

Convolutie

Het achterzaaltje van het café om de hoek heeft een heel speciale akoestiek, die je met geen effectprocessor kunt namaken. Bestaat er zoiets als het 'eigengeluid' van een ruimte? En hoe laat je een droge studio-opname klinken alsof die ergens in dat zaaltje had plaats gehad? Het magische woord is: *convolutie*. Oftewel: geluid filteren met geluid.

Eén Jaar DSP in Music Maker

Precies een jaar geleden is deze serie over DSP van start gegaan. Elke maand vier pagina's tekst met steevast weer die plaatjes vol kronkelende lijnen, kleurige spelden, rare spiralen en omver gelopen dranghekjes met slagschaduw. Bij elkaar inmiddels een hele MM vol, de advertenties even niet meegerekend. En er komen nog enkele afleveringen bij, voordat we een min of meer afgerond geheel hebben bereikt! Als je veel met muzieksoftware werkt, dan zul je ongetwijfeld door deze serie inmiddels een heleboel dingen beter zijn gaan snappen, maar als je gitaar speelt, zingt of drumt, heb je je bij het doorbladeren van al die artikelen misschien wel eens afgevraagd of ze daar op de redactie van Music Maker soms een zonnesteek hebben opgelopen. Want in de Proloog van de serie werd dan wel gloedvol gesproken over '*de oneindig kneedbare, overal inzetbare, hapklare DSP-technieken, die als body-snatchers bezig zijn bezit te nemen van de muziekwereld*', maar wil dat ook zeggen dat elke muzikant, gecomputeerd of niet, daar voortdurend rechtstreeks mee wordt geconfronteerd? Is DSP eigenlijk niet veel meer een techniek die "onder de motorkap" zit en die je ook zonder gedetailleerde kennis via gebruiksvriendelijke software effectief kunt toepassen in je eigen muziek? Inderdaad zijn er muzikanten die van DSP maar heel weinig kaas gegeten hebben en er niettemin waanzinnig expressieve klanken mee maken. Ook heb je DSP-weetmutsen die bol staan van de theorie en op basis daarvan heel mooie en krachtige software schrijven, maar nog nooit iets opwindends uit de luidsprekers te voorschijn hebben weten te toveren. Toch vormen die beide extremen zeker geen meerderheid in de muziek en is het veel waarschijnlijker dat je muzikanten ontmoet die heel boeiende dingen met DSP doen, juist omdat ze dondersgoed weten waar ze mee bezig zijn.

Maar er is nog iets anders. In diezelfde Proloog werd DSP vergeleken met de Zwarte Steen uit Kubrick's Space Odyssey, die ongegeneerd de muziekwereld is komen binnenvallen en daar als een vreemde, buitenaardse Kracht evenzeer wordt aanbeden als gehaat. In muziekprogramma's op TV blijkt die haat-liefdeverhouding bijna dagelijks uit het hoge OeloeBoeloe-gehalte dat interviews met popartiesten krijgen zodra het om 'High Tech' gaat en de betekenis daarvan in muziek. Toch is in de loop van de serie geleidelijk een heel ander beeld van DSP opgerezen: een muziekinstrument, een stem, een concertzaal, een bosrand, een brommeruitlaat en zelfs de buitenlucht bleken niets anders te zijn dan signaalverwerkers en DSP gaat dus niet over extragalactische Zwarte Stenen maar over heel gewone, akoestische verschijnselen waarmee elke muzikant vertrouwd is. De wijze waarop die in DSP worden beschreven stelt je in staat om veel gemakkelijker en preciezer over geluid te praten dan moge-

lijk is met het quasi-dichterlijke geitenwol dat in muziekkringen zo vaak wordt gebezigd. Dit DSP-perspectief geeft je steeds nieuwe aanleidingen om op een andere manier naar klanken en geluidsverschijnselen te luisteren. Daardoor ga je ook anders tegen muziek aankijken en anders muziek maken. DSP is dus niet alleen voor de digi-freakjes, maar voor elke muzikant letterlijk spraakmakend.

