Fysische eigenschappen van geluid (2005-2006)

Wat is geluid?

Het medium waarin wij leven is lucht. Dit medium is samenpersbaar. Wanneer lucht plaatselijk wordt samengeperst ontstaat een drukgolf. Wanneer een dergelijke drukgolf door ons gehoor kan worden waargenomen spreken we van *geluid*. Om hoorbaar te zijn moet de frequentie-inhoud van de drukgolf binnen het hoorbare frequentie gebied vallen. Verder moet de amplitude van het geluid binnen bepaalde grenzen vallen, zodat deze boven de drempel van het gehoor uitkomt en niet zo hoog is dat ons oor er kapot van gaat.

- Het hoorbare frequentie gebied loopt (voor de mens) van 20 Hz tot 20 kHz (= audio frequentie gebied).
- De drempelwaarde (= minimale amplitude van een frequentiecomponent, zodat deze juist hoorbaar is) is afhankelijk van de frequentie. Ons oor is het meest gevoelig voor frequenties is de range van 1 tot 4 kHz. Voor een frequentie van 1 kHz is de kleinst waarneembare geluidsdruk-amplitude 20 µPa (Pascal is SI-eenheid voor druk: 1 Pa= 1 N/m^2). De bovengrens van geluidsdrukamplitudes ligt ronde 200 Pa (NB: factor 10^8).

In figuur 1 is de gevoeligheid van het menselijk oor als functie van de frequentie van zuivere tonen (= sinus-vormige geluidsgolven) weergegeven. De meest linkse as geeft de geluidsdruk in Pascal. De curves tonen de z.g. isofonen. Deze isofonen zijn gerelateerd aan de luidheid van een toon van 1 kHz: de drempel-isofooncurve heeft als waarde 0 foon (de geluidsdruk van 1 kHz is 0 dB), voor de 40 foon-curve is de geluidsdruk van 1 kHz 40 dB etc. (de dB-schaal en de geluidsintensiteit (rechter-as) zullen verderop in dit stuk worden uitgelegd).

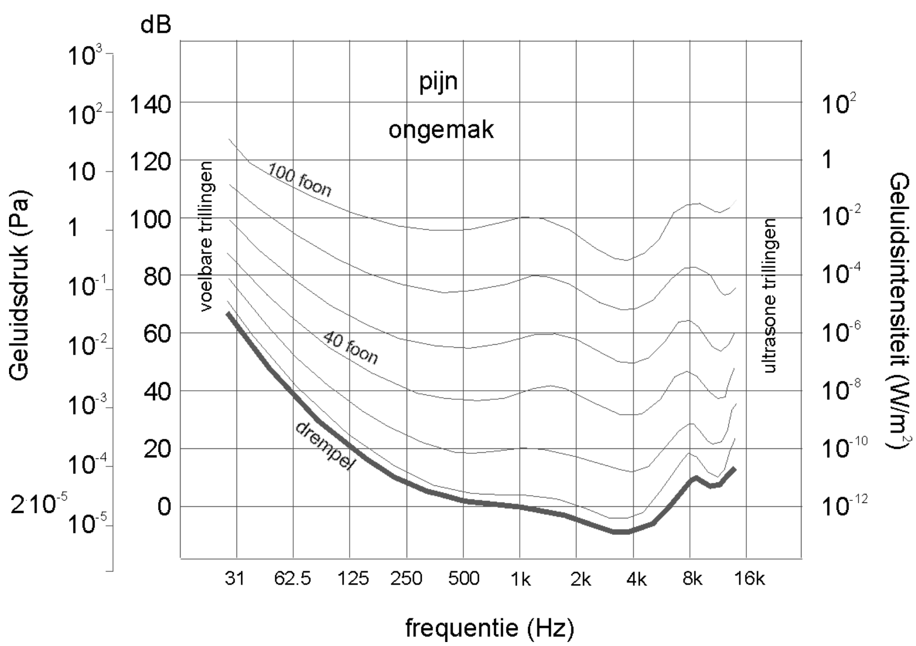

Fig. 1: Frequentiegevoeligheid van het menselijk oor.

