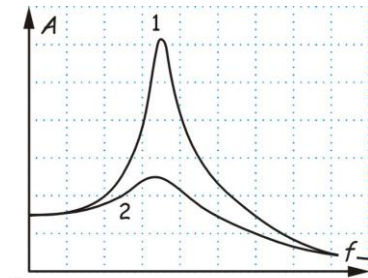


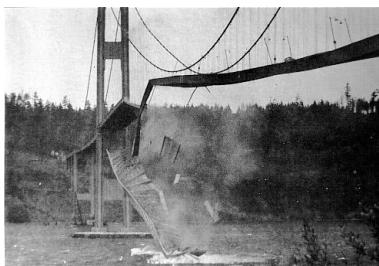
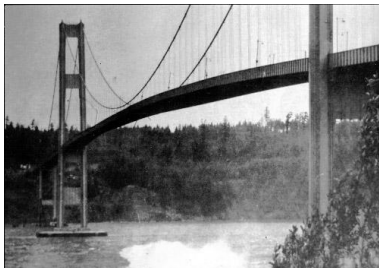
## Resonantie

Twee stemvorken resoneren alleen als ze dezelfde eigenfrequenties hebben. Als je één van de benen van een stemvork iets verzwaart, verandert zijn frequentie en krijg je geen resonantie. Dat luistert heel nauw, net als bij de slinger van Wilberforce. Als we met de ene trilling een andere aan de gang brengen, spreken we van een *gedwongen trilling*. Alleen als de opgelegde frequentie  $f$  in de buurt ligt van  $f_{\text{resonantie}}$  krijgt de gedwongen trilling een grote amplitude. Bij een stemvork heeft de  $A(f)$ -grafiek een smalle piek (1). Als de trilling sterk gedempt is, luistert het minder nauw welke frequentie je gebruikt (2).



Een wijnglas kapotzingen lukt niet, maar met een toongenerator kan dat wel. Eerst zoek je de eigenfrequentie van het glas op door papiertjes over de rand te hangen en dan draai je het volume op. Resonantie is een zeer belangrijk verschijnsel in de techniek. Zo is in 1940 in de Verenigde Staten een brug van 850 m lengte stukgetrild toen hij ging resoneren met windvlagen die iedere 2 s kwamen. Bij de herbouw werd de veerconstante een stuk groter gemaakt.

Bij de Erasmusbrug in Rotterdam was men er eerder bij, die had in het begin last van resonerende ophangkabels. Nadat die verzwaard waren, was het probleem voorbij. Ook een gewone brug kan stuktrillen als een militaire colonne niet uit de pas loopt.



Om flatgebouwen te beschermen tegen aardbevingen worden tal van technieken toegepast. Zoals het plaatsen van een zwembad op

de bovenste verdieping. Het water daarin zal bij een beving uit fase bewegen en zo de trilling van het gebouw dempen. Op schepen wordt de energie van het slingerende schip soms overgedragen op water in tanks in de wanden.

In ons land resoneren gebouwen met langskomend verkeer, zeker nu steeds lichtere bouwmaterialen gebruikt worden. De huid van een vliegtuigvleugel kan worden bekleed met een composiet waarin geheugenmetaal is verwerkt. Door daar een stroom door te sturen kan de eigenfrequentie worden veranderd en resonantie worden vermeden.

In een magnetron resoneren watermoleculen met de opgelegde elektromagnetische trilling van 2450 MHz zodat de thermische energie van de moleculen toeneemt.

Bij ultrareiniging met geluidsgolven worden door resonantie 'cavitaties' (vacuümbelletjes) gemaakt in een vloeistof. Als die imploderen, maken ze het vuil los.

Dit speelgoed werkt alleen maar doordat het zwaaien van de benen resoneert met het schommelen van de mannetjes.



