

Het Geheim van de Zijdegrotten

© Rutger Teunissen
www.muziekexact.nl

Termen als “fase” en “fasedraaiing” kom je als muzikant nogal eens tegen, maar wat ze precies betekenen is niet altijd even duidelijk. In deze aflevering wordt een eeuwenoud filter beschreven dat je zelfs kunt binnenwandelen om er de fase-draaiing direct aan den lijve te ondervinden.

Een van de meest dorre oorden op deze planeet is de Gobiwoestijn. 's Zomers is het er zo heet als in een steenoven en 's winters zo koud als op de onderkant van Mars. Een drupje regen is er de laatste 29 jaar niet meer gevallen, en het ruikt er naar stof, zout en zwavel. In dit gebied wil geen leven gedijen, behalve wat slangekruid, een oneetbare kumarchik, of grauwe tamarisk, zo zilt en zurig dat zelfs geen woestijnrat zich eraan waagt. Als je foto's bekijkt van al die lege landschappen en wituitgeslagen kalkplateau's, zou je denken dat het Cambrium, de periode waarin zo'n half miljard jaar geleden de eerste korstmossen de aarde begonnen te bedekken, er nog niet is doorgedrongen.

Toch voert een deel van de beroemde zijderoute, waarover de Kirgiezen, Kalmukken en Mongolen al sinds de dagen van Dzengis Khan zulke mooie liederen zingen, dwars door deze allesverzengende hel. Sterker nog, sommige volken, die leven van de zijdeproductie, bewaren er sinds onheugelijke tijden de tere, temperatuurgevoelige zijdecocons in speciale, ondergrondse, of in rotsen uitgehouwen opslagplaatsen die een zeer merkwaardig temperatuurverloop hebben.

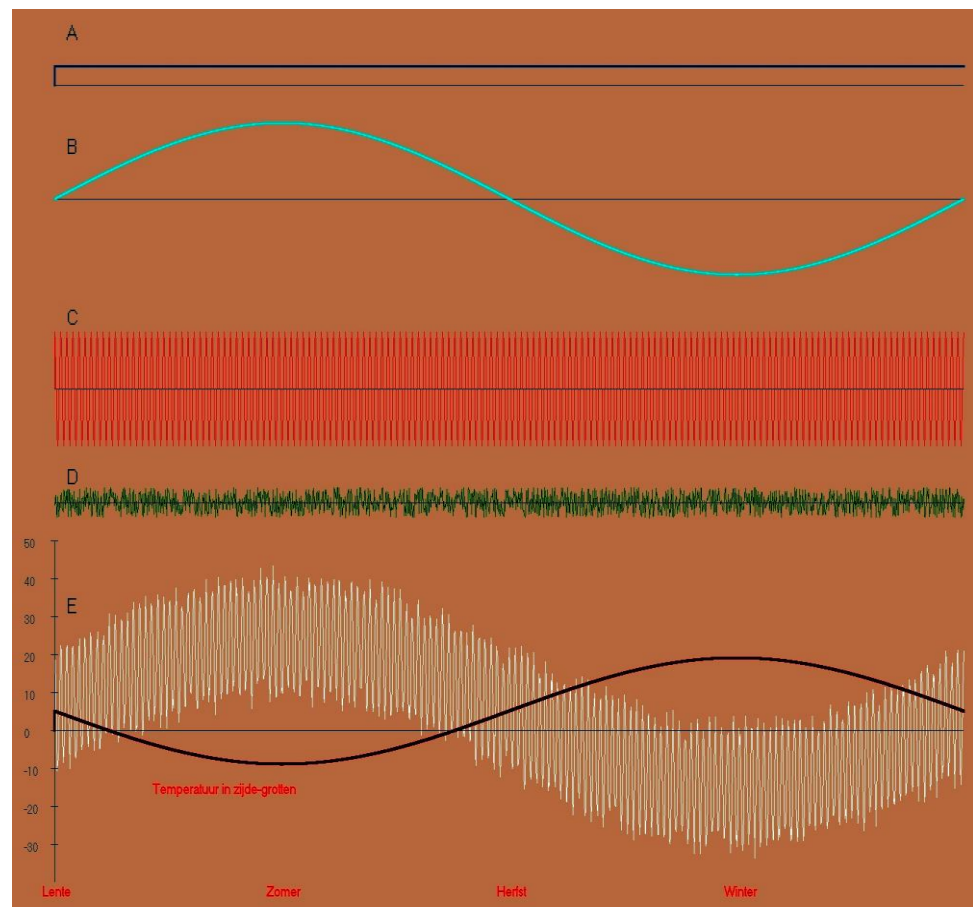
Betreed je zo'n ruimte in de lente, dan merk je niets bijzonders: het is er dan even frisjes als buiten. Maar drie maanden later, hartje zomer, als buiten de mussen van het dak vallen, blijkt het er te vriezen! Keer je er in september weer terug dan is het binnen weer even koel als in het voorjaar, en rond de kerst, als het buiten vriest dat het kraakt, is de temperatuur binnen opgelopen tot aangename, mediterrane waarden. Dit mysterieuze “anti”-klimaat komt zonder technische hulpmiddelen, zonder airco's en thermostaten tot stand.

