

# Filtersoftware

## ontwerp-tools voor analoge filters

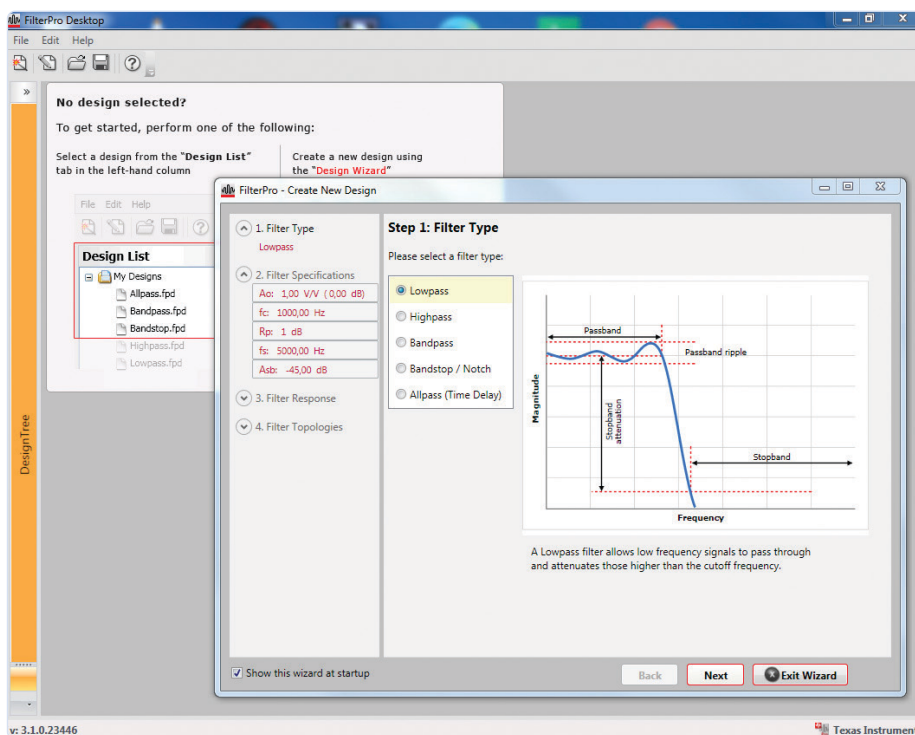
Alfred Rosenkränzer (Duitsland)

Wie de formules voor het ontwerpen van analoge filters kent (of op zijn minst weet te vinden), kan altijd de nodige berekeningen met de hand uitvoeren. Tegenwoordig lijkt die aanpak echter achterhaald als we meer willen dan een eenvoudig RC-netfilter. Tegenwoordig bestaat er software die het werk doet, en IC-fabrikanten stellen geschikte tools zelfs gratis ter beschikking. In dit artikel zullen we vooral kijken naar software van Texas Instruments.

In het artikel over het ontwerpen van actieve filters, dat is verschenen in *Elektor Magazine* november/december 2020 [1] hebben we gekeken naar actieve filterstructuren. In dat artikel hebben we het bestaan van gespecialiseerde software aangestipt die het ontwerpen van dergelijke configuraties aanzienlijk vereenvoudigt. Het is niet meer nodig om de wiskundige achtergronden in detail te kennen om het doel te bereiken, maar lezers die desondanks geïnteresseerd zijn in de formules kunnen die gemakkelijk in de literatuur vinden, bijvoorbeeld in "Tietze/Schenk" [2]. Als typisch voorbeeld van de beschikbare filter-ontwerpssoftware hebben we het desktop-programma *FilterPro* en zijn online-opvolger *Filter Design Tool* gekozen.

### FilterPro

Het desktop-programma *FilterPro* wordt al geruime tijd niet meer actief ontwikkeld door Texas Instruments, maar het blijft niettemin een zeer nuttig tool. De meest recente versie, die onder Windows draait, kan gratis worden gedownload van [3]. Na installatie en starten van het programma wordt de gebruiker verblijd met het scherm van **figuur 1**. Daar zien we de *Filter Wizard*.



Figuur 1. Het startmenu van *FilterPro Desktop* met de filterwizard.

