

ELEKTRISCHE FILTERS

Een filter is een elektronische schakeling, die het frequentieverloop van het audiosignaal verandert. Filters dienen in het algemeen om gewenste en ongewenste frequentiegebieden te scheiden of om gedeelten uit het frequentiespectrum te bekrachtigen of te verzwakken. Meestal met het doel om storingen of negatieve invloeden te bestrijden.

In menige versterker treffen we daarom een ruis-, rumble- en subsonisch, soms ook presence filter aan. In de FM tuner een MPX (Multiplex) ruisfilter, in de luidspreker een wisselfilter en in de CD speler (in digitale audiocomponenten in het algemeen) een laagdoorlaatfilter. In de bijdragen over de afzonderlijke componenten wordt daar nader op ingegaan.

Om te beginnen moeten we onderscheid maken tussen analoge en digitale filters en tussen passieve en actieve.

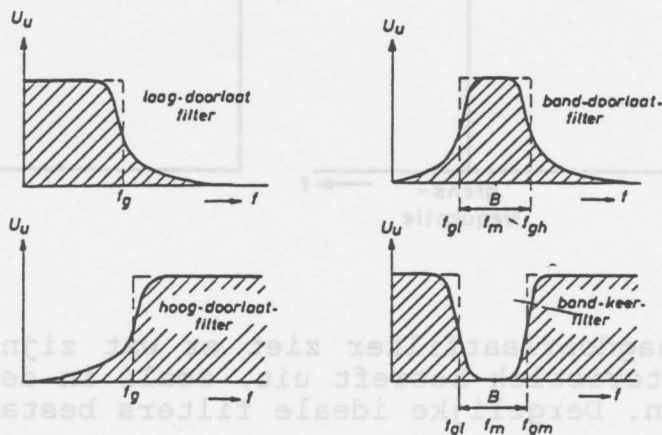
Passieve filters bevatten alleen passieve componenten, zoals weerstanden, condensatoren en spoelen. Ze hebben daarom geen voedingsspanning nodig en ze kunnen signalen alleen verzwakt doorgeven. Actieve filters bevatten naast passieve componenten ook actieve dito's, zoals transistoren en opamps. Ze hebben derhalve een voedingsspanning nodig en kunnen versterken of verzwakken, dat steeds op selectieve manier.

Een digitaal filter is in deze zin een actief filter, dat in de computertechnologie op rekenkundige manier (door oversampling) al vermenigvuldigend en optellend (bij 2-, 4- of nog meervoudige oversampling) ongewenste stoorfrequenties verkleint of helemaal "wegrekent".

Kenmerken

Voor het gemiddelde filter geldt een aantal kernbegrippen om hun werking nader te bepalen. Het gaat hier om grootheden als:

- f_g = grensfrequentie
- f_{gl} = laagste grensfrequentie
- f_{gh} = hoogste grensfrequentie
- f_m = middenfrequentie
- B = bandbreedte



Op de voorgaande pagina is een aantal standaard filtervormen afgebeeld. Hun ideale verloop is telkens met een stippellijn aangegeven.

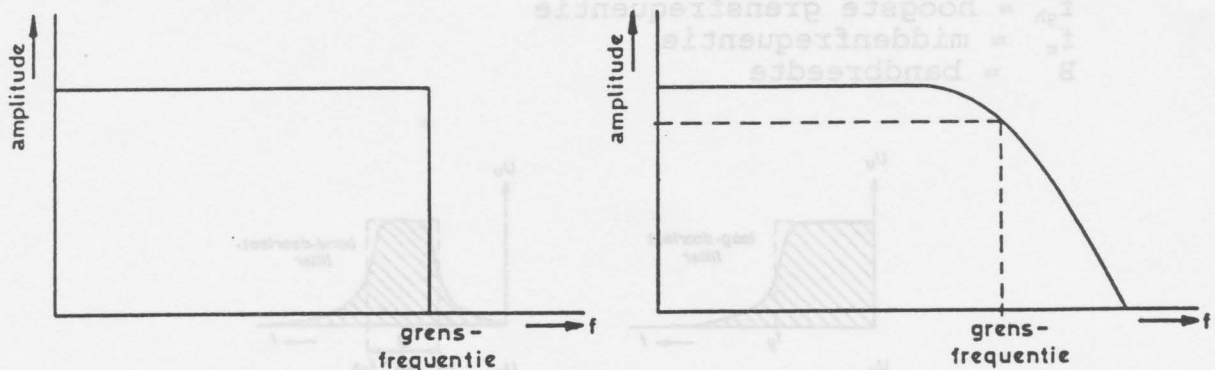
Analoge filters in de digitale techniek

Wanneer we ons vooreerst beperken tot het laagdoorlaatfilter in digitale audiosystemen (PCM opnametechniek, CD spelers, DAT recorders), kunnen we ons afvragen, waarom dit nodig is en waarom er zulke zware eisen aan worden gesteld.

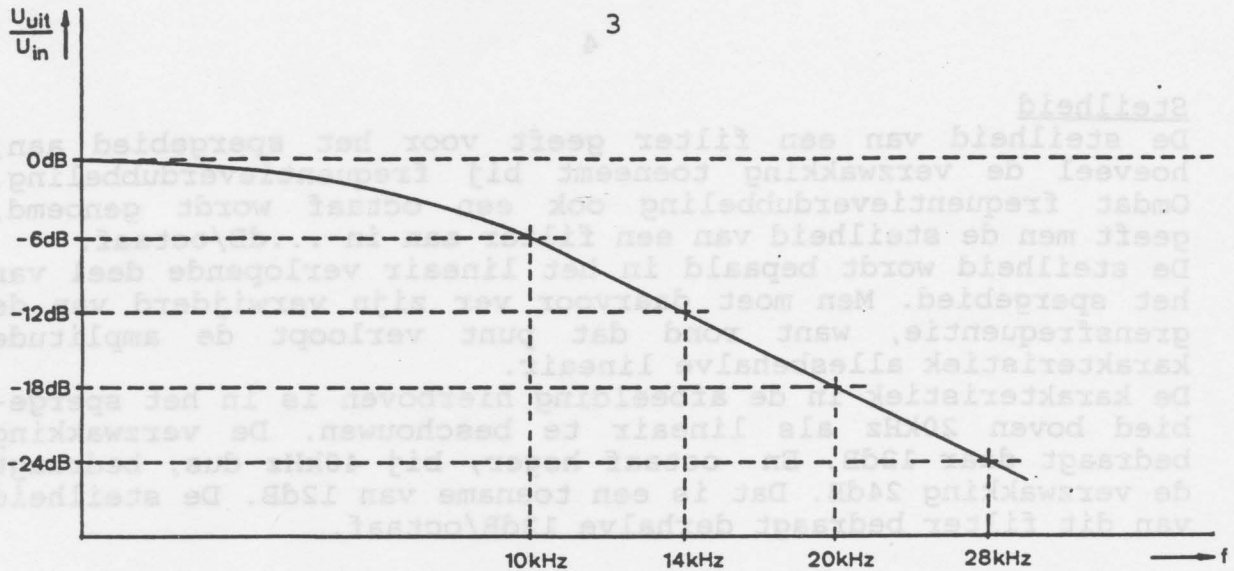
Om een wisselspanning digitaal vast te leggen, is het voor een duidelijke herkenning van de frequentiehoogte absoluut noodzakelijk om tenminste tweemaal per periode (+ en 1 fase) de juiste spanningswaarde te bepalen. Dit betekent, dat - volgens het theorema van Shannon (of Nyquist) - de bemonsteringsfrequentie dus tweemaal de hoogst weer te geven grensfrequentie moet zijn. Daar die hoogste grensfrequentie tenminste 20kHz bedraagt (bij CD), moet de bemonsteringsfrequentie dus tenminste 40kHz bedragen.