Als je de laatste twee afleveringen van deze serie gelezen hebt, voel je misschien al aan dat deze zijdegrotten in de Gobiwoestijn iets te maken hebben met filters. Uiteraard gaat het dan niet om de filtering van geluid (= fluctuatie van luchtdruk), maar om de filtering van een andere fluctuatie, namelijk het temperatuurverloop. En anders dan bij geluid, waar sprake is van vele honderden of duizenden trillingen per seconde, verandert de temperatuur maar heel langzaam. Juist vanwege die traagheid, en ook omdat het hier gaat om een warmteverschijnsel in plaats van een luchtdrukverschijnsel, komen een paar eigenschappen van signalen en signaalverwerkers veel duidelijker naar voren dan bij geluid, waar ze zich overigens precies zo voordoen. Daarom kan dit “Gobi-filter” helpen om wat meer vat te krijgen op die eigenschappen.

Zoals in de Proloog van deze serie al ter sprake kwam: digitale signaalverwerking gaat over “signalen”: fluctuerende grootheden. Wat voor grootheden dat zijn, luchtdruk, temperatuur, gewicht, snelheid, lichtsterkte, maakt niet uit. Evenmin of ze langzaam of snel fluctueren, dan wel heftig of nauwelijks waarneembaar. Daarom is DSP zo’n gebied waar in korte tijd veel verschillende vakken, technieken en wetenschappen samenkomen. Een bodemonderzoeker, een astronoom en een taalgeleerde leefden tot voor enkele decennia geleden in totaal verschillende werelden. Nu ontmoeten ze elkaar op DSP-congressen en ontdekken dat ze onafhankelijk van elkaar dezelfde technieken hebben ontwikkeld. Want de trillingspatronen die door het licht van sterren, of door de aardkorst of door de stembanden worden opgewekt, hebben veel met elkaar gemeen.

Zo ook kun je het verloop van temperatuur op precies dezelfde manier bekijken als het verloop van luchtdruk. In Afl. 3 bleek dat je elk geluidssignaal kunt opbouwen door een

additieve synthese van sinussen. Voor het temperatuurverloop op in de Gobiwoestijn geldt precies hetzelfde. In de tijddiagrammen (A, B, C en D) van Fig.1 is te zien uit welke frequentiecomponenten dat verloop is opgebouwd. Allereerst heb je de gemiddelde temperatuur (van 5 graden). Die blijft natuurlijk altijd gelijk en is dus een “sinus” met een oneindig lange periode, dan wel een “frequentie”



