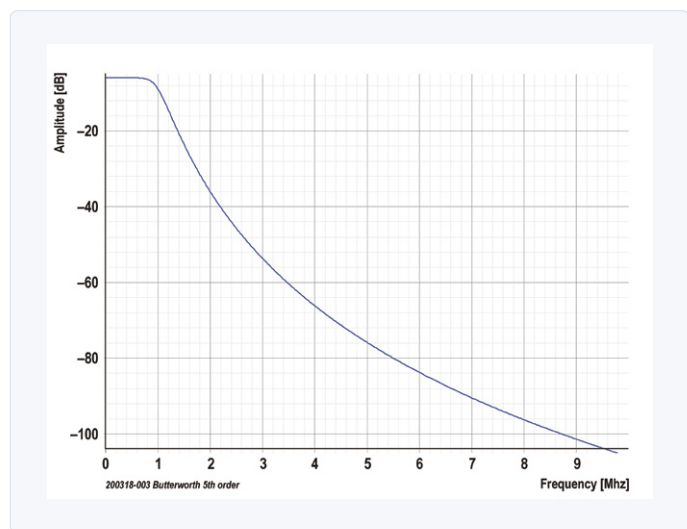


Analoge elektronica ontwerpen

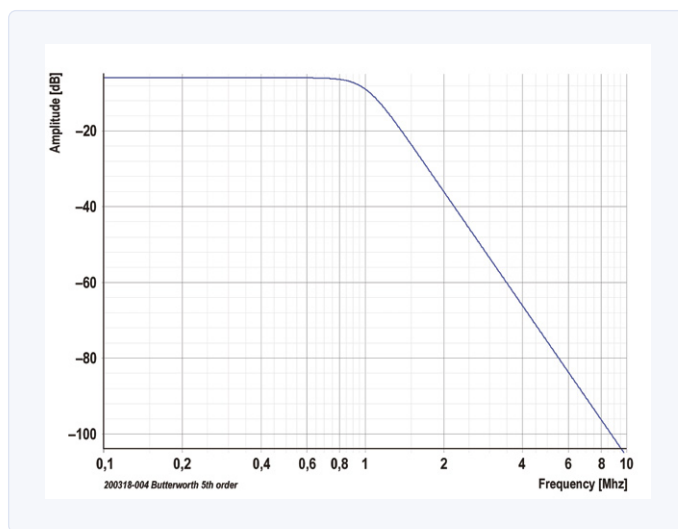
case-study #2 – deel 1: theorie van analoge filters

Alfred Rosenkränzer (Duitsland)

Deze reeks van drie artikelen gaat over het ontwerpen van analoge filters. Het eerste deel behandelt de basistheorie, met speciale aandacht voor de praktische toepassing. Het tweede deel behandelt het ontwerp van actieve filters. En het derde en laatste deel gaat over passieve filters.



Figuur 1. Frequentiecarakteristiek van een 1MHz-laagdoorlaatfilter; frequentie lineair, amplitude in dB.



Figuur 2. Frequentiecarakteristiek in het audiobereik; frequentie logaritmisch, amplitude in dB.

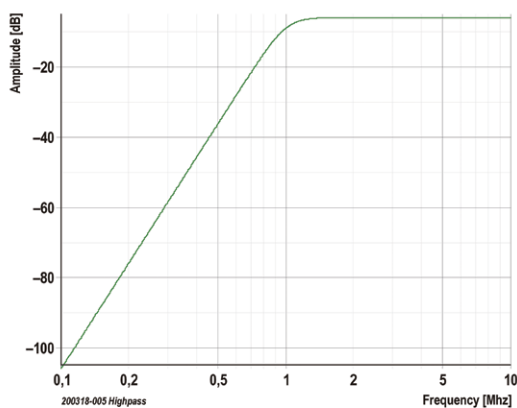
Analoge filters worden geconstrueerd met behulp van weerstanden, spoelen, condensatoren en opamps, en zijn bedoeld voor analoge spanningen en stromen. Digitale filters zijn daarentegen gebaseerd op digitale schakelingen zoals flipflops, optellers, vermenigvuldigers (meestal in de vorm van een DSP of FPGA) of software in microcontrollers en SoC's, en bewerken datastromen.