Wordt niet aan deze voorwaarde voldaan, dan treedt in het audiobereik een naar soort intermodulatievervalsing op, dat Aliasing heet. Vandaar, dat het nog analoge audiosignaal voordat het op weg naar digitalisering aan de sample and hold schakeling wordt toegevoerd, een laagdoorlaatfilter moet passeren. In dat filter moet ervoor worden gezorgd, dat alle signalen met een frequentie, hoger dan de halve bemonsteringsfrequentie absoluut niet worden doorgelaten, c.q. liefst meer dan 60dB worden verzwakt om aliasing valsing te voorkomen.

In de praktijk blijkt hiervoor een heel steil "brick wall" filter nodig te zijn, dat deze grote verzwakking binnen een bandbreedte van ruim 2kHz realiseert, zonder dat de frequentiedoorgifte van de signalen lager dan de grensfrequentie ook maar enigszins worden aangetast.



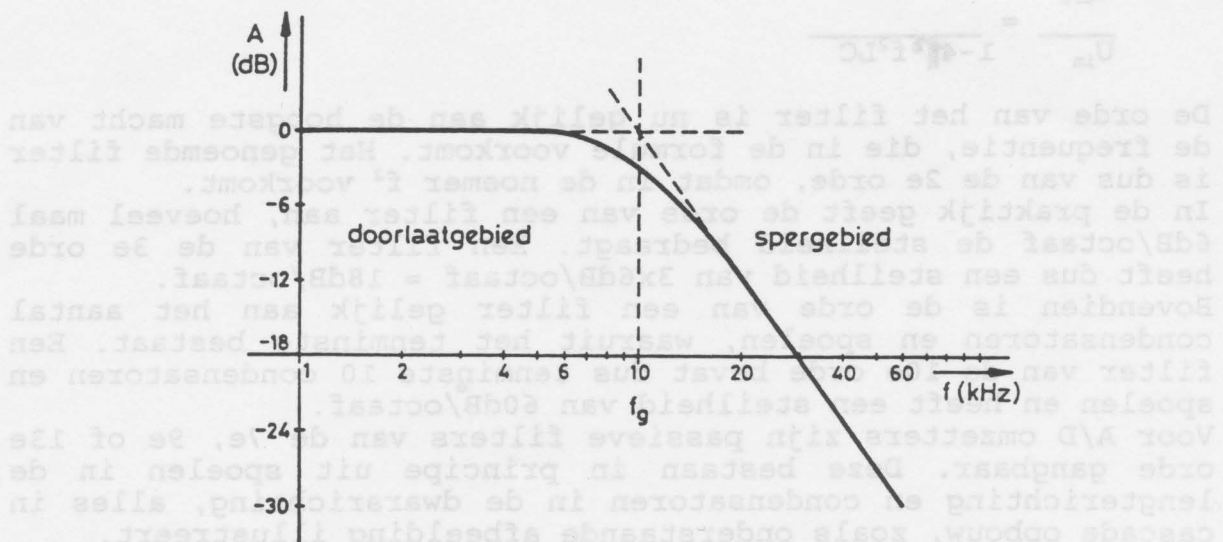
Het ideale laagdoorlaatfilter ziet er wat zijn frequentie/amplitude karakteristiek betreft uit, zoals in de linker afbeelding hierboven. Dergelijke ideale filters bestaan echter niet.



In het beste geval hebben ze een amplitudekarakteristiek zoals hierboven. Bij een constante ingangsspanning is de grensfrequentie de frequentie, waarbij aan de uitgang van het filter het vermogen is gehalveerd. De uitgangsspanning is dan $\sqrt{2}$ of 1,4 maal kleiner geworden. Dit komt neer op een verzwakking van 3dB. Duidelijk blijkt, dat de frequenties boven de grensfrequentie toch enigszins, zij het verzwakt, worden doorgelaten.

Op de gevolgen daarvan wordt nog teruggekomen.

Filter kenmerken



Frequentie/amplitude karakteristiek

De amplitude karakteristiek van een filter is een grafiek, waarin de verzwakking (versterking) van dat filter is weergegeven als functie van de frequentie. In onderstaande afbeelding is de karakteristiek van een eenvoudig laagdoorlaatfilter afgebeeld. Hierin zijn de amplitudeverhouding $A = U_{\text{uit}}/U_{\text{in}}$ en de frequentie logaritmisch op de verticale c.q. horizontale as uitgezet.

Steilheid

De steilheid van een filter geeft voor het sfergebied aan, hoeveel de verzwakking toeneemt bij frequentieverdubbeling. Omdat frequentieverdubbeling ook een octaaf wordt genoemd, geeft men de steilheid van een filter aan in ...dB/octaaf. De steilheid wordt bepaald in het lineair verlopende deel van het sfergebied. Men moet daarvoor ver zijn verwijderd van de grensfrequentie, want rond dat punt verloopt de amplitude karakteristiek allesbehalve lineair.

De karakteristiek in de afbeelding hierboven is in het sfergebied boven 20kHz als lineair te beschouwen. De verzwakking bedraagt daar 12dB. En octaaf hoger, bij 40kHz dus, bedraagt de verzwakking 24dB. Dat is een toename van 12dB. De steilheid van dit filter bedraagt derhalve 12dB/octaaf.