Als de wizard niet automatisch verschijnt, kan hij worden gestart met de knop linksboven (het toverstafje). De wizard voert u stap voor stap door het ontwerpproces. In de eerste stap kiest u het filtertype (laagdoorlaat, hoogdoorlaat enzovoort). Rechts in het venster staan de

parameters die in de volgende stap moeten worden ingevoerd: doorlaatband, doorlaatrimpel, stopband enzovoort.

In de tweede stap voert u de specificatie van het filter in: zie **figuur 2**. De eerste parameter is de versterking van het filter. Hoewel in veel

toepassingen een versterking van meer dan één wenselijk is, wordt aanbevolen te beginnen met een versterking van precies éénmaal ("unity gain").

Bij het opgeven van de kantelfrequentie van het filter moet u bedenken dat sommige structuren zoals Bessel- en Butterworth-filters deze grootheid behandelen als de frequentie waarbij de signaalamplitude met 3 dB afneemt. Voor Chebyshev-filters daarentegen wordt de kantelfrequentie gespecificeerd als die frequentie waarbij de amplitude onder de toegestane rimpel komt.

Vervolgens voeren we de toegestane rimpel in de doorlaatband in. Voor filters die geen rimpel vertonen, zoals de Bessel- en Butterworth-typen, kan hier de standaardwaarde worden aangehouden.

Er zijn twee manieren om de orde van het filter te specificeren. U kunt het vakje *Set Fixed* aanvinken en dan de gewenste orde invoeren in het vakje direct rechts daarvan (zie figuur 2) of u kunt, als het vakje niet is aangevinkt, de damping opgeven die voor de toepassing bij een bepaalde frequentie vereist is. Het programma zal dan automatisch een geschikte orde kiezen. Dat is een goede manier om de complexiteit van verschillende benaderingen te vergelijken.

In de derde stap kiest u de *Response Type*, dat wil zeggen de filterbenadering (zie **figuur 3**). De grafiek toont het verloop van de amplitude, de fase en de groepsvertraging als functie van de frequentie. U kunt het scrollwiel gebruiken om op een deel in te zoomen; u kunt ook klikken en slepen om de grafiek te verschuiven. Met een rechtsklik keert u terug naar de oorspronkelijke volledige weergave. Merk op dat de frequentie-as logaritmisch is.

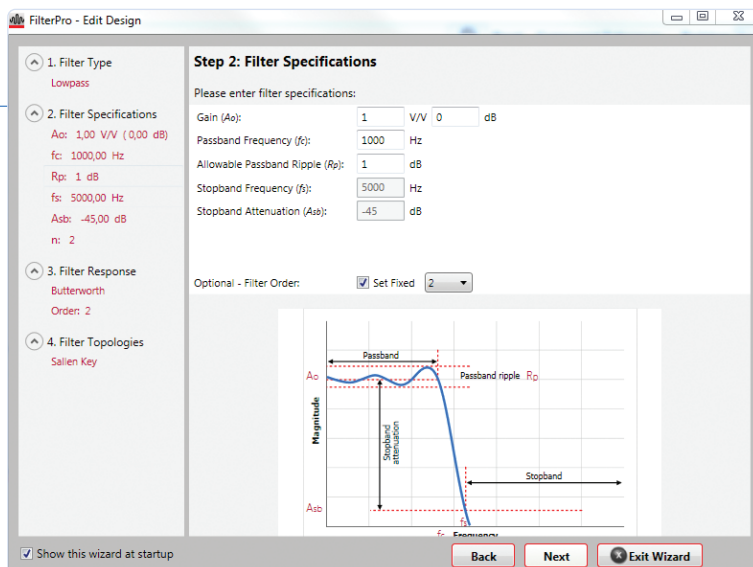
In de vierde en laatste stap kiest u de topologie (**figuur 4**). Hier kunt u kiezen tussen *Multiple Feedback* voor single-ended versterkers, *Sallen-Key* (ook single-ended) en *Multiple Feedback (Fully Differential)*. Deze termen worden uitvoerig uitgelegd in [1].

Wanneer u tenslotte op *Finish* klikt, verschijnen de schakeling met alle onderdelenwaarden, een tabel met de filterspecificatie, en twee grafieken die het verloop van amplitude, fase en groepsvertraging van het ontwerp tonen (**figuur 5**). Hier kunt u ook zoomen en scrollen.