Een rode draad in de serie vormde het idee dat geluidsbewerkingen waar je emmers vol analoge (en dus onstabiele en ingewikkelde) apparatuur voor nodig zou hebben, zoals mixers, versterkers en galm(veer)bakken, via de computer zijn te realiseren door ongelooflijk simpele rekenkundige operaties: versterken = vermenigvuldigen (Afl. 2), mixen = optellen (Afl. 3). Ook bleek het zeer eenvoudig om met de computer echo's en reflecties te maken, namelijk door het verschuiven, vermenigvuldigen en optellen van samples. Een klein experimentje was voldoende om te laten zien dat elke reflectie en elke echo een filterwerking heeft (Afl. 5) en dat bij zowat alle akoestische verschijnselen een hoofdrol is weggelegd voor filters. Ook voor de berekening van het spectrum van een geluid wordt gebruik gemaakt van een speciale filterstructuur, de DFT of FFT, die in Afl. 9 t/m 12 werd besproken. De redenen waarom spectra zo belangrijk zijn waren al op vele plaatsen aan bod gekomen, met name in Afl. 8, *Het Gebroken Oor*. Het oor is "gebroken" in die zin dat je in geluid zowel tijdverschijnselen (bijv. galm, reflecties, ritme en toonopeenvolging) waarneemt als frequentieverschijnselen (toonhoogten en klankkleuren). Niet alleen de eigenschappen van signalen, ook die van signaalverwerkers, zoals filters, resonatoren en zalen, kun je uitdrukken in twee "talen", namelijk die van tijd en frequentie. Voor het vertalen ('transformeren') van de ene naar de andere taal maak je gebruik van de Fouriertransformatie.

Hoe krachtig en zinvol die theorie is, illustreren we in deze aflevering aan de hand van een praktische toepassing. We gaan een filter dat al eerder uitvoerig werd besproken zodanig aanpassen dat we er de akoestiek van elke willekeurige ruimte mee kunnen simuleren. Een opname klinkt dan alsof die bijvoorbeeld had plaats gevonden in je eigen woonkamer, een dorpskerkje, de WC of het holle achterzaaltje van het café om de hoek.

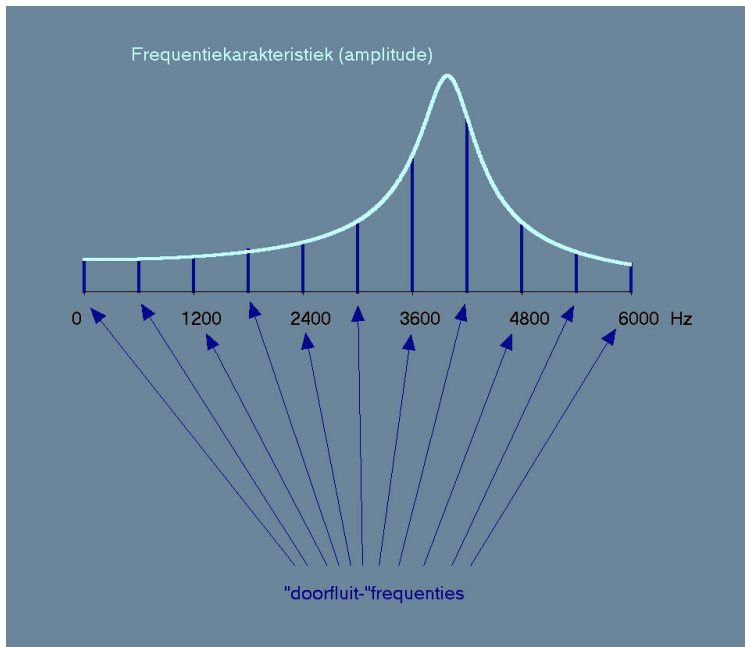
Filter uit z'n tent lokken

Als je van een bepaald geluid de spectrale eigenschappen wilt weten, pak je een microfoon, maakt een opname, stopt die in de computer en laat daar vervolgens de FFT op los (Afl. 12). Dan krijg je zowel het amplitude- als het fasespectrum, waarvan met name het eerste heel belangrijk is voor timbrewaarneming en voor verdere manipulaties. Maar wat doe je als je de klankeigenschappen van een zaal of een klankkast wilt weten? Al die akoestische objecten zijn filters en een filter is een passief ding dat van zichzelf geen geluid geeft, dus een opname maken en daar de FFT op los laten is er niet bij. Toch is de oplossing intuïtief duidelijk: je stuurt een geluid door het filter en luistert naar wat er uit komt. Dat deed je vroeger al als je door een viaduct liep of over de rand van een diepe waterput hing: schreeuwen en dan luisteren naar het galmende "antwoord". Waar het dus op neer komt is dat je een filter door middel van een geluid "uit z'n tent lokt". In DSP-jargon bestaat daar een mooi woord voor: een filter *exciteren*. En de reactie van het filter op de excitatie heet de *responsie*.