Voortplantingssnelheid van geluid

De snelheid, *v*, waarmee geluid zich door een samendrukbaar medium verplaatst is afhankelijk van de elastische en inerte (traagheids) eigenschappen van het medium:

$$v_{gelud} \propto \sqrt{\frac{inverse\_samendrukbaarheid\_van\_medium}{dichtheid\_van\_medium}} = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

- De inverse samendrukbaarheid van een medium wordt uitgedrukt in de z.g. bulk modulus, *B*. Waarbij geldt:

  $$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V}$$

  Met *P* = druk en *V*= volume. B is groot wanneer voor een weinig samendrukbaar medium en klein wanneer een medium gemakkelijk kan worden samengdrukt.
  Het negatieve teken geeft aan dat B altijd positief is. Immers bij een toename van de druk zal het volume afnemen.
- De dichtheid van een medium, ρ, is de massa per volume eenheid.

In onderstaande tabel zijn de geluidssnelheden voor verschillende media weergegeven. Je ziet dat de geluidssnelheid in ijzer en hout bijzonder hoog is. Voor deze media geldt dat *B* groot is t.o.v. de dichtheid van het medium. Voor rubber daarentegen geldt dat de samendrukbaarheid groot is (*B* is klein), terwijl ook de dichtheid groot is. De snelheid van geluid is rubber is daardoor zeer laag.

tabel I: geluidssnelheid in verschillende media

medium	v_{geluid} **[m/s]**	ρ **[kg/m^3]**
lucht (0 ^{o}C)	331	
lucht (20 ^{o}C)	343	1,3
helium (0 ^{o}C)	972	
water (25 ^{o}C)	1493	1,0 e3
ijzer	5130	7,9 e3
rubber	54	1,1 e3
hout	3300	0,4 e3

Energie van geluid

Geluidsdrukgolven zijn z.g. *longitudinale* golven. Dat wil zeggen dat de beweging van de afzonderlijke moleculen in het medium parallel loopt aan de bewegingsrichting van de drukgolf.

Wanneer de zuiger van figuur 1 sinusvormig wordt bewogen zal er een sinusvormige drukgolf ontstaan. Deze drukgolf heeft een golflengte, λ [m], en een amplitude [Pa]. Hierbij is λ afhankelijk van de frequentie en de amplitude afhankelijk van de amplitude waarmee de zuiger wordt bewogen.

Fig. 2: Door sinusvormige beweging van een zuiger in een nauwe buis ontstaat een sinusvormige drukgolf.

Afzonderlijke moleculen in het medium maken ook een harmonische beweging (parallel aan de bewegingsrichting van de drukgolf) met frequentie, f [Hz], gelijk aan de frequentie waarmee de zuiger wordt bewogen, en Amplitude, A [m], afhankelijk van de maximale uitwijking van de zuiger:

$$y(t) = A\sin(2\pi ft + \varphi),$$

Hierin is y de verplaatsing van het molecuul, t de tijd, A is de maximale verplaatsing en f is de frequentie van het geluid [Hz]. De reciproke van de frequentie (1/f) is de periode T, φ is fase [rad].

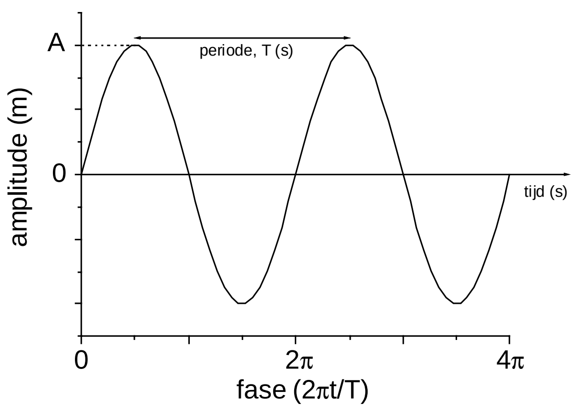

Fig. 3.: Sinusvormige beweging van moleculen in een samendrukbaar medium.

De energie van de geluidsgolf [eenheid: Joules, J] wordt geleverd door de oscillerende beweging van de moleculen. Als de som van de energieën van alle moleculen wordt genomen krijgen we de energie in de geluidsgolf.

De instantane kinetische energie van een molecuul is:

$$E_{Ki} = \frac{1}{2} m v_i^{\,2}$$

met m = massa van het molecuul, v_i = de snelheid van het molecuul (dus NIET de snelheid van de geluidsgolf).

