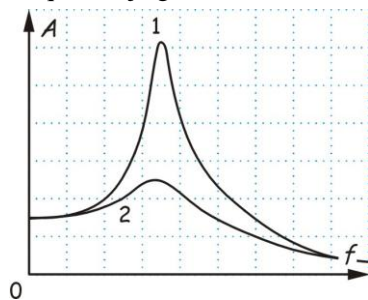


Resonantie

Twee stemvorken resoneren alleen als ze dezelfde eigenfrequenties hebben. Als je één van de benen van een stemvork iets verzwaart, verandert zijn eigenfrequentie 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).



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.

Ook een gewone brug kan stuktrillen als een militaire colonne niet uit de pas loopt.

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.



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. In ons land resoneren gebouwen met langskomend verkeer, zeker nu steeds lichtere bouwmaterialen gebruikt worden.

Je zou zo de indruk krijgen dat resonantie altijd een vervelend verschijnsel is. Er kan echter ook nuttig gebruik van worden gemaakt. Een pacemaker laat het hart samentrekken in het goede ritme. Een arts onderzoekt soms een patiënt door te kloppen en te luisteren naar resonanties in holttes. Zo kan hij wat te weten komen over de grootte van hart en longen.

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 met behulp van resonantie 'cavitaties' (vacuümbelletjes) gemaakt in een vloeistof. Als die imploderen, maken ze het vuil los.

Op schepen wordt de energie van het slingerende schip soms overgedragen op water in tanks in de wanden (zie **Doen**).

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

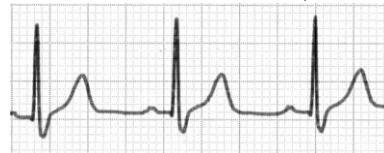


De stelling van Fourier

De Fransman Fourier ontdekte in de 19e eeuw dat iedere zich herhalende grafiek kan worden ontleed in sinussen. De wiskunde die daarbij hoort, wordt *fourieranalyse* genoemd.

Allereerst moet je de periode van het patroon bepalen en daarna het omgekeerde daarvan, de *grondfrequentie* f_0 . De sinussen die je nodig hebt om de figuur te maken hebben frequenties die veelvouden zijn van f_0 .

Zelfs een puntige figuur als een cardiogram is op te bouwen uit sinussen – als je frequenties, amplitudes en fasen maar goed kiest. Bij een hartritme van 82 per minuut zijn de frequenties veelvouden van $82/60 = 1,4$ Hz.



Fouriersynthese

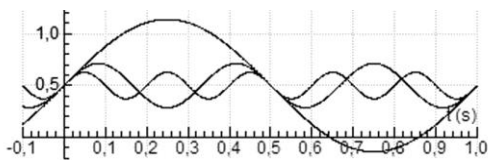
Omgekeerd kan spraak worden nagebootst door een paar goede frequenties te mengen, *fourier-synthese*. Gebruik je er te weinig, dan herken je wel de letter die bedoeld wordt, maar dan klinkt die metalig.

Uit de stelling van Fourier blijkt hoe belangrijk harmonische trillingen zijn. Iedere zich herhalende klank is eruit op te bouwen. Als je weet hoe versterkers, microfoons of oren reageren op zuivere sinustonen, kun je ook voorspellen hoe ze reageren op 'echt' geluid.

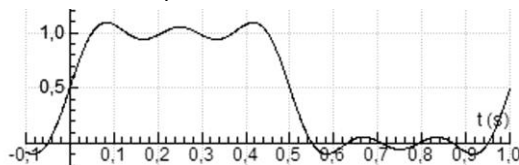
Een blokvorm kan worden opgebouwd door sinussen op te tellen waarvan de frequenties zich verhouden als 1 : 3 : 5:... terwijl de amplitudes zich verhouden als $1 : \frac{1}{3} : \frac{1}{5} \dots$

Om een echt hoekig blok te krijgen, moet je wel oneindig veel sinussen optellen. Met 20 componenten begint het al aardig te lijken en met 100 sinussen heb je alleen nog wat rafels aan de randen.