### De Botafumeiro in Santiago de Compostella

In de kathedraal van Santiago de Compostella (Google!) hangt een wierookvat (de Botafumeiro) van 60 kg dat door monniken stapsgewijs aan het zwaaien wordt gebracht. Middenonder tillen ze het vat telkens zo'n 3 m op zodat het meer zwaarte-energie krijgt. In de omkeerpunten laten ze het touw vieren zodat die opgeslagen energie vrijkomt als extra trillingsenergie.



Op de site kun je een filmpje vinden waarop te zien is hoe een minibotafumeiro gaat zwaaien.



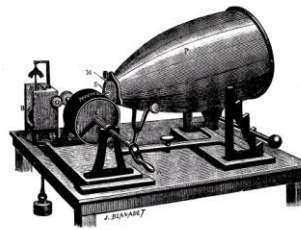
In feite gebeurt bij schommelen hetzelfde. Achter laat je je als het ware vallen en na een kwart slag ga je onderin weer rechtop zitten.



### 'Au claire de la lune'

In 2008 is in Parijs in een archief een beroet papier teruggevonden waarop het lied 'Au claire de la lune' is gekrast. Het is de oudste geluidsopname en stamt uit 1860! Met moderne technieken zijn wetenschappers van het Lawrence Berkely National Laboratory erin geslaagd om het geluid te reconstrueren.

Het stokoude fonogram was vastgelegd met een *phonograph*, een uitvinding uit 1857 van de Franse drukker Édouard-Léon Scott de Martinville. Het apparaat bestaat uit een tonvormige hoorn met daaraan een stift die geluidstrillingen kan vastleggen op een draaiende beroete trommel.



De uitvinder wilde geluid registreren, want hij vermoedde dat je geluid pas kunt begrijpen als je er naar *kijkt*. Aan afspelen van de opgenomen geluidsfragmenten dacht men in 1860 nog helemaal niet. Dat kon pas in 1877 met de grammofoon van Edison.

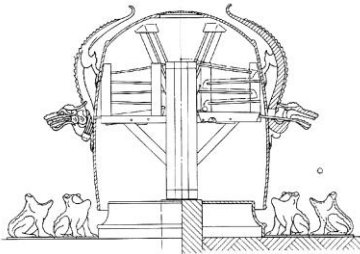
Op de site staat de link naar de site waar je de oudste geluidsopname kunt horen. De woorden die worden gezongen door een vrouw zijn duidelijk te onderscheiden.

**Aardbevingen**

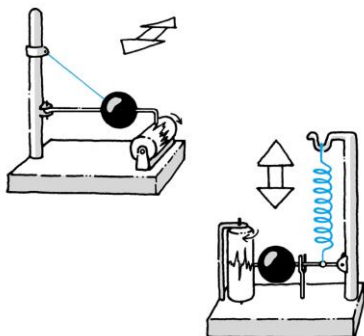
Bij een aardbeving ontstaan zowel longitudinale als transversale golven. De longitudinale kunnen zich niet alleen door water en steen voortplanten – zoals transversale golven – maar ook door lucht. Het zijn geluidsgolven. Daarom kun je een aardbeving niet alleen voelen maar even later ook horen, als je tenminste dicht bij de bron zit. Bij ondergrondse kernexplosies is alle energie naar buiten gericht; daarom zijn ze van aardbevingen te onderscheiden, want die ontstaan als lagen langs elkaar schuiven.

*Seismografen*

Om aardbevingen te registreren, maakte Tsang Heng in 132 een seismoscoop: een bronzen vat met een diameter van bijna 2 m. De centrale zuil ontgrendelde bij een aardbeving een bronzen bal in een van de acht drakenkoppen. Die bal werd door een kikker opgevangen en het geluid daarbij diende als waarschuwing.



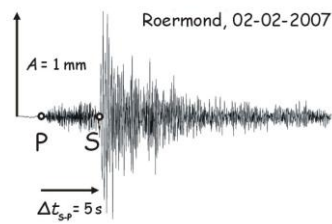
Een seismograaf maakt gebruik van traagheid, bijvoorbeeld van een magneet in een spoel die daarin een stroompje opwekt als de magneet beweegt. Vroeger was dat een zware bol. Om horizontale trillingen te registreren, hangt zo'n bol aan een draad. De draaiende papierrol beweegt mee met de aarde, maar de bol blijft door zijn traagheid praktisch stilhangen. Op de rol wordt zo een  $u(t)$ -grafiek geschreven. Verticale trillingen registreert men door een bol aan een veer op te hangen.