Voor v_i geldt:

$$v_i = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} A\sin(2\pi ft + \varphi) = 2\pi fA\cos(2\pi ft + \varphi)$$

$$E_{Ki} = \frac{1}{2} m v_i^{\;2} = \frac{1}{2} m[2\pi f A \cos(2\pi f t + \varphi)]^2$$

Voor een bewegend deeltje geldt dat de kinetische energie maximaal is bij maximale snelheid en nul is als snelheid nul is. Op dat moment is de potentiële energie maximaal. Wanneer er geen verlies van energie optreedt (door b.v. wrijving), dan wordt kinetische energie geheel omgezet in potentiële energie en vise versa. De totale energie van een deeltje is de som van de kinetische en potentiële energie en is gelijk aan de maximale kinetische (of maximale potentiele) energie. De kinetische energie is maximaal als de cosinus-uitdrukking in bovenstaande formule gelijk is aan 1. Dus:

$$E_{Kt} + E_{pot} = E_{totaal} = \frac{1}{2} m 2^2 \pi^2 f^2 A^2 = 2 m \pi^2 f^2 A^2$$

Voor een gas of vloeistof met dichtheid, ρ, is de energie in een geluidsgolf gelijk aan de energie van een deeltje maal het aantal deeltjes in volume *V*:

$$E_{golf} = 2\pi^2 f^2 A^2 \rho V$$

Met *V*= totale volume van geluidsgolf. Dus de totale hoeveelheid energie in een geluidsgolf is evenredig met het kwadraat van de frequentie en het kwadraat van de amplitude en met de dichtheid van het medium.

Vermogen van geluid

Het vermogen, *P*, van een geluidsgolf is de energie per tijdseenheid [eenheidd: Joule/s of Watt].

$$P_{golf} = \frac{E_{golf}}{t}$$

waarin *t* = tijd [s]. Wanneer er geen energieverlies optreedt is het vermogen van een geluidsgolf gelijk aan het vermogen van de geluidsproducerende bron.

Intensiteit van geluid

Vaak ben je niet zozeer geïnteresseerd in het vermogen van een gehele geluidsgolf, maar in de hoeveelheid vermogen per oppervlakte-eenheid. Dit wordt uitgedrukt in de intensiteit, *I*:

$$I = \frac{P_{golf}}{O} = \frac{E_{golf}}{O \cdot t}$$

De geluidsintensiteit kan ook worden gerelateerd aan de geluidssnelheid en de amplitude van de oscillerende moleculen in het medium. De intensiteit is gelijk aan de hoeveelheid energie per volume-eenheid maal de geluidssnelheid (v_{geluid}):

$$I = \frac{E_{golf}}{V} v_{geluid} = 2\pi^2 f^2 A^2 \rho \cdot v_{geluid}$$

De meest gebruikelijke manier om intensiteit van geluid uit te drukken is in intensiteits niveau, L_I. Het intensiteitsniveau drukt de intensiteit uit gerelateerd aan een standaard intensiteitsniveau, I_0. Dit niveau wordt uitgedrukt in decibels (dB):

$$L = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \text{[dB]}$$

waarbij L= geluidsintensiteitsniveau in dB, I = intensiteit van het geluid, I_0 = referentie intensiteit.

I_0 wordt voor lucht normaliter gesteld op 10^{-12} W/m^2. Dit is de drempel voor het waarnemen van geluid met een frequentie van 1000 Hz (zie fig. 1). Het is handig om met een logaritmische schaal te werken omdat de gevoeligheid van het menselijk oor ook volgens een logaritmische schaal werkt. Er geldt:

$\frac{\Delta I}{I} = C$. Dit wordt de wet van Weber-Fechner genoemd.

In onderstaande tabel staan intensiteit niveaus van verschillende geluiden opgesomd:
Zoals je ziet is de geluidsrange die wij kunnen waarnemen enorm. (7 decaden in druk en 14 in intensiteit). Het luidste geluid dat wij kunnen tolereren is 120 dB hoger dan het geluid dat wij net kunnen horen (= intensiteitsfactor van 10^{14} !). Ook om deze reden is het handig om met een decibel schaal te werken.

Tabel II: geluidsniveaus van verschillende geluiden.

	geluidsniveau, L_I (dB)	Intensiteits-ratio I/I_0	Ampl ratio A/A_0
ernstige gehoorbeschadiging	160	10^{16}	10^{16}
vliegtuig dichtbij	150	10^{15}	$10^{7,5}$
pijngrens	120	10^{12}	10^{6}
geweerschot	100	10^{10}	10^{5}
claxon op 6 meter afstand	90	10^{9}	$10^{4,5}$
drukke verkeersweg	80	10^{8}	10^{4}
stofzuiger	70	10^{7}	$10^{3,5}$
spraak	50	10^{5}	$10^{2,5}$
achtergrondruis in normale kamer	40	10^{4}	10^{2}
stilte gebied, ritselende bladeren	10	10	$10^{0,5}$
gehoordrempel (f= 1000 Hz)	0	1	1

