hz]	A-weging	B-weging	C-weging	D-weging
50	-30,2	-11,6	-1,3	-13,6
63	-26,2	-9,3	-0,8	-11,6
80	-22,5	-7,4	-0,5	-9,6
100	-19,1	-5,6	-0,3	-7,8
125	-16,1	-4,2	-0,2	-6,0
160	-13,4	-3,0	-0,1	-4,4
200	-10,9	-2,0	0	-3,1
250	-8,6	-1,3	0	-1,9
315	-6,6	-0,8	0	-1,0
400	-4,8	-0,5	0	-0,3
500	-3,2	-0,3	0	0
630	-1,9	-0,1	0	-0,1
800	-0,8	0	0	-0,4
1000	0	0	0	0
1250	0,6	0	0	1,9
1600	1,0	0	0,1	5,4
2000	1,2	-0,1	0,5	8,0
2500	1,3	-0,2	0,3	10,0
3150	1,2	-0,4	0,5	11,0
4000	1,0	-0,7	0,8	10,9
5000	0,5	-1,2	-1,3	10,0
6300	-0,1	-1,9	-2,0	8,5
8000	-1,1	-2,9	-3,0	6,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4	3,0

tabel 2. correctietermen voor de weegfuncties A, B, C en D  
niveau in dB(A) = niveau in dB + tabelwaarde

Het totale geluidrukniveau van diverse gelijktijdig optredende bronnen, volgt uit de *energetische sommatie* over de afzonderlijke niveaus  $L_{p,i}$  (substitueer formule 3 in formule 4); dit levert het zogenaamde resulterende geluidrukniveau:

$$L_{p,res} = 10 \cdot \log \sum_i \frac{p_{eff,i}^2}{p_o^2} = 10 \cdot \log \sum_i 10^{L_{p,i}/10} \quad (7)$$