Filtereigenschappen

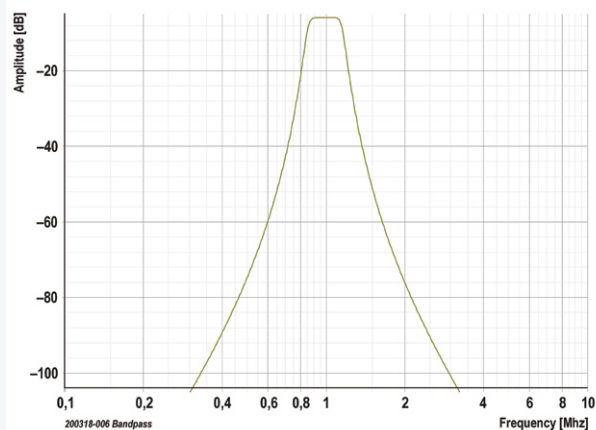
De relevante eigenschappen van een filter worden doorgaans weergegeven in XY-diagrammen. Het belangrijkste diagram toont de amplitude als functie van de frequentie, kortom: de frequentiecarakteristiek. De verhouding tussen ingangs- en uitgangsspanning en wordt slechts zelden lineair (in procenten) weergegeven op de Y-as – meestal logaritmisch in dB.

De frequentie is uitgezet op de X-as – vaak lineair bij kleinere bandbreedtes (**figuur 1**); voor het audiobereik vaak logaritmisch (**figuur 2**). Alle diagrammen in dit artikel zijn gemaakt met de Simetrix-simulatiesoftware [1] maar zijn om reproductie-technische redenen nabewerkt.

Een filter verandert niet alleen de amplitude maar ook de fase van het signaal. In de fasecarakteristiek is op de Y-as de



Figuur 3. Frequentiecarakteristiek van een 1MHz-hoogdoorlaatfilter; dubbellogaritmische schaalverdeling.



Figuur 4. Frequentiecarakteristiek van een 1MHz-banddoorlaatfilter; dubbellogaritmische schaalverdeling.

faseverschuiving in graden aangegeven. De frequentie wordt zoals eerder uitgezet op de X-as. Ik vind de fasecarakteristiek niet bijzonder informatief, zeker niet in het HF-bereik. Interessanter is de groepslooptijd als functie van de frequentie. Deze komt overeen met de afgeleide van de fasecarakteristiek naar de frequentie. Hierin kunt u gemakkelijk zien hoe lang een signaal met een bepaalde frequentie er over doet om het filter te passeren. Als de groepslooptijd vlak verloopt, hebben alle frequenties dezelfde tijd nodig. Waarom dit belangrijk is, zullen we verderop aan de hand van een aantal diagrammen verduidelijken.

De staprespons van het filter is belangrijk in het tijddomein. Het toont het lineaire amplitudeverloop van het uitgangssignaal als functie van de tijd wanneer op de ingang een signaalfank (stapfunctie) wordt aangelegd. Deze eigenschappen worden later ook nog onderzocht.

Filtertypen

Een **laagdoorlaatfilter** laat lage frequenties zo ongehinderd mogelijk door en verzwakt hoge frequenties. Daartussen ligt het overgangsbereik. Het punt waarop het signaal 3 dB verzwakt is, wordt als de grens tussen de doorlaatband en het overgangsbereik. De betreffende frequentie is daarom een belangrijke filterparameter. Vanaf een bepaalde demping wordt van de stopband gesproken. Hiervoor bestaan geen algemene afspraken, omdat dit afhankelijk is van de betreffende toepassing. **Figuren 1 en 2** tonen de frequentiecarakteristiek van laagdoorlaatfilters. Een laagdoorlaatfilter laat ook gelijkspanningen door.

Een **hoogdoorlaatfilter** laat hoge frequenties door en verzwakt lage frequenties. Ook hier geeft het -3dB-punt de overgang van de doorlaatband naar het overgangsbereik aan (**figuur 3**). De opmerkingen over het laagdoorlaatfilter gelden mutatis mutandis ook voor het hoogdoorlaatfilter. Een hoogdoorlaatfilter blokkeert echter een eventuele DC-component van het ingangssignaal.

Een **banddoorlaatfilter** laat een bepaald frequentiebereik door en verzwakt zowel lagere als hogere frequenties. Er zijn twee -3dB-punten die de doorlaatband definiëren (**figuur 4**). Gelijkspanningen worden geblokkeerd vanwege het hoogdoorlaattedeelte.