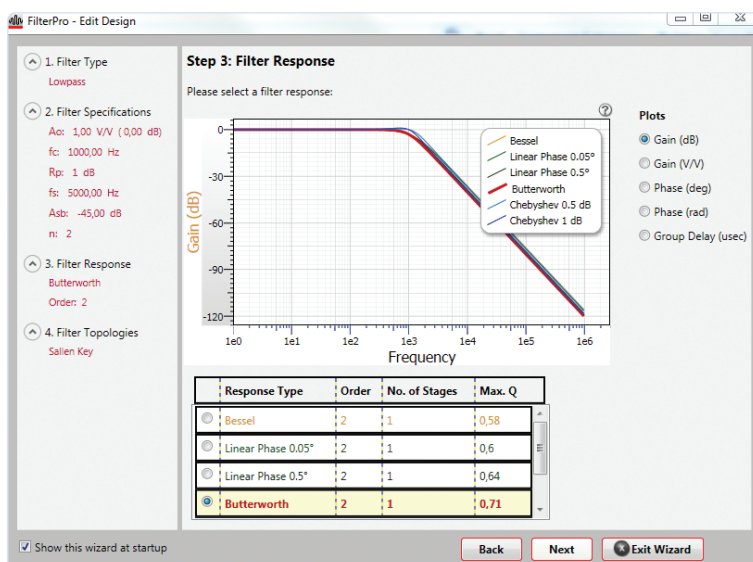
Een belangrijke waarde in het midden van de tabel is *Min GBW reqd.* Dit is het minimale versterking/bandbreedte-product (gain-bandwidth product) dat de opamp moet hebben om de filterschakeling het gewenste gedrag te laten vertonen; hoe lager het gain-bandwidth product van het gebruikte IC is, des te slechter de schakeling zal presteren. De parameter *QualityFactor (Q)* wordt ook toegelicht in [1].

## Een praktische toepassing

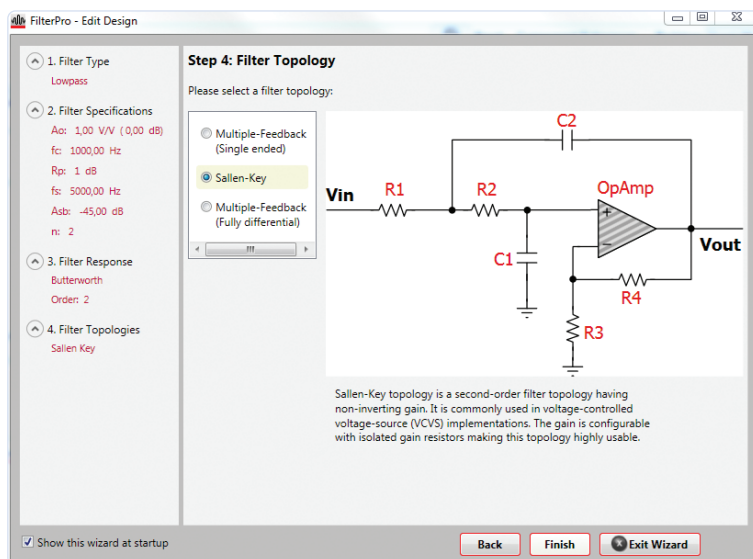
In tegenstelling tot hun passieve broertjes hebben actieve filters twee vrijheidsgraden bij de keuze van de onderdelenwaarden. Klik bijvoorbeeld op de waarde van C1 en verander deze van 10 nF in 1 nF (een factor tien kleiner), en C2 zal evenredig veranderen. De twee weerstandswaarden worden