Orde van het filter

De orde van een filter geeft aan, in welke mate de verzwakking van dat filter afhankelijk is van de frequentie. In zoverre bestaat dus een direct verband met de steilheid. De orde en de steilheid geven immers beide aan, hoeveel de verzwakking in het sfergebied toeneemt als functie van de frequentie.

De orde van het filter is meer een wiskundige term, die als volgt kort en populair kan worden omschreven:

Van elk filter kan het gedrag in een formule worden gevat. Voor het eerder getoonde laagdoorlaatfilter geldt:

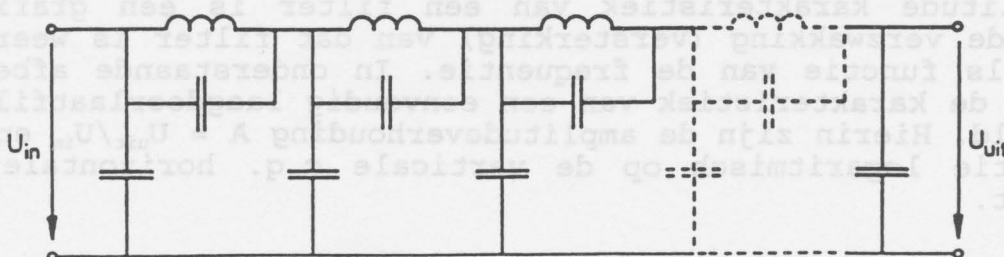
$$\frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{1}{1 - 4\pi^2 f^2 LC}$$

De orde van het filter is nu gelijk aan de hoogste macht van de frequentie, die in de formule voorkomt. Het genoemde filter is dus van de 2e orde, omdat in de noemer f^2 voorkomt.

In de praktijk geeft de orde van een filter aan, hoeveel maal 6dB/octaaf de steilheid bedraagt. Een filter van de 3e orde heeft dus een steilheid van $3 \times 6\text{dB/octaaf} = 18\text{dB/octaaf}$.

Bovendien is de orde van een filter gelijk aan het aantal condensatoren en spoelen, waaruit het tenminste bestaat. Een filter van de 10e orde bevat dus tenminste 10 condensatoren en spoelen en heeft een steilheid van 60dB/octaaf.

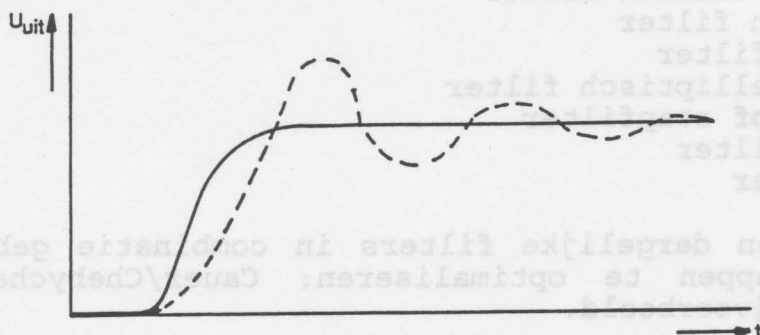
Voor A/D omzetters zijn passieve filters van de 7e, 9e of 13e orde gangbaar. Deze bestaan in principe uit spoelen in de lengterichting en condensatoren in de dwarsrichting, alles in cascade opbouw, zoals onderstaande afbeelding illustreert.



Met zes spoelen en zeven condensatoren kan zo een 13e orde filter worden gerealiseerd met een steilheid van $13 \times 6 \text{ dB/octaaf} = 78 \text{ dB/octaaf}$. Dat is als "brick wall" filter nog altijd niet de gewenste steilheid van ruim 250 dB/octaaf . Om die te bereiken, worden in de lengterichting condensatoren parallel aan de spoelen geschakeld. Er ontstaan dan LC kringen. De resonantiefrequenties liggen vervelend genoeg in het sfergebied vlakbij de grensfrequentie.

Bij elke resonantie neemt niet alleen de verzwakking sterk toe, maar ook de nare bijverschijnselen (opslingering, rimpels, fasefouten) nemen sterk toe. Wel is het mogelijk om met een 13e orde filter het frequentiegebied vlak boven de grensfrequentie met een steilheid van ruim 500 dB/octaaf af te kappen.

Sprongresponsie of stapresponsie (impulsgedrag)



De sprongresponsie van een filter geeft grafisch weer, hoe het uitgangssignaal verloopt bij een stapvormige verandering van het ingangssignaal.

In het ideale geval moet de gestippelde blokvorm worden bereikt. Hoezeer dat mislukt, blijkt uit de beide ingetekende sprongresponsies bij het betreffende 4e orde filter. Ze gelden voor verschillende filtertypes, die verderop worden beschreven.

Fasekarakteristiek

De fasekarakteristiek is bij filters een grafiek, waarin de faseverschuiving tussen in- en uitgangssignaal van dat filter als functie van de frequentie is weergegeven.

Uit een dergelijke karakteristiek blijkt, in welke mate fasevervorming (groepslooptijden en hun verschillen) optreedt. De fasevervorming is gelukkig ook enigszins af te lezen uit de sprongresponsie. Een gave sprongresponsie wijst op een goede fasekarakteristiek, dus op geringe fasevervorming.

De bekende blokgolfbeelden, die met CD test- en meetplaten bij diverse frequenties kunnen worden opgeroepen, illustreren fraai de filterwerking achter de D/A omzetter, waar immers ook

pittige laagdoorlaatfilters in de strijd worden geworpen. Hoe steiler de flanken, des te minder "Overshoot", des te minder "Ringing" (uitslingeren). En hoe symmetrischer het scoopbeeld is, des te beter is de fasekarakteristiek. Oversampelaars winnen het in deze discipline altijd van analoge filteraars.