Het tegenovergestelde van banddoorlaatfilter is het **bandsperfilter**. Hier wordt een bepaald frequentiebereik verzwakt terwijl hogere en lagere frequenties worden doorgelaten (**figuur 5**). Het laagdoorlaattedeelte laat DC-componenten door.

Een **allpassfilter** verandert de amplitude niet: dit filter heeft een vlakke frequentiecarakteristiek. De groepslooptijd resp. de fase (**figuur 6**) van het signaal verandert echter als functie van de frequentie. Als u de uitgangssignalen van (meerdere) allpassfilters bij het originele signaal optelt, is het resultaat een kamfilter met corresponderende dips (*notches*) in het amplitudeverloop.

Filterconfiguraties

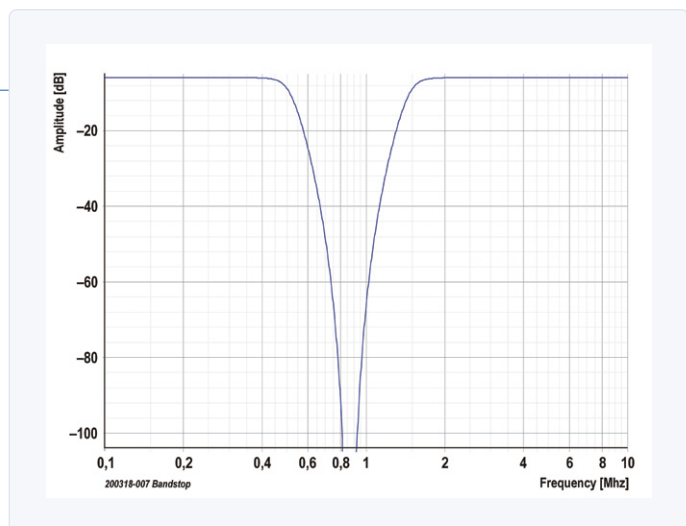
Maar hoe ontwerpt u filters en legt u de eigenschappen ervan vast? Dat is, zeker

voor filters van hogere orde, absoluut niet triviaal. Wiskundigen van naam hebben hiervoor al vele jaren geleden mathematische oplossingen volgens speciale regels ontwikkeld. Deze regels zijn nog steeds van toepassing, alleen de rekenarij wordt ons door de PC en speciale filterprogramma's uit handen genomen. Ter ere van deze wiskundigen dragen de betreffende filtertypen hun naam. Enkele veelvoorkomende filtertypen (zonder aanspraak op volledigheid) zijn:

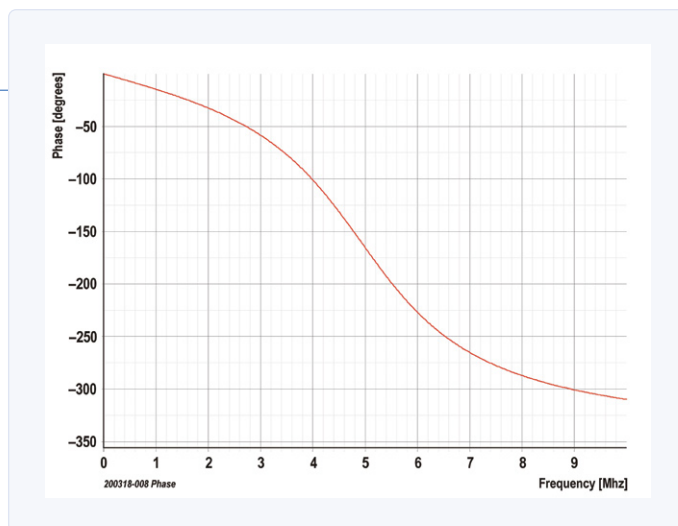
- Bessel
- Butterworth
- Chebyshev
- Cauer

Daarnaast zijn veel andere filtervarianten denkbaar en maakbaar – u kunt zelfs verschillende karakteristieken combineren. Hieronder bekijken we de belangrijkste eigenschappen van deze filtertypen, om de keuze voor een bepaalde toepassing te vergemakkelijken. **Figuur 7** toont vier verschillende passieve laagdoorlaatfilters. De bijbehorende frequentiecarakteristieken zijn in **figuur 8** weergegeven.