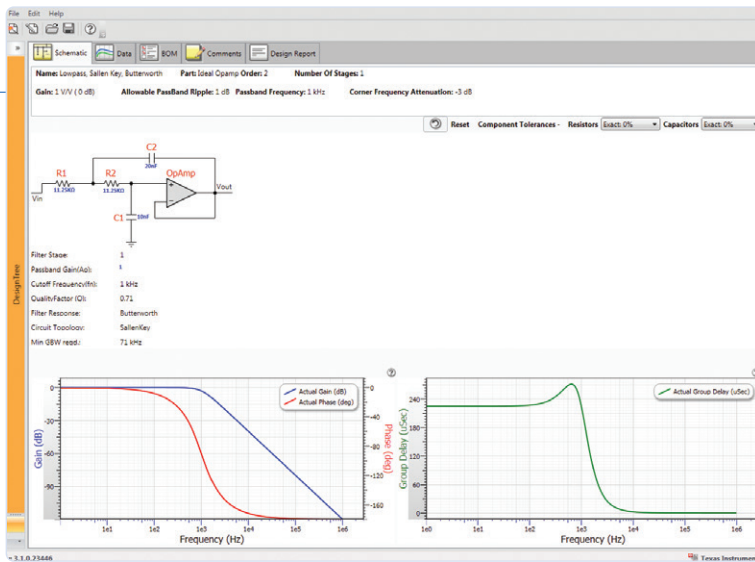
Figuur 2. Invoeren van de filterspecificaties.



Figuur 3. Filterrespons en -type.



Figuur 4. Keuze van een filtertopologie.



Figuur 5. Het resultaat: een compleet ontwerp plus grafieken van het filteredrag.

ook met een factor 10 vergroot. Beide reeksen onderdelenwaarden geven dezelfde filterrespons, hoewel andere eigenschappen (zoals ruis en vervorming) kunnen verschillen.

In audiotoeepassingen wordt meestal gekozen voor weerstandswaarden in een bereik van 1 kΩ tot 10 kΩ: dit biedt een goed compromis tussen ruis (die afneemt bij kleinere weerstandswaarden) en vervorming (die toeneemt bij kleinere weerstandswaarden vanwege de grotere stromen). Om tot praktische onderdelenwaarden te komen, is het een goed idee om eerst te experimenteren met de condensatoren: deze zijn doorgaans slechts verkrijgbaar in een relatief beperkt aantal waarden (E3...E12-reeksen), in tegenstelling tot weerstanden (E12...E96-reeksen).

Om de tweede vrijheidsgraad te begrijpen, ontkomen we er niet aan met formules te stoeien – of we dat nu leuk vinden of niet. De waarde van C1 kan vrij worden gekozen, maar er bestaat een minimum-verhouding tussen C2 en C1, die afhangt van de gekozen benadering, de orde en de versterking. Bij deze minimum-verhouding, en bij unity gain, zijn de beide weerstanden gelijk. Het *FilterPro Desktop*-programma toont deze minimale verhouding, onder de aanname van exacte condensatorwaarden.

Als de condensatoren uit een bepaalde E-reeks moeten worden gekozen, zal het programma die waarden kiezen die het dichtst bij het optimum liggen, en de verhouding tussen C2 en C1 zal toenemen. Dat leidt dan weer tot een wijziging van de weerstandswaarden: die zullen niet langer gelijk zijn.

In het bovenstaande voorbeeld zijn de waarden voor C1 en C2 precies 10 nF resp. 20 nF: een verhouding van 1:2. De twee

weerstanden hebben dezelfde waarde, namelijk 11,25 kΩ. Als we condensatoren uit de E12-serie moeten gebruiken, kunnen we voor C1 10 nF laten staan, maar moet C2 worden vergroot tot 22 nF; als gevolg daarvan heeft R1 dan een waarde van 7,68 kΩ en R2 een waarde van 14,65 kΩ.

Het momenteel beschikbare online-tool (waarover later meer) gedraagt zich op dezelfde manier. Helaas is het niet mogelijk de verhouding rechtstreeks op te geven; maar in plaats daarvan kunt u, rechtsboven in het venster van figuur 5, afzonderlijk voor de weerstanden en condensatoren aangeven of u de voorkeur geeft aan exacte waarden of dat waarden uit een bepaalde E-reeks moeten worden gebruikt. Wanneer de keuze beperkt is tot een waarde uit een E-serie, zullen de grafieken de respons tonen voor zowel de gespecificeerde E-waarden als voor de ideale waarden. Dit stelt u in staat een weloverwogen beslissing te nemen over welke afwijking van het ideaal aanvaardbaar is.