Een paar types laagdoorlaatfilter

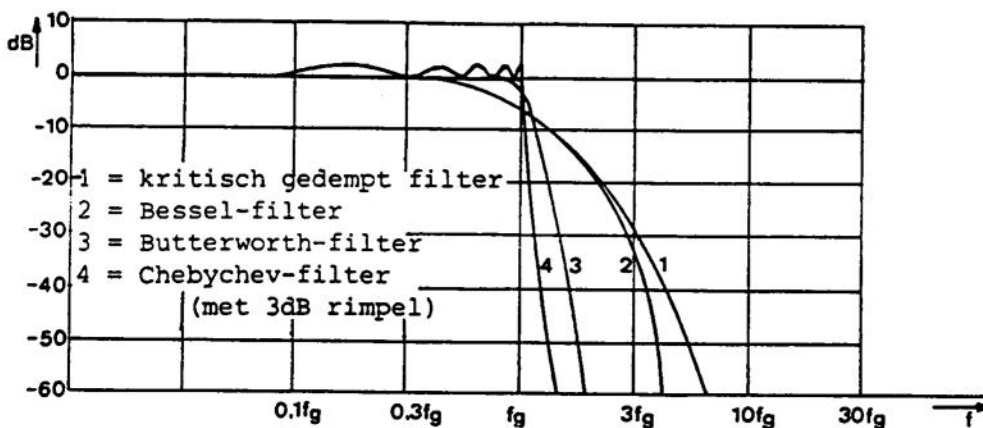
Van een filter kunnen de waarden van de passieve componenten zodanig worden gewijzigd, dat de grensfrequentie gelijk blijft, maar dat de amplitude- en de fasekarakteristiek plus de sprongresponsie veranderen.

Op basis hiervan kunnen filters worden onderverdeeld in een groot aantal types, dat vaak de eigenaam van de ontwerper meekreeg.

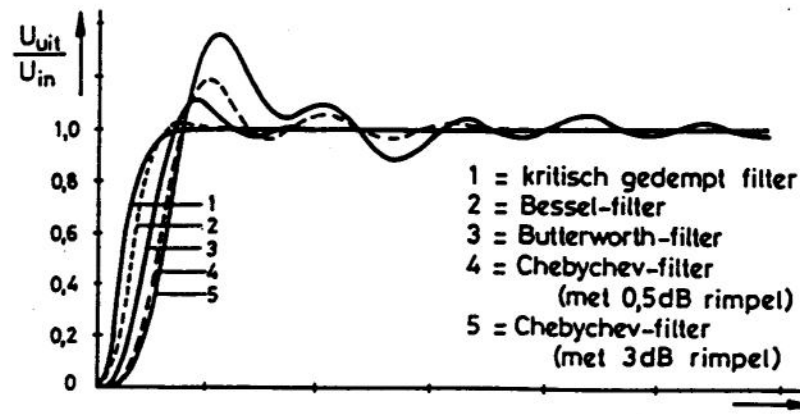
Enige veelgebruikte types zijn:

- kritisch gedempt filter
- Bessel- of Thomson filter
- Butterworth filter
- Chebychef filter
- Cauer- of elliptisch filter
- Legendre- of stapfilter
- Linkwitz filter
- Riley filter

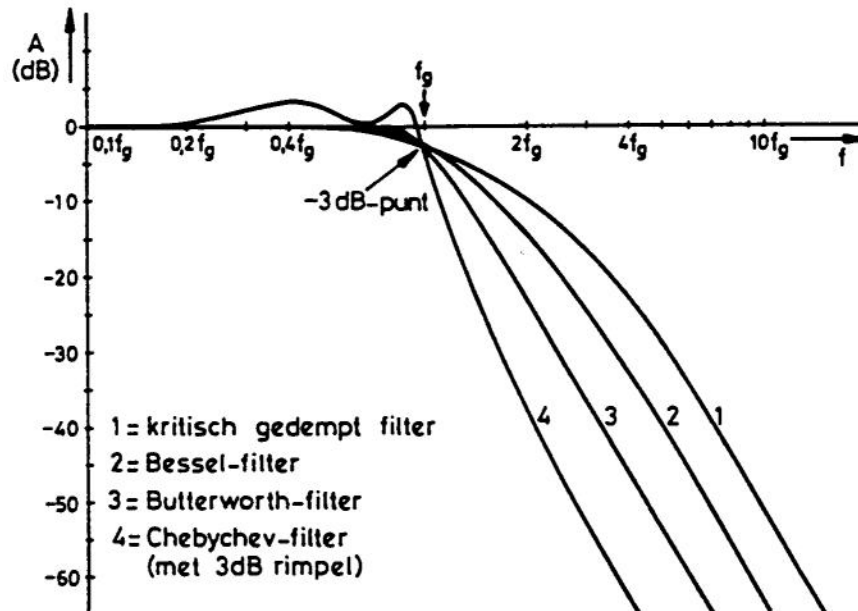
Niet zelden worden dergelijke filters in combinatie gebruikt om hun eigenschappen te optimaliseren: Cauer/Chebychef en Linkwitz/Riley bijvoorbeeld.



Hierboven zijn de amplitudekarakteristieken van een viertal 10e orde laagdoorlaatfilters weergegeven.



Amplitudekarakteristiek en sprongresponsie van vijf 4e orde hoogdoorlaatfilters.



Amplitudekarakteristiek en sprongresponsie van vier laagdoorlaatfilters.

Het kritisch gedempt filter vertoont een amplitudekarakteristiek, waarin het doorlaatgebied rond de grensfrequentie mooi geleidelijk overgaat in het spergebied (curve 1 in beide bovenstaande afbeeldingen). De sprongresponsie verloopt ook geleidelijk en vertoont geen op/uitslingering.

Het Besselfilter heeft een optimale sprongresponsie, die praktisch geen uitslingering vertoont. Daardoor heeft het als positieve eigenschap een heel fraaie fasekarakteristiek, die beter is dan bij vrijwel elk ander type. Vandaar bijvoorbeeld de toepassing door Philips (en door andere Philips "clonen" fabrikanten) aan het eind van de digitale (oversampling) filtering.

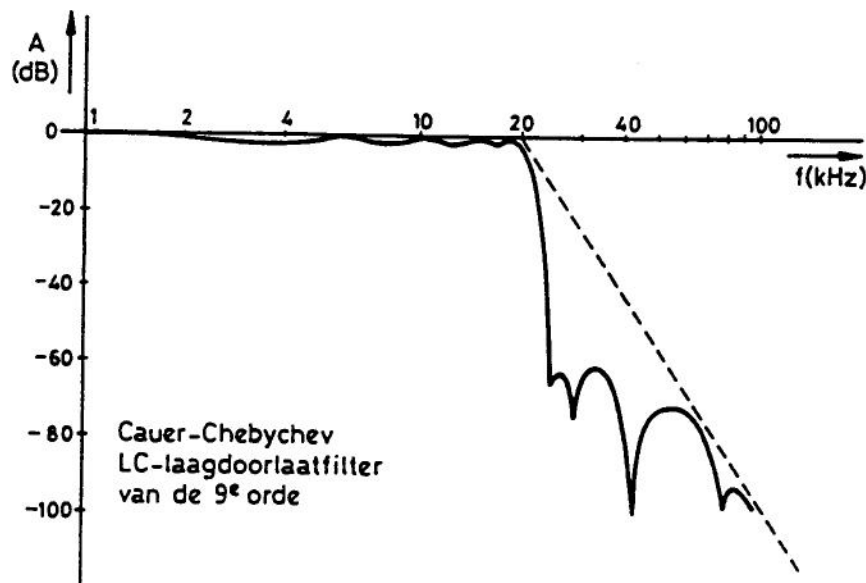
De overgang van doorlaatgebied naar spergebied in de amplitu-

de karakteristiek verloopt geleidelijk. De afbuiging is iets scherper dan bij het kritisch gedempt filter.