Hoewel het schema van de drie bovenste filters afgezien van de onderdelenwaarden identiek is, zijn er duidelijke verschillen in de frequentiecarakteristiek. Met het Bessel-filter verloopt de overgang van de doorlaatband naar het sperbereik zeer vloeiend. Een Butterworth-filter heeft een duidelijk steilere karakteristiek. Het Chebyshev-filter is nog steiler. Het Cauer-filter zorgt met met twee extra condensatoren parallel aan de spoelen voor twee extra bandstops en realiseert zo een nog steilere overgang naar de stopband.



Figuur 5. Frequentiearakteristiek van een bandsperfilter; dubbellogaritmische schaalverdeling.



Figuur 6. Fasekarakteristiek van een allpassfilter; frequentie lineair.

De frequentiearakteristiek is daarom niet continu, maar vooral bij hogere frequenties blijft de demping nagenoeg constant en geringer dan bij de andere drie filtertypen. De plaats van de 'dips' hangt af van de

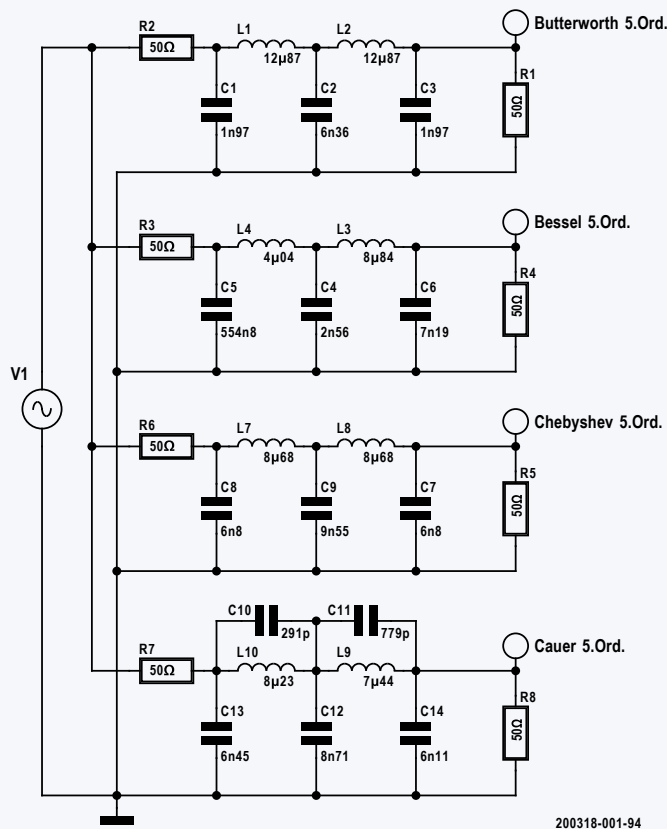
onderdelenwaarden. Met een geschikte dimensionering kunnen deze notches worden gebruikt om specifieke frequenties te onderdrukken. Afhankelijk van het ontwerp kunnen de 'bult' tussen de twee

dips en de verzwakking bij hoge frequenties veranderen.

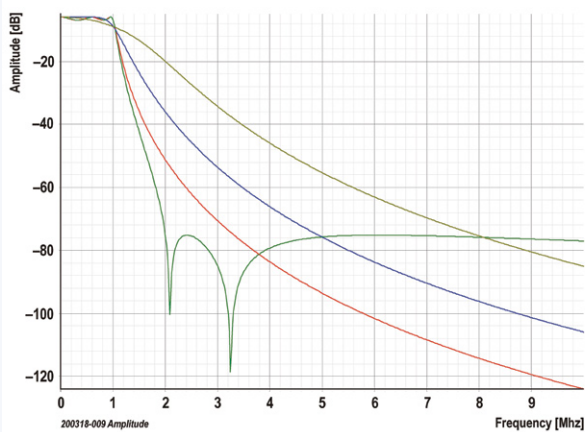
In **figuur 9** ziet u de rimpel in de doorlaatband en het amplitudeverloop rond het -3dB-punt in meer detail. Het Bessel-filter begint al vroeg in de doorlaatband te dempen, maar dan wel geleidelijk. Butterworth gedraagt zich bijna ideaal, vergelijkbaar met eenvoudige RC-laagdoorlaatfilters, maar de steilheid is niet meer dan gemiddeld. Chebyshev en Cauer vertonen een specifieke rimpel in de doorlaatband met een amplitude van 1 dB. Deze filters hebben bij de nominale frequentie geen demping van 3 dB maar slechts van 1 dB. Hiermee moet bij het ontwerpen van een filter rekening worden gehouden. En voor Chebyshev en Cauer geldt bovendien: hoe steiler het filter, des te meer rimpel in de doorlaatband.