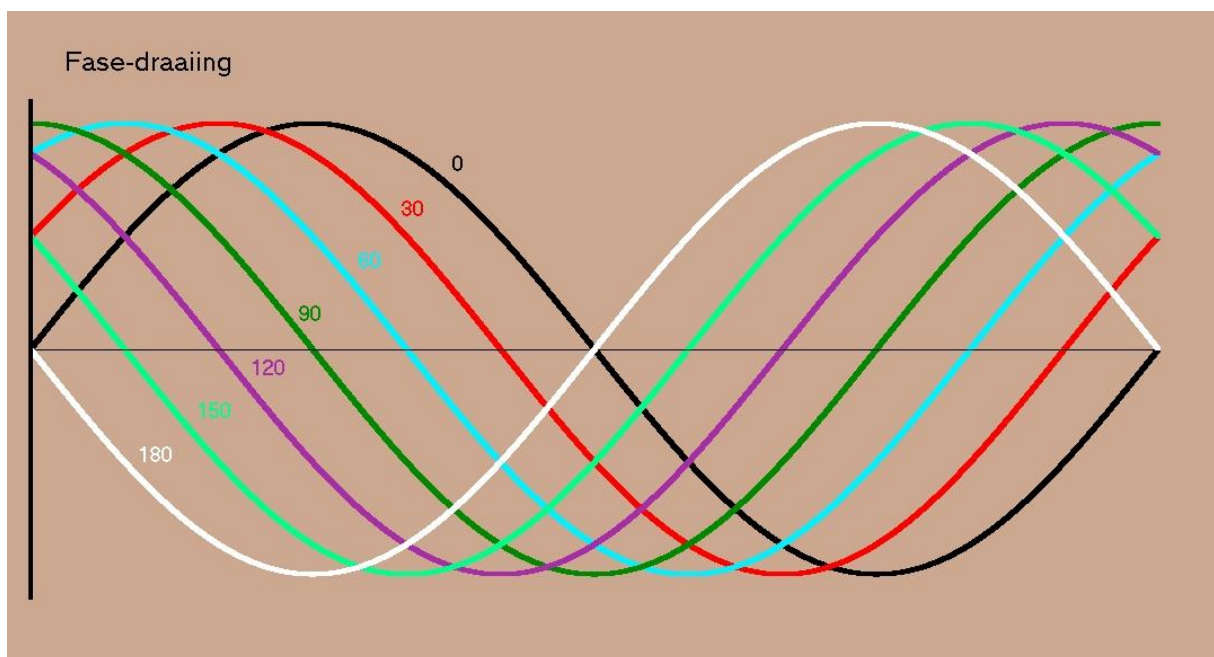
gelijk aan nul. Dat wordt grafisch weergegeven door een horizontale rechte lijn (A), die aangeeft dat de gemiddelde temperatuur op elk tijdstip, dag en nacht, zomer en winter, hetzelfde is. Dan is er de geleidelijke temperatuurverhoging in de zomer en -verlaging in de winter. Dat is dus een cyclus die precies een jaar duurt (B), en die fluctueert boven en onder die gemiddelde temperatuur. Ten slotte schommelt de temperatuur ook per etmaal (C). Die dagelijkse schommeling heeft een frequentie die precies 365 maal zo hoog ligt als de jaarlijkse, en vormt dus als het ware de 365^{ste} “boventoon” van de jaarlijkse schommeling. De grafieken in A, B en C zien er heel regelmatig en dus ook heel onrealistisch uit. In werkelijkheid zal de thermometer dagelijks een afwijking registreren. Die simuleren we in D

door middel van een beetje ruis. Het temperatuurverloop in de woestijn is dus een additieve synthese van $A + B + C + D$ en is te zien als de grillige witte grafiek in E.

Fase

Nu gaat het dus om de vraag wat voor filterproces er in die zijdebunkers plaatsvindt. Hoe sterk of zwak wordt elk van die drie frequentiecomponenten doorgelaten? Wel, 't draait allemaal om de tijd die de warmte of de kou nodig heeft om via het isolerende gesteente binnen te dringen in de bunker. De hoogste frequentiecomponent, die van de dagelijkse schommeling, is vrij simpel weg te filteren. Zoiets kun je in een gewoon rijtjeshuis met beetje isolatie al bereiken: van een zomers hittegolfje dat 1 dag duurt merk je binnenshuis vrijwel niets. Maar hoe trager de temperatuurschommeling verloopt, des te moeilijker is die tegen te houden. Zelfs in het best geïsoleerde huis begint 't, na een paar weken vorst, binnen toch wel wat kil te worden. Langzaam maar zeker sijpelt de kou naar binnen. Ook de dikke steenlaag rond de zijdebunkers in de Gobiwoestijn kan de jaarlijkse schommeling niet tegenhouden, ook al wordt het er binnen nooit zo warm en koud als buiten. Met andere woorden: de jaarlijkse schommeling wordt iets verzwakt doorgelaten. Verder blijkt dat de temperatuur in de bunker schommelt rond dezelfde gemiddelde jaartemperatuur van 5 graden C als buiten. Dus de "nul Hz" component wordt volledig doorgelaten. Het Gobi-filter is dus een laagdoorlaatfilter: de snelle dagfluctuatie wordt volledig uitgeschakeld, de trage jaarfluctuatie wordt ietsje verzwakt, de "nulfluctuatie" wordt ongemoeid gelaten. In Fig. 1 E is het temperatuurverloop van zowel buiten als binnen te zien. De binnentemperatuur is de dikke bruine lijn, waarop geen spoor is terug te vinden van de dagelijkse schommeling; alleen de jaarschommeling rond het gemiddelde is aanwezig. Verder valt op dat de binnentemperatuur daalt als het buiten warmer wordt, en, omgekeerd, stijgt als 't buiten afkoelt. Kennelijk loopt de binnentemperatuur precies een half jaar achter op die van buiten. Dat komt door de precies afgemeten dikte van het gesteente, waar de temperatuurverandering zo langzaam doorheen dringt dat die vertraging van 6 maanden ontstaat.