Het Butterworthfilter heeft een amplitudekarakteristiek, die in het doorlaatgebied zo lang mogelijk horizontaal verloopt en die pas vlak voor de grensfrequentie scherp afbuigt. De sprongresponsie vertoont echter een aanzienlijke uitslingering, die bij toenemende orde groter wordt.

Het Chebysheffilter vertoont een nog scherpere afbuiging bij de grensfrequentie dan het Butterworth filter. Maar dat moet worden bekocht met het nadeel, dat de amplitudekarakteristiek in het doorlaatgebied over vrij grote lengte een rimpel vertoont.

Bij een gegeven orde is die rimpel in de amplitudekarakteristiek groter, naarmate de afbuiging rond de grensfrequentie scherper is. De sprongresponsie van het Chebysheffilter vertoont een nog grotere uitslingering dan het Butterworth filter.



Een bijzonder filtertype is het Cauer- of elliptisch filter. Het vertoont dempingspieken, ook wel nulpunten of dips genaamd. Deze komen voor in het sfergebied; rondom deze dippeken kan de steilheid veel grotere waarden bereiken, dan de uiteindelijke steilheid, die de orde van het filter aangeeft. Het Cauerfilter wordt gecombineerd met een type filter, dat het doorlaatgedrag bepaalt. Veel toepassing vindt het Cauer-Chebyshev filter. De rimpels in het doorlaatgebied worden door een juiste keuze (dus berekening) van de filtercomponenten klein gehouden. De afbuiging naar het sfergebied verloopt vanwege de dempingspieken zeer steil.

Het Cauer-Chebysheffilter is heel geschikt om bij A/D omzetting de aliasing effectief te onderdrukken. Bij D/A omzetting wordt meestal een veel eenvoudiger filter gebruikt. Dat is mogelijk door de toepassing van voorafgaande bijzondere digitale bewerkingen (zoals oversampling). Daardoor ontstaat meer afstand tussen de grensfrequentie en de halve bemonsteringsfrequentie. Het uitgangsfILTER hoeft dan een aanzienlijk minder grote steilheid te hebben.

Oversampling bewerkstelligt ook een veel fijnere trapjesstructuur, waardoor de gewenste, terug te winnen analoge golfvorm al veel dichter wordt benaderd.

Na D/A omzetting en oversampling is meestal "slechts" een 3e orde Besselfilter nodig om een mooi eindresultaat te bereiken.

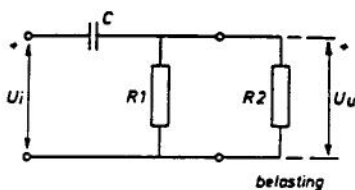
Tot zover wat over filters in het algemeen en over karakteristieken in het bijzonder. Hieronder volgen in schemavorm nog wat praktische toepassingen, waaraan alleen de waarden van weerstanden, condensatoren en spoelen doorgaans ontbreken.

Laagdoorlaatfilter

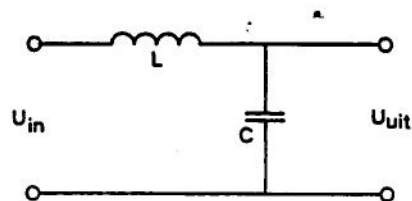
Een typische toepassing van het laagdoorlaatfilter is bijvoorbeeld het afvlakfilter om uit wisselspanning gelijkspanning te winnen. Hieronder is zo'n filter in twee uitvoeringen in schema gebracht. Het rechter filter is het mooiste.

Hoogdoorlaatfilter

Hieronder ook twee voorbeelden van een hoogdoorlaatfilter, zoals die in koppelnetwerken worden gebruikt. Gelijkspanning wordt geblokkeerd, wisselspanning met voldoende hoge frequentie doorgelaten.