De geluidsdruk

De geluidsintensiteit legt een gemakkelijk verband met het door een geluidsbron uitgestraald vermogen en is daardoor een bruikbare maat. Echter, wanneer het vermogen van de geluidsproducerende bron onbekend is en een meting moet worden gedaan m.b.v. een microfoon, dan wordt over het algemeen niet de geluidsintensiteit, maar de druk, p (kleine letter!), gemeten. Omdat de geluidsdruk gedurende een cyclus varieert wordt gewerkt met de effectieve (Engels: rms = root mean square)geluidsdruk, p_e. ($p_e = \sqrt{< p^2 >}$). Vaak wordt in de notatie van de druk de notatie voor de rms-waarde achterwege gelaten.

De druk wordt weergegeven in SPL-waarden (SPL= sound pressure level). De intensiteit is evenredig met druk in het kwadraat:

$$I \propto p^2$$

Dus voor de geluidsdruk geldt:

$$SPL = 10\log\left(\frac{p_e{}^2}{p_{e0}{}^2}\right) = 20\log\left(\frac{p_e}{p_{e0}}\right)$$

Tabel III: Overzicht van geluidsdruik, geluidsintensiteit en geluidsvermogen.

		referentiewaarde
geluidsdrukniveau	$L_p = 20\log\frac{p_e}{p_{e0}}$	p_{e0} = 20 μPa
geluidsintensiteitsniveau	$L_I = 10\log\frac{I}{I_0}$	I_0 = 1 pW/m^2
geluidsvermogensniveau	$L_P = 10\log\frac{P}{P_0}$	P_0 = 1 pW

Voor een vlakke golf geldt de volgende relatie tussen druk en intensiteit:

$$I = \frac{(\Delta p_{\max})^2}{2\rho v_{geluid}}$$

met $p_{\max}$ is maximale drukverschil, ρ is dichtheid van medium, v_{geluid} is geluidssnelheid in het medium (ga na dat hieruit volgt dat I_0 zo goed als gelijk is aan p_{e0}).

Wegingen van het geluidsniveau

Wanneer we een idee willen hebben wat de relatie is tussen de gemeten geluidsdruk of de geluidsintensiteit en de luidheid van het geluid dan moet je beseffen dat ons oor niet even gevoelig is voor verschillende frequenties (zie fig. 1). Om deze reden wordt een meting vaak ‘gewogen’. Een veel gebruikte weging is de z.g. dB-A weging. Deze weging bootst de gevoeligheid van het menselijk oor bij ‘normale’ geluidsdruk (40 dB) na (zie fig. 4). Wanneer een zeer luid geluid wordt bemeten wordt de C-weging toegepast. Deze weging bootst de frequentiegevoeligheid van het menselijk oor bij zeer luide geluiden na. Dit filter is veel vlakker dan dat van de A-weging. Je kunt ook in fig. 1 zien dat naarmate de geluidsintensiteit toeneemt de iso-fonen vlakker worden. Er bestaat ook nog een B-weging, welke tussen de A en C-weging in zit. Deze wordt zeer zelden toegepast.

Wanneer de druk of intensiteit van geluid m.b.v. van een A-weging wordt gemeten wil dit nog niet zeggen dat hiermee een maat is verkregen voor hoe luid dit geluid voor een menselijke waarnemer klinkt. Enerzijds komt dit doordat bovenstaande filters slechts in benadering de iso-foon curves van de menselijke waarnemer nabootsen, maar belangrijker is nog dat bovenstaande iso-fonen zijn gemeten voor zuivere tonen (= sinusvormige drukgolven, tonen met daarin maar 1 frequentiecomponent). Geluid dat wij in ons dagelijks leven om ons heen horen bevat haast altijd meerdere frequentie componenten. De totale luidheid van geluid dat is opgebouwd uit meerdere frequentie-componenten is geen simpele optelling van de verschillende componenten van het geluid (dit zal in het gedeelte over ‘bouw en werking van het oor’ verder worden uitgelegd. Daar zal ook aandacht worden besteed aan de ‘soon’: de eenheid waarin subjectieve luidheid wordt uitgedrukt).