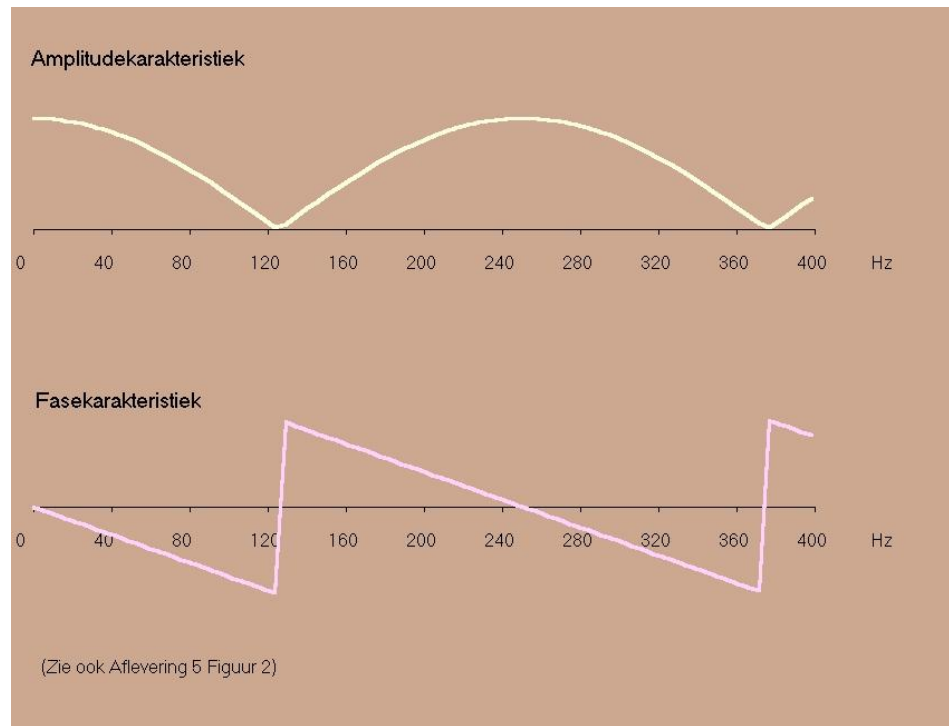
Het Gobi-filter doet dus twee verschillende dingen met de jaarschommeling. Ten eerste wordt die (ietsje) verzwakt, waardoor er binnen minder extreme temperaturen optreden dan



buiten, maar bovendien wordt ook nog eens de “richting” van de schommeling omgekeerd. Dat laatste effect, waardoor in de binnenruimte zomer en winter een half jaar opschuiven vergeleken met buiten, wordt een *fasedraaiing* genoemd. Een ruimte zo te construeren dat je er de seizoenen mee kunt verwisselen, dat is het geheim van de zijdegrotten in de Gobiwoestijn.

De fase wordt niet uitgedrukt als een tijdsduur, zoals de delaytijd, maar in graden. Bij het Gobi-filter is gemakkelijk in te zien waarom. De seizoenen vormen een cyclus: na een

periode van precies 1 jaar ben je weer “op hetzelfde punt” terug. Je draait in een cirkel rond, en doorloopt dus een hoek van 360 graden. De fasedraaiing van een half jaar komt dus overeen met een hoek van 180 graden. In Figuur 2 is die te zien als de witte sinus, die precies het spiegelbeeld is van de zwarte, of, zoals dat heet, “uit fase” is met de zwarte. Als de temperatuur in de grot twee maanden achter zou lopen op de buitentemperatuur, dan had je die blauwe sinus gekregen die een fase-draaiing van 60 graden heeft.