In bovenstaand voorbeeld is er echter een truc om de zaak te vereenvoudigen. Als de twee weerstanden een gelijke waarde hebben, dan moet C2 precies tweemaal de waarde van C1 zijn: deze specifieke variant wordt overigens beschreven in Tietze/Schenk. Voor een goede nauwkeurigheid kiezen we een gemakkelijk verkrijgbare component met een geschikte footprint en een acceptabele tolerantie voor C1; voor C2 schakelen we dan twee stuks dezelfde componenten parallel. Als de drie condensatoren uit dezelfde partij komen, zouden hun waarden goed overeen moeten komen. Elke afwijking van de nominale waarden kan worden gecorrigeerd door de weerstandswaarden aan te

passen: voer de gemeten capaciteit van C1 in het in figuur 5 getoonde venster in en u ziet de aangepaste weerstandswaarden (of de dichtstbijzijnde beschikbare waarden in de gespecificeerde E-reeks).

Bij het ontwerpen van een nauwkeurig wisselfilter is het ook een goed idee om in het hoogdoorlaat-netwerk dezelfde condensatorwaarden te gebruiken als in het laagdoorlaat-netwerk. Dit draagt bij tot een optimale overgang tussen de laagdoorlaat- en hoogdoorlaatkarakteristieken. Ook hier is het natuurlijk mogelijk om nauwkeuriger gespecificeerde capaciteits- en weerstandswaarden samen te stellen door twee of meer afzonderlijke componenten te combineren.

## Speciale eigenschappen

U kunt de resultaten van uw optimalisatie-experimenten opslaan voordat u een andere filterconfiguratie uitprobeert. Als u op het tabblad *Data* klikt in de rij bovenin het venster, ziet u de frequentierespons in de vorm van een tabel; u kunt dan *Export to Excel* gebruiken om de gegevens verder te verwerken – bijvoorbeeld om de resultaten te vergelijken met een prototype of voor documentatiedoeleinden. Het tabblad *BOM* produceert een onderdelenlijst. Met *Comments* kunt u uw aantekeningen toevoegen aan het ontwerp en *Design Report* maakt automatisch documentatie aan (maar zonder frequentierespons-tabel).

Het is de moeite waard de schakeling die u hebt ontworpen te simuleren alvorens deze daadwerkelijk te bouwen. Een bijzonder nuttige techniek voor het analyseren van de effecten van onderdelentoleranties is de Monte Carlo-simulatie. U kunt vele variaties



## GERELATEERDE PRODUCTEN

- **OWON SDS1104 Four-Channel Oscilloscope (100 MHz) (SKU 19514)**  
[www.elektor.nl/19514](http://www.elektor.nl/19514)
- **OWON XDM1041 Digital Multimeter (55000 count) (SKU 19715)**  
[www.elektor.nl/19715](http://www.elektor.nl/19715)
- **OWON AG051 Arbitrary Waveform Generator (5 MHz) (SKU 18874)**  
[www.elektor.nl/18874](http://www.elektor.nl/18874)

van een bepaald filter simuleren en hun prestaties direct met elkaar vergelijken.

Meertrapsfilters worden opgebouwd uit afzonderlijke eerste- en tweede-orde-filters. Merk op dat het cascaderen van twee identieke Butterworth-filters van de tweede orde geen Butterworth-filter van de vierde orde oplevert, maar een zogenoemd Linkwitz-Riley-filter (of "Butterworth-in-het-kwadraat") van de vierde orde.

U kunt een beetje experimenteren om te bepalen welke *kwaliiteitsfactor* (Q) van het ontwerp kan worden verwacht, en wat het vereiste versterking/bandbreedte-product van de opamp is.

Indien het filter een versterking moet hebben die groter is dan één, kan dat in de specificaties worden meegenomen. In het geval van een meertrapsfilter wordt de versterking gelijk over de verschillende trappen verdeeld. U kunt bekijken hoe de onderdelenwaarden veranderen naarmate de gewenste versterking toeneemt, en een te grote afwijking van onderdelenwaarden voorkomen. Het is natuurlijk altijd mogelijk de extra versterking in een afzonderlijke trap te implementeren; dit heeft het voordeel dat andere componentwaarden gelijk blijven als de versterking later nog moet worden gewijzigd.

Nog een opmerking: Texas Instruments onderhoudt de desktopversie van de software niet langer, en deze is ook niet langer beschikbaar op de servers van het bedrijf. Een snelle zoektocht op Internet naar "FilterPro desktop" voert echter snel naar werkende downloads, zoals [3]. Het programma draait even goed onder Windows 7 als onder Windows 10, en verbazend genoeg is het zelfs stabiel onder Windows

11. Bij het opstarten lijkt het programma af en toe een minuut of zo te pauzeren; maar daarna werkt alles zonder problemen. De volledige handleiding is te vinden op [4].