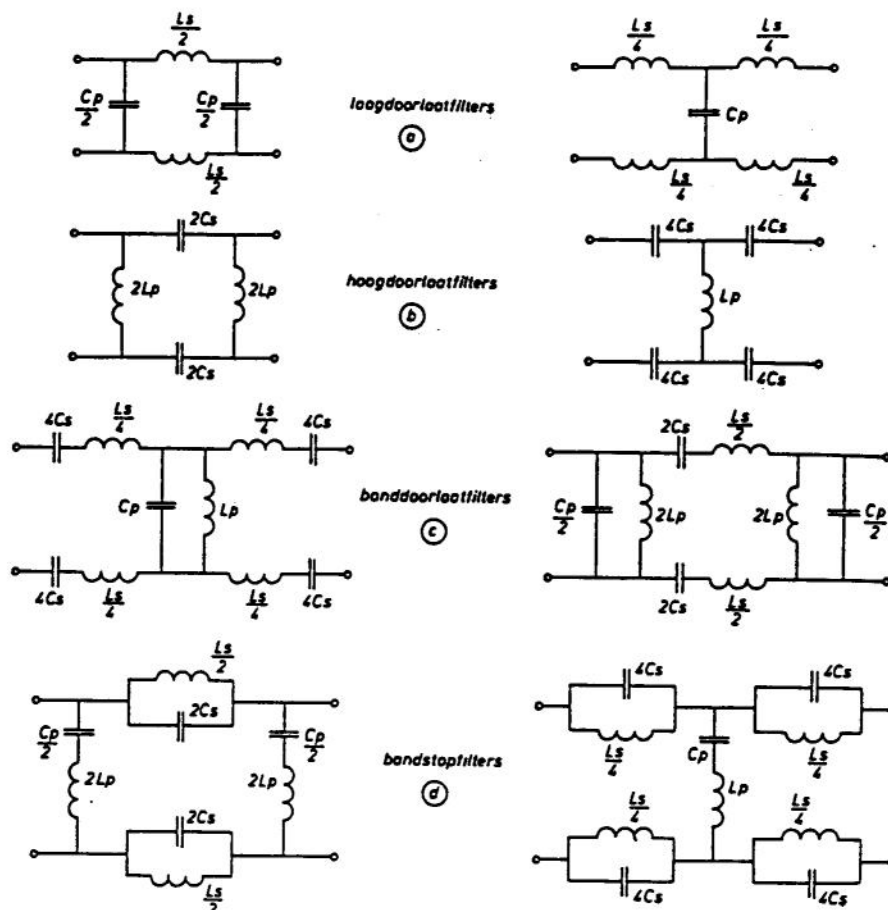


hoogdoorlaatfilter



laagdoorlaatfilter

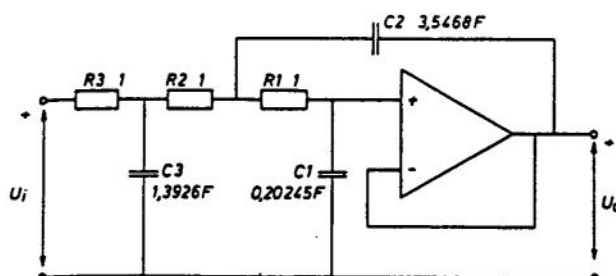
Het gaat hier steeds om eenvoudige RC- en LC filters, die vrij makkelijk te ontwerpen zijn met een soort dedicated rekenlineaal.



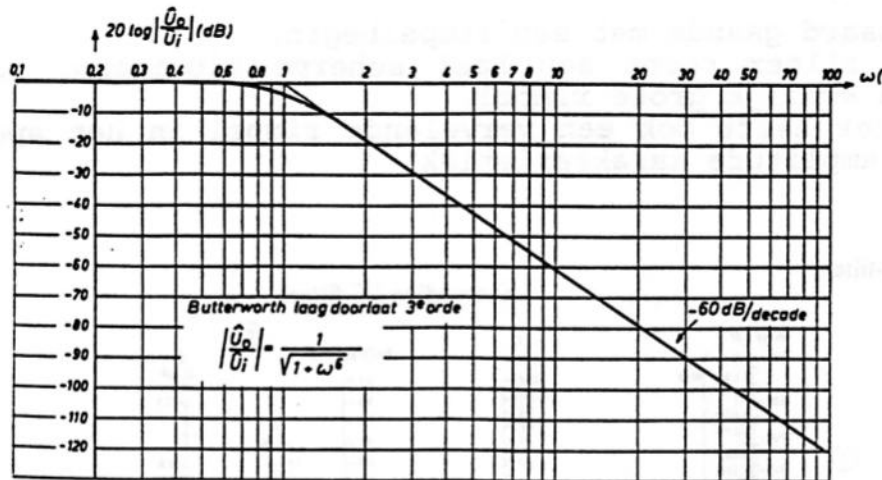
Als het om LC filters gaat, kunnen we behalve de hierboven afgebeelde laag- en hoogdoorlaatfilters ook te maken hebben met een banddoorlaat (of bandpass) en een bandstop (bandstop) filter. Hierboven zijn daarvan wat voorbeelden gegeven. Andere toepassingen ontstaan door enige filtersecties achter elkaar te plaatsen. Verder kennen we het RC filter als fase-draaier, als frequentie-onafhankelijke spanningsdeler, als dubbel T-filter, als fasebrug. Toepassingen, die hier minder relevant zijn.

Actieve filters

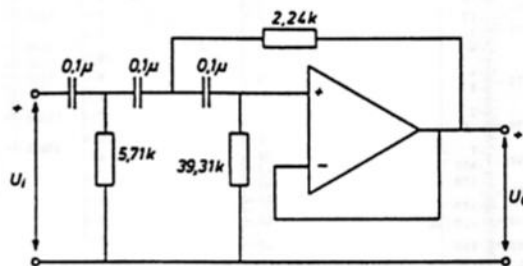
Met behulp van bv. opamps zijn heel fraaie actieve filters te realiseren, zoals onderstaand laagdoorlaatfilter, een 3e orde Butterworthfilter.



Dit filter heeft onderstaande karakteristiek



Een actief hoogdoorlaatfilter kan er zo uitzien:



Digitale filters

laten we hier als minder relevant buiten beschouwing. Interessanter is het namelijk om wat laagdoorlaatfilters, zoals die in digitale audiosystemen (PCM processoren, DAT recorders en CD spelers) voorkomen nader te bezien.

Moraal van het filterverhaal

- Passieve filters, bestaande uit weerstanden, condensatoren en spoelen verschillen al naar hun opzet in hun wezenlijke eigenschappen, zoals daar zijn: steilheid, orde, amplitude- en fasekarakteristiek, sprongresponsie.

Naarmate hun steilheid (en dus hun orde) toeneemt, gaan ze meer en meer uitslingerverschijnselen (rimpels) vertonen in het gewenste, overblijvende audiospectrum.

De sprongresponsie (impulsweergave) en dus ook de fasekarakteristiek raken van slag, wat tijdens weergave goed hoorbaar kan worden.

- Alleen het flauw afzwakkende kritisch gedempt filter vertoont geen opslinging in de sprongresponsie. Het Besselfilter, iets steiler, heeft een behoorlijk lineaire fasekarakteristiek en dus weinig fasevervalsing.

Het Butterworth filter vertoont een mooi vlakke amplitude karakteristiek in het doorlaatgebied en een redelijk scherpe

ELEKTRISCHE FILTERS

Een filter is een elektronische schakeling, die het frequentieverloop van het audiosignaal verandert. Filters dienen in het algemeen om gewenste en ongewenste frequentiegebieden te scheiden of om gedeelten uit het frequentiespectrum te bekrachtigen of te verzwakken. Meestal met het doel om storingen of negatieve invloeden te bestrijden.

In menige versterker treffen we daarom een ruis-, rumble- en subsonisch, soms ook presence filter aan. In de FM tuner een MPX (Multiplex) ruisfilter, in de luidspreker een wisselfilter en in de CD speler (in digitale audiocomponenten in het algemeen) een laagdoorlaatfilter. In de bijdragen over de afzonderlijke componenten wordt daar nader op ingegaan.

Om te beginnen moeten we onderscheid maken tussen analoge en digitale filters en tussen passieve en actieve.