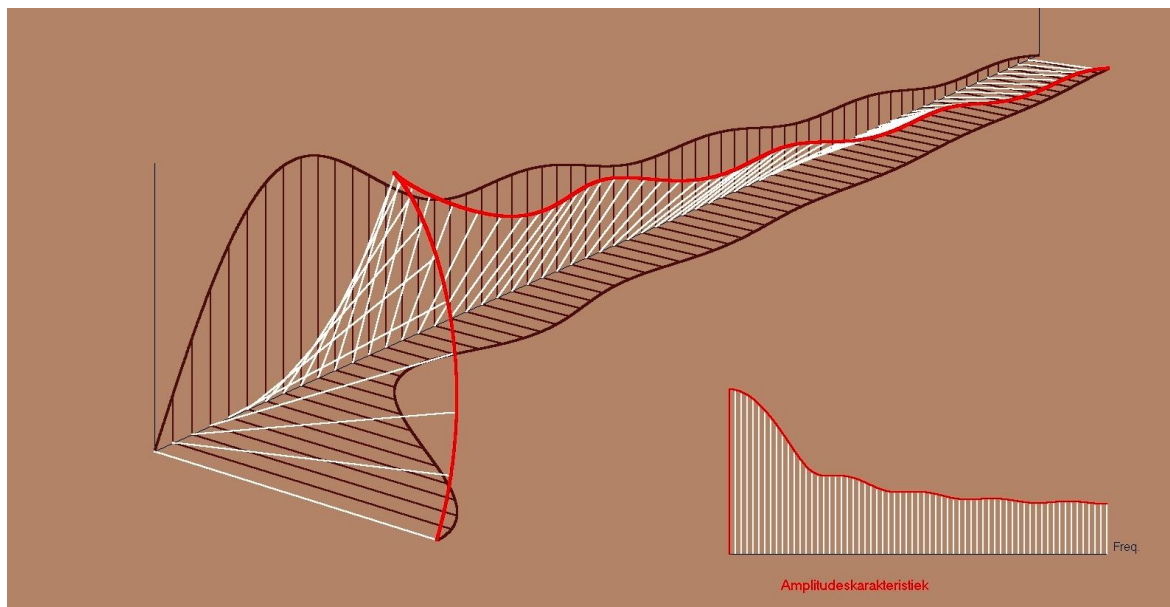


Dranghekje

We zagen dat een filter “frequentieselectief” te werk gaat, en de ene frequentie sterker doorlaat dan de andere. Dat geldt precies zo voor de fase: een filter kan aan verschillende frequentiecomponenten een heel verschillende “draai” geven. Dus eigenlijk heeft elk filter niet één, maar twee frequentie karakteristieken. Eén die laat zien hoe sterk een toon wordt doorgelaten, (de amplitudekarakteristiek die we in vorige afleveringen gemakshalve hebben aangeduid als frequentie karakteristiek) en één voor de fasedraaiing (fasekarakteristiek). In Figuur 3 zie je die van het kamfilter uit Aflevering 5. De fase loopt langzaam af van nul naar -90 graden en springt dan plotseling op naar $+90$ graden, precies op de plaats waar de amplitudekarakteristiek op z’n laagst is. Door dat soort plaatjes krijg je al gauw de indruk dat er een soort vaste relatie bestaat tussen amplitude en fase. Dat is inderdaad vaak, maar zeker niet altijd het geval. Zo heb je filters met een heel complexe fasekarakteristiek, en een kaarsrechte, horizontale amplitudekarakteristiek die dus alle frequenties even sterk doorlaten en om die reden *all pass* filters worden genoemd. Die worden gebruikt om uitsluitend de fase van de frequentiecomponenten te wijzigen. Later zullen we zien hoe je dat toepast bij het simuleren van galm. Amplitudegedrag en fasegedrag zijn dus de twee verschillende kenmerken van elk filter. Toch hangen ze op een wonderlijke manier samen, zoals te zien is in Figuur 4. De perspectivische figuur doet een beetje denken aan een dranghekje waar een

aantal voetbalfans enthousiast tegenaan heeft staan duwen, maar het is toch iets anders. Rechtsonder is de amplitudekarakteristiek getekend van een filter in de vorm van de rode kromme. De witte paaltjes geven aan hoe sterk een aantal sinussen van oplopende toonhoogte en gelijk volume uit het filter tevoorschijn komen. Het is duidelijk een *Low Pass* filter, want de lijnen links in de grafiek, waar de lage tonen staan, zijn het langst. Die rode lijn met de witte paaltjes kun je gemakkelijk herkennen in de grote 3D-tekening. Daarin is de relatie tussen fase en amplitude zichtbaar. Elke sinus (wit paaltje) heeft een eigen lengte (amplitudekarakteristiek) en een eigen schuinstand (fasekarakteristiek). Maar er is nog meer te zien. Het dranghekje werpt schaduwen, zowel op de grond als op de muur. Wat hebben die te betekenen?