Als eerste komen de longitudinale golven aan (primaire of P-golven). Met een snelheid van ongeveer 6 km/s duurt het 20 minuten voor de geluidsgolven van een beving worden geregistreerd op een station aan de andere kant van de aarde.

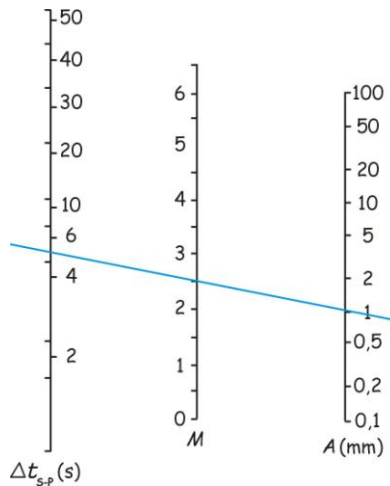
De S-golven (secundaire golven) zijn transversaal en planten zich met 3,5 km/s voort. Hun

amplitude is groter; deze golven zijn de oorzaak van verwoesting van gebouwen.



*De schaal van Richter*

Door de amplitude  $A$  te meten (hier 1 mm) en het tijdsverschil  $\Delta t_{S-P}$  te bepalen tussen aankomst van de P-en S-golven (hier 5 s), kun je de sterkte en de plaats van de beving vinden. Dat eerste gebeurt in het volgende diagram. Links is het tijdsverschil tussen de twee soorten golven uitgezet en rechts de amplitude. Door de 5 s links te verbinden met de 1 mm rechts, vind je op de middelste schaal van Richter een *magnitude M* (sterkte) van 2,5; zie *Binas*.



*Tsunami's*

Verticale bewegingen van de zeebodem in diep water kunnen leiden tot een vloedgolf of 'tsunami', het Japanse woord voor 'lange golf in een haven'. De golven lopen als rimpels over de oceaan met een snelheid van 800 km/h en een golflengte van 200 km; de passage van één golflengte duurt dus een kwartier. De amplitude is enkele decimeters maar bij de nadering van een kust neemt deze sterk toe doordat de snelheid sterk afneemt door de geringere diepte, net als bij een branding.

De aardbeving die de tsunami op tweede kerstdag 2004 veroorzaakte had een sterkte van 9,3 op de schaal van Richter. Alleen al in Sumatra vielen er meer dan 200000 doden.

### Geluidshinder

Bij het beoordelen van geluidshinder maken we gebruik van de *decibel*. Als je het vermogen van een geluidsversterker opvoert van 0,5 W via 5 W tot 50 W, ervaart je oor dat als twee keer dezelfde toename van het geluid. Zo'n stap erbij heet 1 bel, ofwel 10 decibel (dB).

De bel is genoemd naar Bell, de uitvinder van de telefoon. Fluisteren kost je ongeveer  $10^{-9}$  W, schreeuwen kost  $10^{-3}$  W, dat is een miljoen ( $10^6$ ) keer zo veel. *Vermenigvuldigen* met  $10^6$  wordt door ons oor ervaren als 6 bel erbij *optellen*. We zeggen daarom dat ons oor logaritmisch hoort.