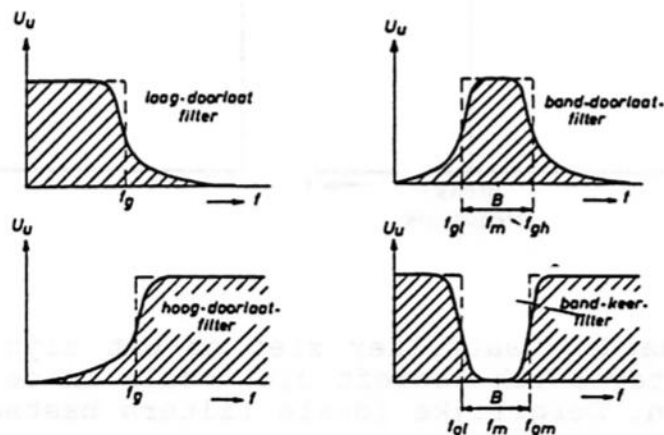
Passieve filters bevatten alleen passieve componenten, zoals weerstanden, condensatoren en spoelen. Ze hebben daarom geen voedingsspanning nodig en ze kunnen signalen alleen verzwakt doorgeven. Actieve filters bevatten naast passieve componenten ook actieve dito's, zoals transistoren en opamps. Ze hebben derhalve een voedingsspanning nodig en kunnen versterken of verzwakken, dat steeds op selectieve manier.

Een digitaal filter is in deze zin een actief filter, dat in de computertechnologie op rekenkundige manier (door oversampling) al vermenigvuldigend en optellend (bij 2-, 4- of nog meervoudige oversampling) ongewenste stoofrequenties verkleint of helemaal "wegreken".

Kenmerken

Voor het gemiddelde filter geldt een aantal kernbegrippen om hun werking nader te bepalen. Het gaat hier om grootheden als:

- f_g = grensfrequentie
- f_{gl} = laagste grensfrequentie
- f_{gh} = hoogste grensfrequentie
- f_m = middenfrequentie
- B = bandbreedte



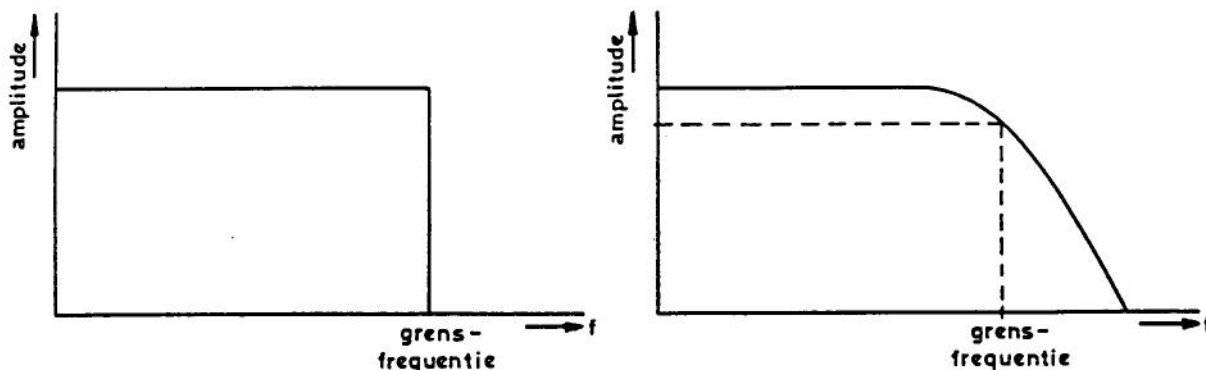
Op de voorgaande pagina is een aantal standaard filtervormen afgebeeld. Hun ideale verloop is telkens met een stippellijn aangegeven.

Analoge filters in de digitale techniek

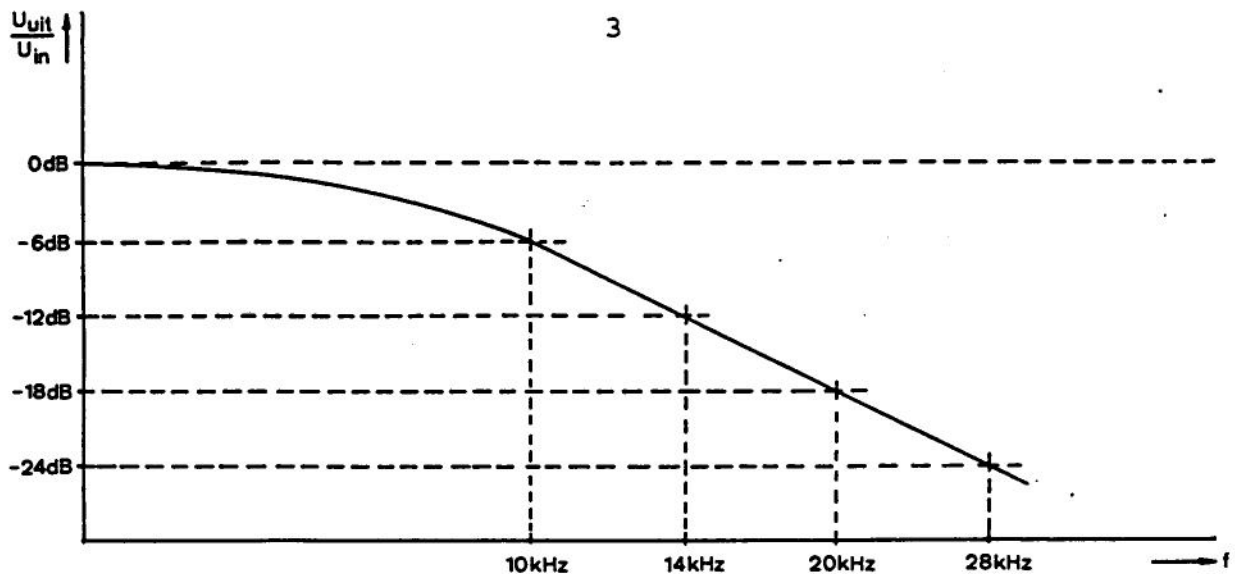
Wanneer we ons vooreerst beperken tot het laagdoorlaatfilter in digitale audiosystemen (PCM opnametechniek, CD spelers, DAT recorders), kunnen we ons afvragen, waarom dit nodig is en waarom er zulke zware eisen aan worden gesteld.

Om een wisselspanning digitaal vast te leggen, is het voor een duidelijke herkenning van de frequentiehoogte absoluut noodzakelijk om tenminste tweemaal per periode (+ en 1 fase) de juiste spanningswaarde te bepalen. Dit betekent, dat - volgens het theorema van Shannon (of Nyquist) - de bemonsteringsfrequentie dus tweemaal de hoogst weer te geven grensfrequentie moet zijn. Daar die hoogste grensfrequentie tenminste 20kHz bedraagt (bij CD), moet de bemonsteringsfrequentie dus tenminste 40kHz bedragen.