Nu is de vraag: uit welk geluid moet die filterexcitatie bestaan? Per slot van rekening is het ene geluid het andere niet, en een filter zal op elk geluid anders reageren. Hoe moet je nu uitvoelen welk aandeel het filter heeft in de resulterende klank (het outputsignaal)? Ook hier kun je het best de dagelijkse muziekpraktijk als uitgangspunt nemen. Een vioolbouwer tikt op het boven- of onderblad van een viool om te luisteren naar de responsie ervan. Van Bach wordt verteld dat hij voor aanvang van een concert wel eens vingerknippend langs de muren

van de concertzaal liep om uit de responsie van galm en reflecties vast te stellen hoeveel zangers hij 't best kon inzetten. Tikken en vingerknippen: korte, abrupte klankjes. Ook om een reverb af te stellen gebruik je eveneens korte, percussieve klanken. Dus zowel voor het vaststellen van de "frequentiewerking" (klankkleur van vioolblad) als van de "tijdwerking" (galm in zaal) maak je in de praktijk graag gebruik van een zo kort mogelijk, impulsief geluid.

Toch hebben we al eerder gezien dat de werking van een filter volledig wordt beschreven door de frequentiekaracteristiek, waaruit direct is af te lezen hoeveel elke frequentie van het inputsignaal door het filter wordt versterkt of verzwakt. Om een idee te krijgen van dat frequentiegedrag moet je gaan meten. Je pakt een sinustongenerator, stelt die in op een heel lage frequentie en meet vervolgens hoe sterk die uit het filter tevoorschijn komt. Dan zet je de frequentie van de generator ietsje hoger en meet je opnieuw. Zo tast je het hele hoorbare frequentiegebied af in kleine stapjes ('doorfluiten' noemen ze dat) en alle uitkomsten zet je in een grafiek. Maar is die grafiek dan ook tevens de frequentiekaracteristiek? Gedeeltelijk, want de frequentiekaracteristiek geeft het gedrag voor *elke* frequentie en niet slechts voor het beperkte aantal gemeten waarden. Figuur 1 laat zien dat bij doorfluiten de frequentiekaracteristiek



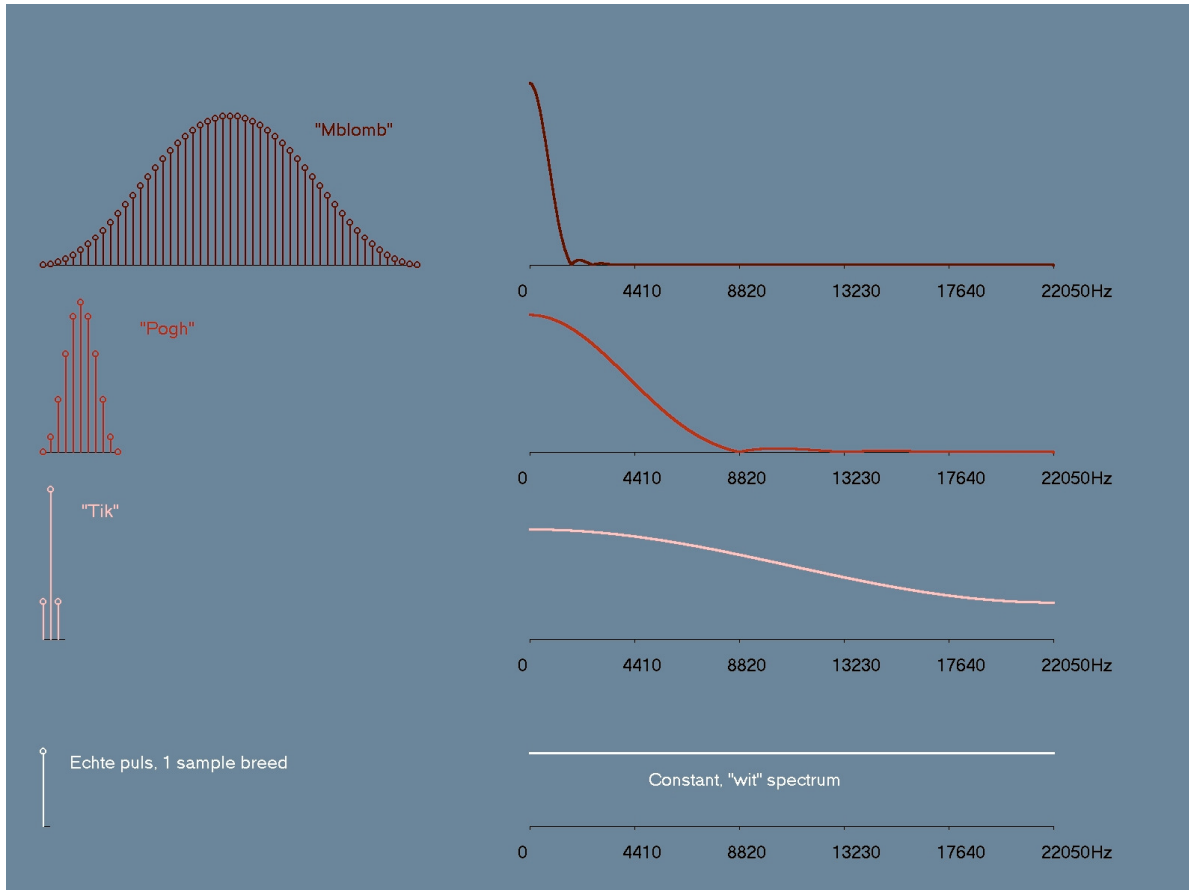
wordt *gesampled* (Afl. 2). Blijft de vraag: waardoor wordt dan die frequentiekaracteristiek *in z'n geheel* bepaald?