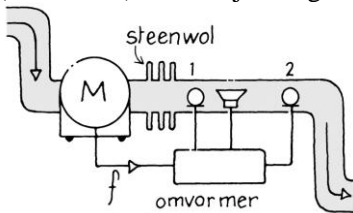
Als de vermogens van twee boxen een *factor k* schelen ( $P_2 = k \cdot P_1$ ) dan bereken je het *verschil* in 'lawaai' *L* (in bel of decibel) zo:  
 $\Delta L = \log k$  bel =  $10 \cdot \log k$  decibel (dB)

*Een twee keer zo groot vermogen betekent dus 3 dB aan lawaai erbij, want  $10 \cdot \log 2 = 3$ .*

Er zijn verschillende manieren om geluidshinder tegen te gaan. Zo kun je geluid absorberen met zwaar materiaal (zie tabel 15B) maar je kent natuurlijk ook de geluidsschermen langs wegen die het geluid wegkaatsen van huizen. We gaan wat dieper in op *antilawaai* en *breking* van geluid.

### Antilawaai

In een verhaal van Arthur C. Clarke uit 1957 *Silence, Please* gebruikt deze schrijver van science fiction als eerste *antigeluid*. Als geluid een golf is, moet je het kunnen doven met een geluidsgolf in tegenfase. Dat werkt bij lage tonen (tot 500 Hz), zoals bij deze graanzuiger.



Met microfoon 1 wordt het geluid van de motor M opgevangen. Daarna wordt het in tegenfase gezet en door een luidspreker uitgezonden. Microfoon 2 geeft door in hoeverre dat is gelukt, zo niet dan volgt actie. De geluidssterkte wordt hierbij teruggebracht van 110 dB tot 70 dB (zie tabel 15D).

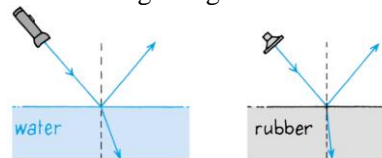
Propellervliegtuigen zijn stiller te maken met deze truc, want de frequenties zijn voorspelbaar. Bij straalvliegtuigen is dat een stuk lastiger omdat die een heleboel frequenties uitzenden.

Er zijn auto's die het geluid van de krukas in de motor opvangen met microfoons in de hoofdsteunen en het antigeluid door de luidsprekers van de radio uitzenden.

Bij sommige machines – bijvoorbeeld dieselmotoren – is het eenvoudiger de computer die de omvormer instrueert, te koppelen aan de toerenteller. Deze computer haalt uit zijn geheugen het juiste antigeluid dat bij die machine en dat toerental *f* hoort. Zo'n omvormer kan klein en licht zijn en door tractorrijders en helicopterpiloten worden gebruikt, zodat alleen het lawaai van de machine wordt onderdrukt en een gesprek mogelijk blijft. Ook in walkmans is het gelukt op deze manier het omgevingsgeluid te verdoezelen. Het geraas van een vlam bij een aardgasinstallatie kan worden onderdrukt door de intensiteit te meten met een fotocel. De omvormer is dan geprogrammeerd om zijn antigeluid aan te passen aan de gemeten lichtsterkte. Nu nog wachten op een omvormer die de radio van de burens doet verstommen ...

### Breking

Het effect van rubber is gebaseerd op breking van geluidsgolven. Omdat de geluidssnelheid in rubber veel kleiner is dan in lucht, breekt het geluid naar de normaal toe en worden de geluidsgolven vervolgens gesmoord. Vergelijk deze breking van geluid met die van licht.



### Gehoorschade

Ook als je geen disc jockey bent, gaat je gehoor op den duur achteruit – vooral bij hoge tonen. In tabel 27D staan de normale audiogrammen voor verschillende leeftijden. Door een geluidsdruk-niveau van meer dan 120 dB kan je trommelvlies scheuren. Bij een rockconcert worden niveaus tussen 95 en 115 dB bereikt; in disco's 80 à 100 dB. Maar ook sommige walkmans kunnen niveaus van 110 dB bereiken. Meer dan 85 dB gedurende een lange periode kan schade opleveren aan je binnenoer. Hoor je dag in dag uit lawaai met een sterkte van 90 dB of meer, dan raak je eraan 'gewend', dat wil zeggen: je bent onherroepelijk doof geworden voor een zeker frequentiegebied, gewoonlijk rond 4000 Hz.