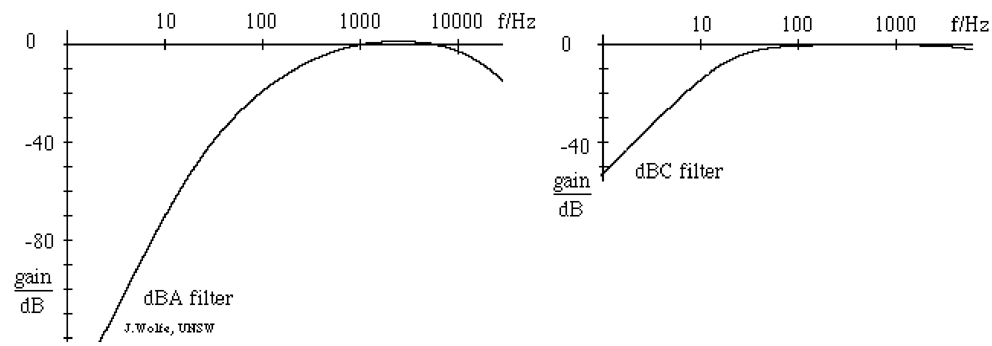

Fig.4: dB-A en dB-C filter.

Temporele en spectrale eigenschappen van geluid
De meeste geluidsbronnen die wij in ons dagelijks leven tegenkomen produceren geen sinusvormige drukgolf (bestaande uit 1 frequentie component), maar hebben een meer complexe golfvorm, welke is samengesteld uit een heel aantal frequentiecomponenten. Met behulp van Fourier analyse kunnen we elke golfvorm ontleden in zijn afzonderlijke frequentie componenten met bijbehorende amplitude en fase. In fig. 5 zijn een aantal golfvormen getekend met bijbehorend amplitude spectrum (de fase van de verschillende frequentie componenten is niet weergegeven). Periodieke stimuli, zoals de sinus, de blokgolf en de pulstrein hebben lijn-spectra (het geluid bevat duidelijk afzonderlijke frequentiecomponenten). Niet periodieke geluiden, zoals de enkele puls, de witte ruis en de kort durige toon, hebben continue spectra.

In ons oor wordt op het binnenkomend geluid een soort Fourier analyse uitgevoerd. We kunnen hierdoor verschillende frequentie-componenten in een geluid van elkaar onderscheiden. (In het gedeelte over ‘bouw en werking van het oor’ zullen we zien dat dit vermogen o.a. afhangt van het oplossend vermogen van deze Fourier analyse).

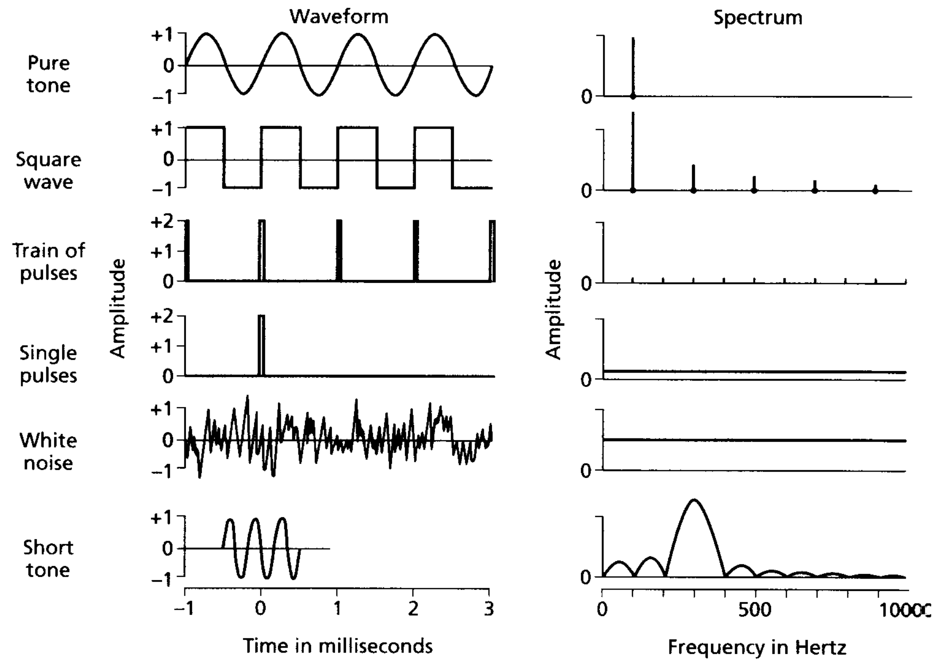

Fig. 5: golfvormen met bijbehorende amplitude-spectra