Vergelijk de 'kleuring' die een filter aan een geluid geeft eens met echte, visuele kleuren. Of je een voorwerp bij daglicht bekijkt of bij kunstlicht maakt een groot verschil. Een kunstschilder heeft graag z'n atelier op 't noorden, want daar schijnt de zon niet naar binnen, zodat het daglicht een betrekkelijk constante samenstelling heeft die tevens 't dichtst bij neutraal, wit licht in de buurt komt. Wit licht bevat oneindig veel kleuren die elk in gelijke hoeveelheden aanwezig zijn. Dus elke kleurcomponent van een

bepaalde tint op het schilderspalet wordt onder wit licht even sterk gereflecteerd. In wat technischer jargon: wit licht bevat oneindig veel spectraallijnen die allemaal even lang zijn. Met geluid is het precies hetzelfde. Om de "kleuring" van een geluidsfilter vast te stellen heb je als excitatie dus een "spierwit" geluid nodig, dat wil zeggen een geluid waarin *alle*, dus *oneindig veel* frequentiecomponenten aanwezig zijn. En die moeten dan bovendien allemaal even sterk zijn. De sinustonen die je bij het doorfluiten van een filter gebruikt zijn wel allemaal even sterk, maar het zijn er nooit oneindig veel.

Er zijn dus twee eisen die je aan het filtertestgeluid moet stellen, één afkomstig uit het tijddomein en één uit het frequentiedomein: (1) het geluid moet zo impulsief mogelijk en (2) het moet perfect 'wit' zijn, dat wil zeggen dat het *alle* frequenties moet bevatten in gelijke sterkten. En aangezien tijd en frequentie niets anders dan twee "talen" zijn die hetzelfde gedrag beschrijven, krijg je het vermoeden dat die twee eisen in feite op hetzelfde neer moeten komen. Daarom is het voor de hand liggend om je af te vragen of het spectrum van een impulsief geluid misschien 'wit' is. Met behulp van de FFT kom je er snel achter dat dit inderdaad

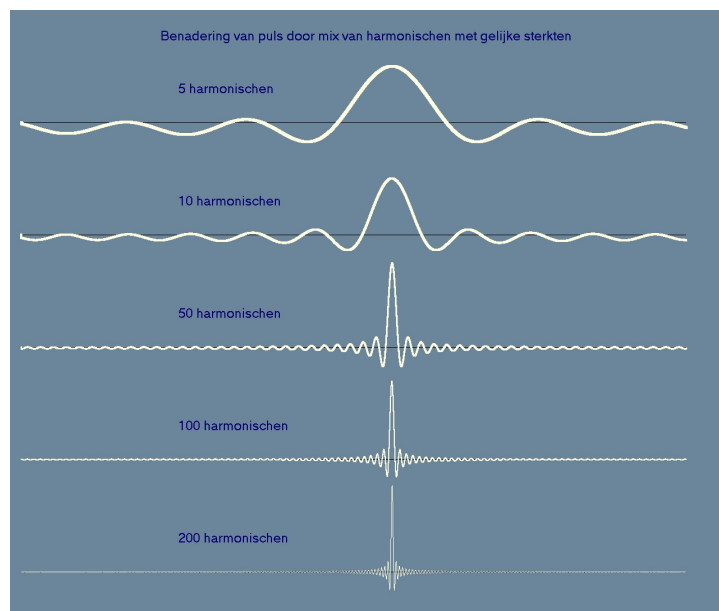
het geval is. In Figuur 2 links zijn enkele geluiden te zien die steeds korter worden. Rechts daarvan zijn de bijbehorende spectra afgebeeld. Het onderste geluidje bestaat uit slechts één