Figuur 10 laat zien dat de groepslooptijd bij het Bessel-filter onafhankelijk is van de frequentie. Bij het Butterworth-filter neemt de groepslooptijd continu toe met de frequentie. Bij Chebyshev en Cauer vertoont de groepslooptijd een zekere rimpel.

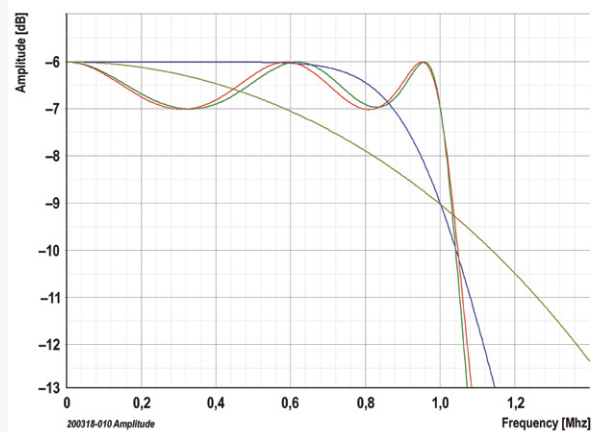
Het concrete verloop van de uitgangssignalen is ook interessant als de filters een signaalfank voor hun kiezen krijgen (of als ze worden aangestuurd met een blok golf (**figuur 11**)). De staprespons van het Bessel-filter (**figuur 12**) vertoont bijna geen overshoot. Het Butterworth-filter (blauwe curve) toont een duidelijke, maar snel afnemende overshoot. Bij Chebyshev en Cauer zien we zoiets als een gedempte trilling. Ook komen de signaalfanken bij de vier filters niet op hetzelfde moment, wat ook te verwachten is gezien de verschillende groepslooptijden.



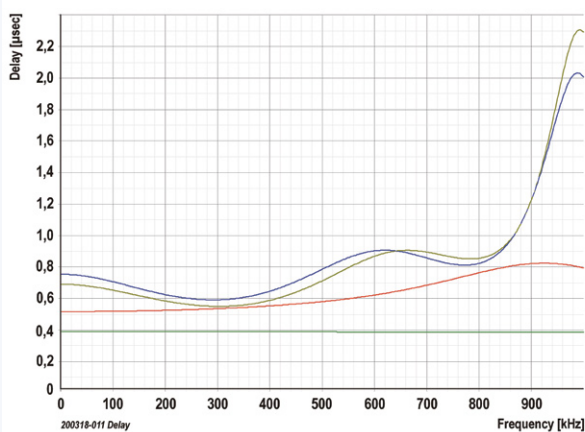
Figuur 7. Passieve 5e-orde 1MHz-laagdoorlaatfilters (Butterworth, Bessel, Chebyshev, Cauer).



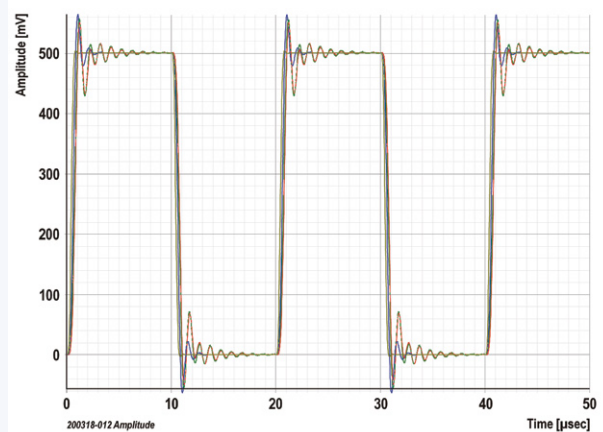
Figuur 8. Frequentiekaracteristieken van de vier laagdoorlaatfilters van figuur 7 (amplitude logaritmisch, frequentie lineair). Lichtgroen = Bessel, blauw = Butterworth, rood = Chebyshev en donkergroen = Cauer.