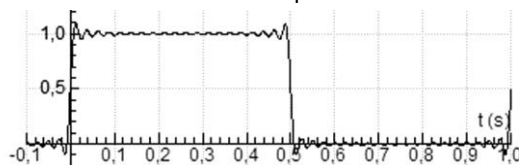
Voor een zaagtand als som heb je een andere combinatie nodig. Tel zelf met een computer sinussen op waarbij de frequenties zich verhouden als 1 : 3 : 5 : ... en de amplitudes als $1 : \frac{1}{9} : \frac{1}{25} \dots$; of de frequenties 1 : 2 : 3 : ... en de amplitudes $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} \dots$



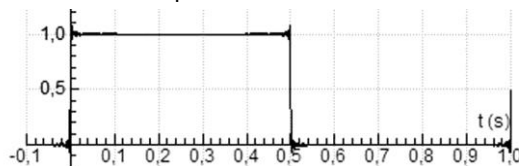
de eerste drie componenten van een blok



de som van de eerste drie componenten



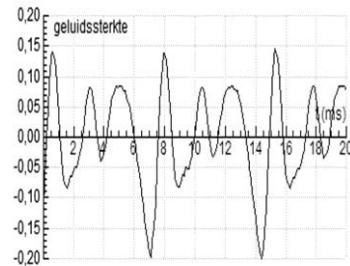
de som van 20 componenten



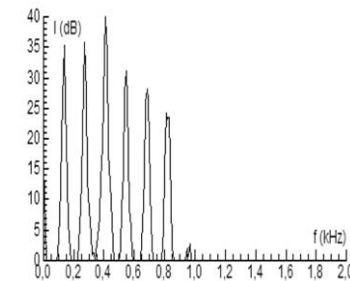
de som van 100 componenten

Klankspectra

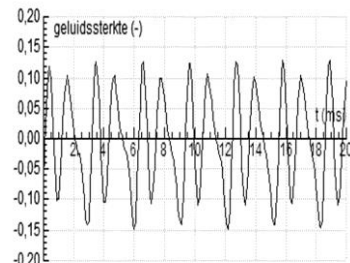
Met signaalanalyse uit Coach is hier nagegaan welke frequenties er zitten in de klank oo, gezongen door een jongen en door een meisje. Zo'n figuur heet een *klankspectrum*. Bij de jongen heeft de grondtoon een veel lagere frequentie met als gevolg dat er veel meer boventonen aanwezig zijn.



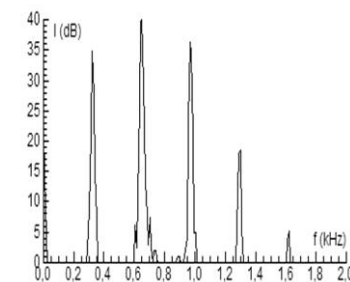
I(t)-grafiek oo ♂



klankspectrum oo ♂



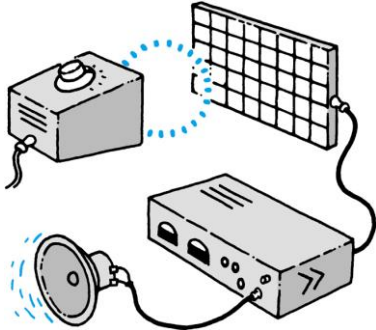
I(t)-grafiek oo ♀



klankspectrum oo ♀

Hoorbare fouriercomponenten

Met de volgende proef kun je fouriercomponenten aantonen. Met een stroboscoop schijnen we op een LDR of een fotodiode. Nog mooier is een zonnecel want dan heb je geen batterij nodig. De spanning over de weerstand (of van de zonnecel) voeren we toe aan een versterker plus luidspreker.



Als de stroboscoop op 110 Hz staat, horen we een vrij scherpe toon die lijkt op een zuivere toon van 110 Hz. De scherpte wordt veroorzaakt door de boventonen van 110 Hz, dat zijn 220 Hz, 330 Hz, enzovoort.

Dat die boventonen echt in het signaal zitten, kunnen we laten horen met zwevingen (zie **Extra**). Zwevingen ontstaan als je twee iets verschillende tonen tegelijk laat klinken. Als we tegelijk met het signaal een zuivere toon van 109 Hz of 111 Hz aan de versterker toevoeren, horen we een jankend geluid, net zoals we dat horen bij een zuivere toon van 110 Hz samen met een zuivere toon van 109 Hz of 111 Hz. Dat lukt ook bij 219 Hz of 221 Hz, enzovoort.