enkele, losse sample en blijkt inderdaad een spectrum te hebben waarin alle frequentiecomponenten even sterk zijn. Hoe langer je het FFT-tijdvenster maakt (waardoor de frequentieresolutie steeds hoger wordt, Afl. 12) hoe groter het aantal spectraallijnen die bovendien allemaal even lang zijn. Daaruit mag je afleiden dat de impuls inderdaad oneindig veel spectraallijnen heeft en dus 'spierwit' is! In Figuur 3 is te zien hoe je door additieve synthese van sinussen met gelijke sterkten een impuls benadert.

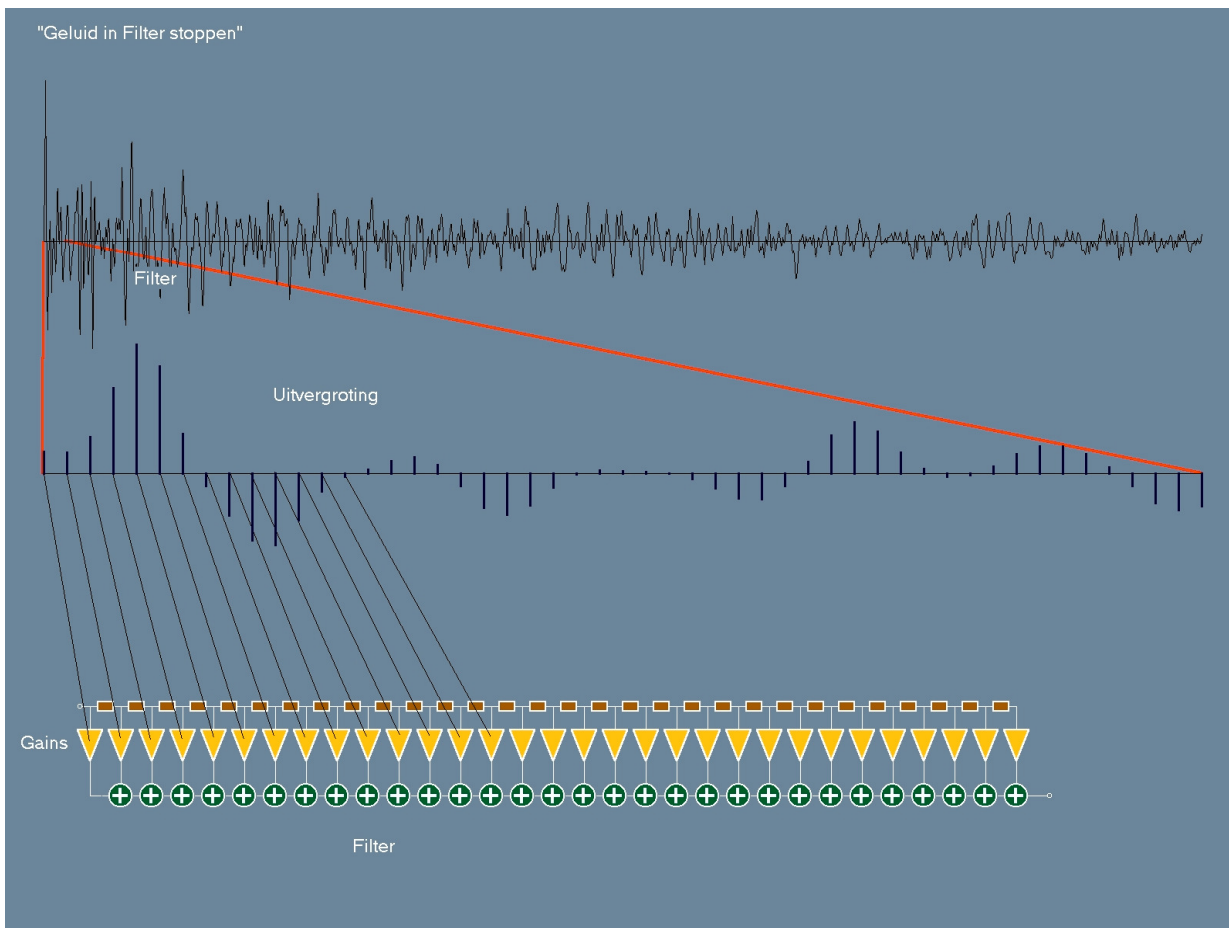
Geluid Filteren met Geluid

Een impuls is dus het ideale geluid om een filter mee uit z'n hok te krijgen. Dat volgt ook direct uit 't feit dat filteren een spectrale vermenigvuldiging is (Afl. 10). Als je een impuls filtert wordt de frequentiecarakteristiek van het filter bij elke frequentie met hetzelfde getal vermenigvuldigd, want het pulsspectrum is constant,



zoals Figuur 2 laat zien. Dus het spectrum van het outputsignaal is gelijk aan de frequentiekaracteristiek. Dit outputsignaal is dus het "antwoord", de nagalm, van het filter op de impuls. Het is, kortweg, de *impulsresponsie*. Je kunt de impulsresponsie van een filter beschouwen als het 'eigengeluid' ervan. Het enige wat je dus moet doen om dat eigengeluid van een filter boven tafel te krijgen is een enkele impuls door dat filter sturen. De output is dan de impulsresponsie, waarvan je door middel van de FFT het spectrum kunt bepalen. Dat spectrum vormt dan tevens dezelfde gesampled frequentiekaracteristiek als die je via moeizaam doorfluiten zou krijgen.

Met deze wijsheid kun je interessante dingen doen. Neem een alarmpistool, een opgeblazen luchtballon of iets anders dat een ultrakort, explosie-achtig impulsgeluid kan geven. Veroorzaak in een akoestische ruimte een knal op de plaats waar gewoonlijk de geluidsbron staat opgesteld, en wel met de microfoon op een favoriete plek. Die opname is dus een impulsresponsie van de ruimte. (Let wel: een akoestische ruimte heeft, afhankelijk van de plaats van zowel de knal als de microfoon(s), oneindig veel impulsresponsies en dus eigengeluiden!) De clou is nu dat elk digitaal filter waarvan de impulsresponsie identiek is aan die van de opname precies dezelfde akoestische eigenschappen heeft als die van de ruimte voor zover in de opname gemeten. Hoe maak je nu een digitaal filter dat zo'n identieke impulsresponsie heeft?