Figuur 9. Vergroting van een deel van figuur 8. Hier kunt u het verloop in de doorlaatband en rond het -3dB-punt duidelijker zien.



Figuur 10. Groepslooptijd van de vier filters in de doorlaatband als functie van de frequentie. Donkergroen = Bessel, rood = Butterworth, lichtgroen = Chebyshev en blauw = Cauer.



Figuur 11. Verloop van de uitgangssignalen van de vier filters wanneer een blok golf wordt aangelegd. Lichtgroen = Bessel, blauw = Butterworth, rood = Chebyshev en donkergroen = Cauer.

De rimpel in het signaalverloop kan niet alleen elektrotechnisch maar ook 'spectraal' worden beredeneerd: volgens de heer Fourier mag een blok golf worden beschouwd als de som van zijn sinus-vormige frequentiecomponenten. Deze frequenties ondergaan tijdens het passeren van het filter ieder een andere amplitude-verandering en eventueel ook een andere verschuiving in de tijd. Het is dus geen wonder dat aan de uitgang van de filters geen continu amplitudeverloop te zien is. Bij het Bessel-filter worden hogere frequentie componenten weliswaar verzwakt, maar dankzij de constante groepslooptijd worden ze niet verschoven ten opzichte van de lagere frequenties. Dit vergroot de

stijg- en daaltijden en rondt de hoeken van de blok golf als het ware af. Vanwege de sterk frequentie-afhankelijke groepslooptijd bij Chebyshev en Cauer ontstaat duidelijk zichtbare overshoot en uitslingering na een snelle verandering van het ingangssignaal (signaalfank). Dit gedrag was in het verleden bijzonder storend in de analoge videoteknik. Door toevoeging van allpassfilters werd de groepslooptijd afgevlakt om de overshoot te verminderen en rondt de signaalfanken te centreren. Het ontwerp van zulke allpassfilters voor de correctie van de groepslooptijd is een wetenschap op zich. Slechts een paar ontwerpprogramma's zijn tot zulke berekeningen in staat. Bovendien zijn er dan veel

meer onderdelen nodig dan bij een 'puur' laagdoorlaatfilter.

Criteria voor filterselectie

In **tabel 1** hebben we de belangrijkste eigenschappen van de vier meestgebruikte filtertypen voor u samengevat. Hieronder noemen we nogmaals de belangrijkste features:

- Een Bessel-filter vertoont een optimaal impulsgedrag en is daarom geschikt om uit een steilflankig digitaal signaal een puls met 'afgeronde hoeken' te maken. Door de geringe steilheid is dit filtertype nauwelijks bruikbaar voor frequentieonderdrukking.

Tabel 1. Filtereigenschappen

Filtertype	Doorlaatband	Stopband		Stelheid
		verloop	damping	
Bessel	langzaam afnemend	langzaam afnemend	gering	gering
Butterworth	vlak	continu dalend	gemiddeld	gemiddeld
Chebyshev	met rimpel	continu dalend	groot	groot
Cauer	met rimpel	met rimpel	groot	groot

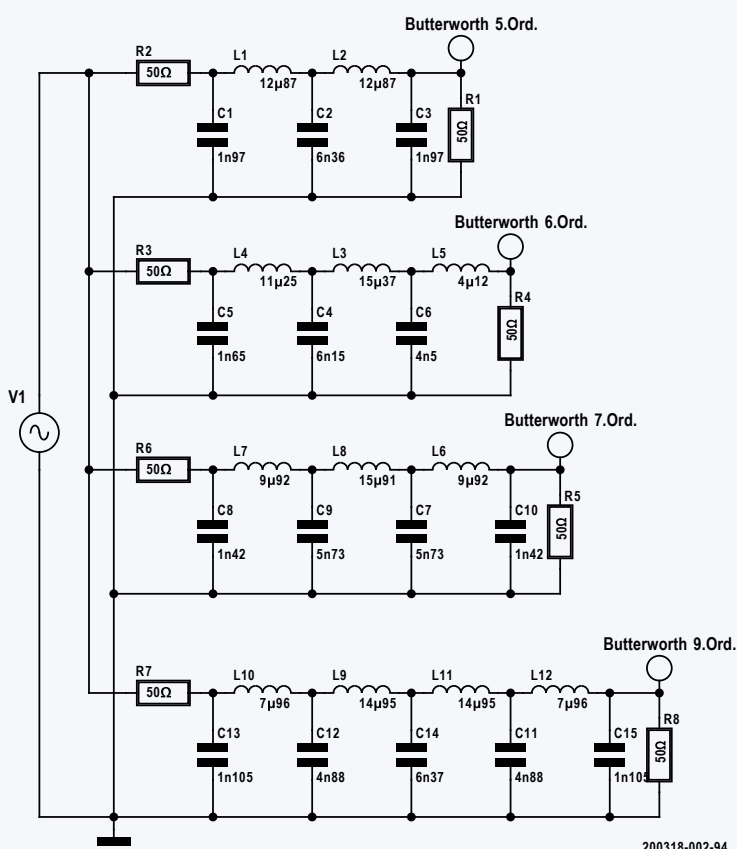
- Het Butterworth-filter biedt een goed compromis tussen filtersteilheid en impulsgedrag. Het amplitudeverloop vertoont geen rimpel.
- Chebyshev- en Cauer-filters hebben bij de afsnijfrequentie een steile helling, maar dit gaat ten koste van rimpel in