### Online-tools

De meer recente versie van de filtersoftware van Texas Instruments heet *Filter Design Tool* en is beschikbaar op [5]. Nadat u zich hebt geregistreerd, kunt u een filter gaan ontwerpen. Er is geen "Pro"-versie en dus ook geen kunstmatige gebruiksbepijking. De gebruikersinterface heeft een wat modernere uitstraling dan het desktopprogramma, maar de onderliggende functionaliteit is in grote lijnen hetzelfde.

Veranderingen ten opzichte van zijn voorganger zijn onder andere de mogelijkheid om de stapresponsie van het filter weer te geven. En als u in plaats van ideale waarden kiest voor waarden uit de E-reeks, dan hebt u ook de mogelijkheid om onderdelentoleranties op te geven, voor weerstanden en condensatoren afzonderlijk.

In de weergave van de frequentierespons (amplitude, fase en groepsvertraging) en in de grafiek van de staprespons ziet u een tolerantieband rond de ideale curve. Dit bespaart u latere Monte Carlo-simulaties van het ontwerp (hoewel ik u zou aanraden dit toch te doen, om aan de veilige kant te blijven).

De desktop-versie kan bandsperfilters berekenen op basis van de Sallen-Key topologie (niet ideaal: zie het artikel in [1]) en multiple feedback-topologieën, terwijl de online-versie alleen de Bainter-topologie biedt [6]. Meer gespecialiseerde ontwerpsoftware is op het Internet te vinden, die het ontwerp van filters met Fliege-topologie [7] en state-variable

bandsperfilters ondersteunt.

Het grootste nadeel van het online-tool is dat het moeilijker is om de onderdelenwaarden te manipuleren dan in de desktop-versie, en dat is de reden waarom ik de voorkeur geef aan die laatste. *Filter Design Tool* lijkt in ieder geval wel ondersteuning te bieden bij het berekenen van de minimaal haalbare condensatorverhouding.

Tenslotte nog een opmerking over het filter-tool van Analog Devices [8]: dit lijkt gefixeerd op een vaste condensatorverhouding van 1:1 of van 1:10. De grootste van deze verhoudingen pleegt tot een grote spreiding in onderdelenwaarden te leiden, wat naar mijn mening niet ideaal is. 

210041-03

### Een bijdrage van

Tekst: Alfred Rosenkränzer

Redactie: Dr. Thomas Scherer

Vertaling: Eric Bogers

Layout: Giel Dols

### Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel?

Stuur een e-mail naar de auteur via [alfred\\_rosenkraenzer@gmx.de](mailto:alfred_rosenkraenzer@gmx.de) of naar de redactie van Elektor via [redactie@elektor.com](mailto:redactie@elektor.com).

## WEBLINKS

- [1] A. Rosenkränzer, "Analoge elektronica ontwerpen – deel 2: actieve filters", Elektor Magazine november/december 2020: [www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-161/59161](http://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-161/59161)
- [2] U. Tietze, C. Schenk and E. Gamm, "Electronic Circuits: Handbook for Design and Application," Springer: <http://tietze-schenk.com/tsbook.htm>
- [3] Download FilterPro Desktop V. 3.1.0.23446: [www.softpedia.com/get/Science-CAD/FilterPro-Desktop.shtml](http://www.softpedia.com/get/Science-CAD/FilterPro-Desktop.shtml)
- [4] FilterPro User's Guide: [www.ti.com/lit/an/sbfa001c/sbfa001c.pdf](http://www.ti.com/lit/an/sbfa001c/sbfa001c.pdf)
- [5] Online filter-designtool: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/topology>
- [6] B. C. Baker, "Bandstop Filters and the Bainter Topology," Analog Applications Journal: [www.ti.com/lit/an/slyt613/slyt613.pdf](http://www.ti.com/lit/an/slyt613/slyt613.pdf)
- [7] Fliege-topology filter: <http://earmark.net/gesr/opamp/notch.htm>
- [8] Analog Filter Wizard (online): <https://tools.analog.com/en/filterwizard/>