Daar hoeft u niets voor te doen dat we al niet eerder gedaan hebben, namelijk een 'geluid in een filter stoppen'. In Aflevering 9 vulden we de Gains van een Lopend Gemiddelde-filter met de samples van een sinustoon. Hadden we een impuls door dat filter gestuurd, dan zouden we als impulsresponsie precies die sinus-samples hebben teruggekregen. Met andere woorden: de Gains van een Lopend Gemiddelde-filter vormen samen de impulsresponsie ervan. Daarom stoppen we in dit geval de samples van die impulsresponsie in de Gains van het Lopend Ge-

middelste-filter (Figuur 4). Sturen we vervolgens een impuls door dat filter, dan krijgen we als output de impulsresponsie van de ruimte zoals die via de microfoon werd gemeten. Als je nu een willekeurige, 'droge' geluidsopname door dit Lopend Gemiddelde-filter haalt, dan wordt het hele patroon van reflecties en galm uit de ruimte aan de droge opname toegevoegd: het is alsof de opname in die ruimte heeft plaats gevonden.

Op de hele procedure die hier werd beschreven is zowel praktisch als theoretisch nog wel het een en ander op en aan te merken. Om maar wat te noemen: een knal is slechts een benadering van de echte theoretische impuls van Figuur 2 onder. Voor dit probleem is trouwens via DSP nog wel een oplossing te bedenken. Maar bovendien, als je dit geintje in een kerk uithaalt met een galmtijd van 7 seconden, dan krijg je een filter met meer dan 300.000 Gains; dat zou neerkomen op zo'n kleine 30 miljard berekeningen voor elke seconde (mono)geluid. Zelfs voor de huidige computers toch wel wat veel. Toch staat het principe als een huis en wordt zeer veel toegepast: je filtert een geluid met een geluid. In DSP-jargon bestaat ook weer zo'n fraaie term voor het filteren van het ene signaal met het andere: *convolutie*. Zo'n jaar of tien geleden drong die kreet in de popmuziek door met de komst van de opvolger van Yamaha's DX-serie die werd aangekondigd als een *Convolution Synthesizer*.