de doorlaatband alsmede uitgesproken en langdurige uitslingerverschijnselen in het tijddomein.

Nu moeten we nog bekijken hoe de eigenschappen van een filter veranderen met diens orde (of anders uitgedrukt: het aantal

Tabel 2. Terminologie

Technologie	analoog passief analoog actief digitaal
Type	laagdoorlaat banddoorlaat bandsper allpass
Configuratie	Bessel Butterworth Chebyshev invers Chebyshev Cauer Lehmann Legendre Gauss raised cosine TBT
Impedantie	ingangsimpedantie uitgangsimpedantie
Frequentie	grensfrequentie sperfrequentie doorlaatband stopband bandbreedte
Damping	doorlaatdamping sperdamping
Overig	groepslooptijd impulsgedrag orde complexiteit gevoeligheid voor onderdelentoleranties

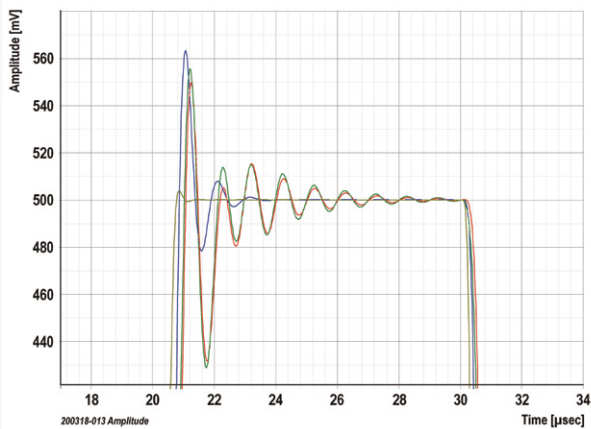


Figuur 13. Butterworth-filters van de 5e, 6e, 7e en 9e orde.

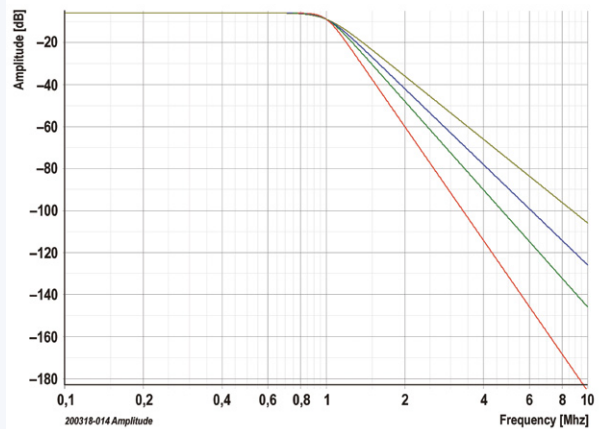
frequentiebepalende componenten). Als voorbeeld hebben we in **figuur 13** Butterworth-filters van de 5e, 6e, 7e en 9e orde getekend. Als u de onderdelenwaarden bekijkt, ziet u een symmetrie bij de oneven ordes. In **figuur 14** ziet u heel goed hoe de steilheid van het filter toeneemt met de orde. **Figuur 15** laat (vergroot) zien wat er in de buurt van het -3dB-punt gebeurt: alle karakteristieken snijden elkaar precies in dit punt. Filters van hogere orde gaan pas bij hogere frequenties verzwakken, maar dan des te sterker.