In Afl. 6 kwam de term impulsresponsie ter sprake. Die bleek niets anders te zijn dan het geluidje wat je hoort als je een (akoestisch of elektronisch) filter “aantikt”. Dat geluidje heeft



bepaalde boventonen, dus sinussen met elk hun eigen sterkten en fases. Nog weer eerder, in Afl. 3, werd al even vermeld dat je die sterktes en fases kunt bepalen met behulp van een FFT- (Fast Fourier Transform) programma, dat tegenwoordig in allerlei sample-edit software zit ingebakken. Welnu, als je een tik geeft tegen dat filter uit Figuur 4, en je analyseert de impulsresponsie door middel van de FFT, dan krijg je die twee schaduwen als resultaat! En met nog een klein extra programma-onderdeeltje kun je die dan omrekenen tot dat dranghekje, ofwel, de amplitude- en fasekarakteristiek van het filter. Dat laat zien dat je de FFT niet alleen gebruikt om geluiden te analyseren, maar ook filters en zijdegrotten!

Beetje Doof?

Het mooie van de fasedraaiing in het Gobi-filter is dat je ‘m heel direct aan den lijve ondervindt als je er ‘s zomers of ‘s winters binnenloopt; je voelt dan direct resp. een sterke temperatuurdaling of –stijging. Maar hoe zit dat met geluid? Wat merk je van de fasedraaiing die in elk digitaal, analoog of akoestisch filter ontstaat? Het antwoord op die vraag is lang niet zo recht-toe-recht-aan als dat van de versterking en verzwakking van verschillende frequentiecomponenten. Als je de sterkte van de boventonen van een saxofoon door middel van een filter ook maar minimaal wijzigt, dan hoor je al heel gauw een duidelijke

verandering van klankkleur. Maar als je de fases ervan verdraait, dan moet je nog maar afwachten wat er gebeurt.

Allereerst bestaat er een eeuwige spraakverwarring over wat er nu eigenlijk met dat fase-effect wordt bedoeld. Neem bijvoorbeeld een studioruimte, waar de beruchte “staande golven” optreden. Daarmee wordt bedoeld dat een bepaalde toon in combinatie met z'n reflectie tegen een muur harder gaat klinken als ze toevallig “in fase” zijn, dus nul graden faseverschil tussen direct en indirect geluid. Ook kunnen die twee elkaar helemaal uitdoven als ze 180 graden “uit fase” staan. Dat volumeverschil komt tot stand door een mix van direct en indirect geluid, zoals uitgelegd in dat verhaal over de delay en het kamfilter in Afl. 5 Figuur 2. Maar volumeverschillen worden, zoals inmiddels overduidelijk zal zijn, niet zichtbaar in de fasekarakteristiek, maar juist in de amplitudekarakteristiek van het filter! Het faseverschil tussen direct geluid en reflectie wordt dus hoorbaar als een amplitudeverschil dat optreedt doordat die twee worden gemixt.

Maar waar het hier om gaat is de vraag of je verschil hoort tussen twee signalen die boventonen hebben met precies dezelfde frequentie, precies dezelfde amplitude, maar een verschillende fase. Heel lang werd gedacht dat het menselijk oor niet in staat is om enig verschil tussen zulke signalen te horen en dus “fasedoof” is. Helmholtz bijvoorbeeld, was daar van overtuigd. Toch heeft nauwkeurig onderzoek uitgewezen dat je bij abrupte verschillen, bijvoorbeeld als je alle even, of oneven boventonen van een toon 180 graden in fase verdraait, toch wel een miniem verschil in klank kunt waarnemen. Ook in de aanzet van een toon, waar je een muziekinstrument voor het grootste deel aan herkent, wordt gekenmerkt door een heel grillig fasegedrag en dat schijnen je hersenen toch op een of andere manier op te pakken. Juist die subtiele fasestructuur kan door filters om zeep geholpen worden. Vandaar dat de heuse audiofreak heel kieskeurig is in de keuze van cross-over filters in de boxen van de geluidsinstallatie.

Toch is dat niet de belangrijkste reden voor dit artikel over de fase. Die zit 'm in het simpele feit dat je als muzikant in steeds meer software wordt geconfronteerd met de FFT, filters, phasers, reverbs en al hun fase-eigenschappen die je toch een beetje moet kennen, wil je echt effectief gebruik kunnen maken van al dat moois.