Hoe hoger de orde, hoe groter de groepslooptijd (**figuur 16**) en de overshoot/uitslingering (**figuur 17**), zowel in amplitude als in tijdsduur.

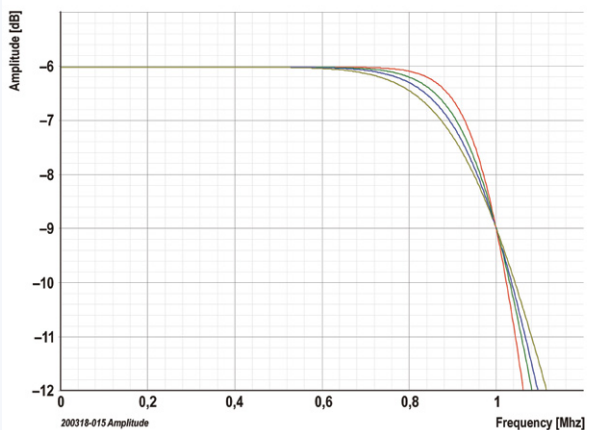
De steilheid van een filter wordt dus zowel door de gekozen configuratie (resp. het



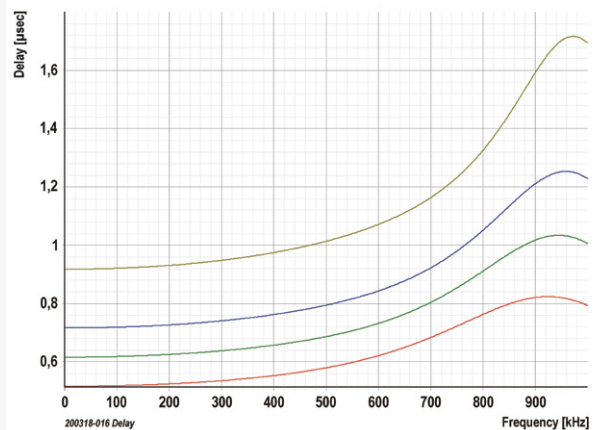
Figuur 12. De staprespons is hier duidelijk zichtbaar (vergroting van figuur 11). Lichtgroen = Bessel, blauw = Butterworth, rood = Chebyshev en donkergroen = Cauer.



Figuur 14. Frequentiekenmerken van de filters van figuur 13; dubbellogaritmische schaalverdeling. 5e orde = lichtgroen, 6e orde = blauw, 7e orde = donkergroen en 9e orde = rood.



Figuur 15. Dezelfde karakteristieken als in figuur 14, vergroot rond het -3dB-punt.



Figuur 16. Groepslooptijden als functie van de frequentie voor vier verschillende filterordes. Lichtgroen = 9, blauw = 7, donkergroen = 6 en rood = 5.

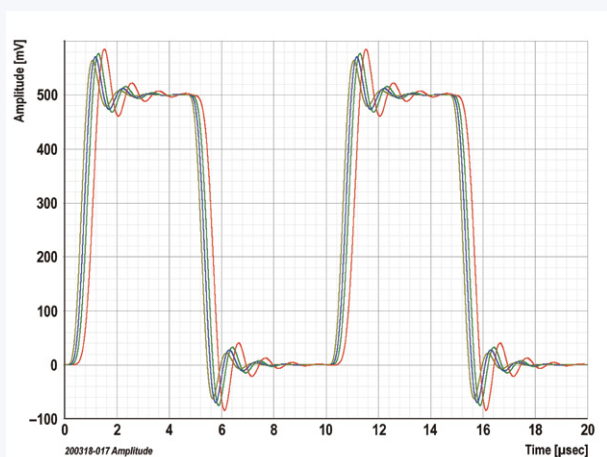
filtertype) bepaald als door de orde. Door voor een hoge orde en dus een groter aantal onderdelen te kiezen, kan ook een steiler Bessel-filter worden geconstrueerd.

In **tabel 2** hebben we belangrijkste termen op een rijtje gezet waar u in het filterwereldje mee te maken kunt krijgen. 

200318-01

WEBLINK

[1] Simetrix: <http://www.simetrix.co.uk>



Figuur 17. Staprespons bij vier verschillende filterordes. Lichtgroen = 5, blauw = 6, donkergroen = 7 en rood = 9.