Wordt niet aan deze voorwaarde voldaan, dan treedt in het audiobereik een naar soort intermodulatievervorming op, dat Aliasing heet. Vandaar, dat het nog analoge audiosignaal voordat het op weg naar digitalisering aan de sample and hold schakeling wordt toegevoerd, een laagdoorlaatfilter moet passeren. In dat filter moet ervoor worden gezorgd, dat alle signalen met een frequentie, hoger dan de halve bemonsteringsfrequentie absoluut niet worden doorgelaten, c.q. liefst meer dan 60dB worden verzwakt om aliasing vervorming te voorkomen. In de praktijk blijkt hiervoor een heel steil "brick wall" filter nodig te zijn, dat deze grote verzwakking binnen een bandbreedte van ruim 2kHz realiseert, zonder dat de frequentiedoorgifte van de signalen lager dan de grensfrequentie ook maar enigszins worden aangetast.



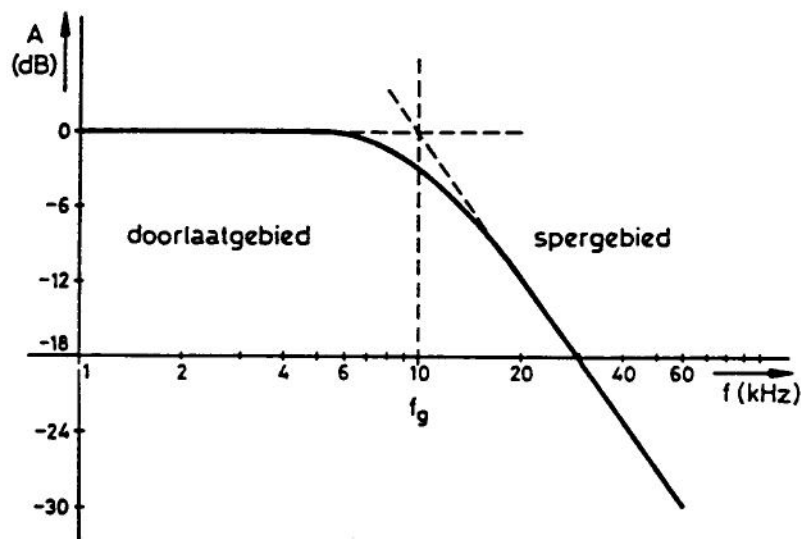
Het ideale laagdoorlaatfilter ziet er wat zijn frequentie/amplitude karakteristiek betreft uit, zoals in de linker afbeelding hierboven. Dergelijke ideale filters bestaan echter niet.



In het beste geval hebben ze een amplitudekarakteristiek zoals hierboven. Bij een constante ingangsspanning is de grensfrequentie de frequentie, waarbij aan de uitgang van het filter het vermogen is gehalveerd. De uitgangsspanning is dan $\sqrt{2}$ of 1,4 maal kleiner geworden. Dit komt neer op een verzwakking van 3dB. Duidelijk blijkt, dat de frequenties boven de grensfrequentie toch enigszins, zij het verzwakt, worden doorgelaten.

Op de gevolgen daarvan wordt nog teruggekomen.

Filter kenmerken



Frequentie/amplitude karakteristiek

De amplitude karakteristiek van een filter is een grafiek, waarin de verzwakking (versterking) van dat filter is weergegeven als functie van de frequentie. In onderstaande afbeelding is de karakteristiek van een eenvoudig laagdoorlaatfilter afgebeeld. Hierin zijn de amplitudeverhouding $A = U_{uit}/U_{in}$ en de frequentie logaritmisches op de verticale c.q. horizontale as uitgezet.

Steilheid

De steilheid van een filter geeft voor het sfergebied aan, hoeveel de verzwakking toeneemt bij frequentieverdubbeling. Omdat frequentieverdubbeling ook een octaaf wordt genoemd, geeft men de steilheid van een filter aan in ...dB/octaaf.

De steilheid wordt bepaald in het lineair verlopende deel van het sfergebied. Men moet daarvoor ver zijn verwijderd van de grensfrequentie, want rond dat punt verloopt de amplitude karakteristiek allesbehalve lineair.

De karakteristiek in de afbeelding hierboven is in het sfergebied boven 20kHz als lineair te beschouwen. De verzwakking bedraagt daar 12dB. En octaaf hoger, bij 40kHz dus, bedraagt de verzwakking 24dB. Dat is een toename van 12dB. De steilheid van dit filter bedraagt derhalve 12dB/octaaf.

Orde van het filter

De orde van een filter geeft aan, in welke mate de verzwakking van dat filter afhankelijk is van de frequentie. In zoverre bestaat dus een direct verband met de steilheid. De orde en de steilheid geven immers beide aan, hoeveel de verzwakking in het sfergebied toeneemt als functie van de frequentie.

De orde van het filter is meer een wiskundige term, die als volgt kort en populair kan worden omschreven:

Van elk filter kan het gedrag in een formule worden gevat. Voor het eerder getoonde laagdoorlaatfilter geldt:

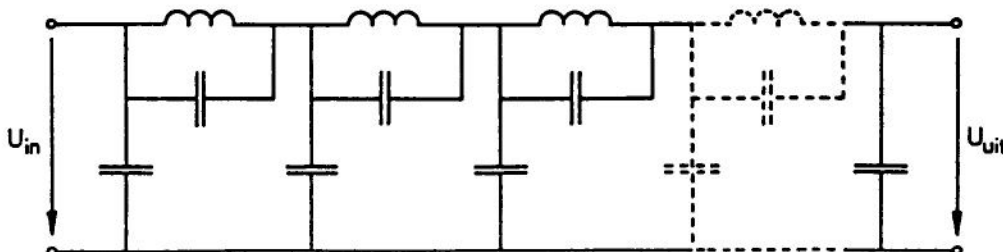
$$\frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{1}{1 - 4\pi^2 f^2 LC}$$

De orde van het filter is nu gelijk aan de hoogste macht van de frequentie, die in de formule voorkomt. Het genoemde filter is dus van de 2e orde, omdat in de noemer f^2 voorkomt.

In de praktijk geeft de orde van een filter aan, hoeveel maal 6dB/octaaf de steilheid bedraagt. Een filter van de 3e orde heeft dus een steilheid van $3 \times 6\text{dB/octaaf} = 18\text{dB/octaaf}$.

Bovendien is de orde van een filter gelijk aan het aantal condensatoren en spoelen, waaruit het tenminste bestaat. Een filter van de 10e orde bevat dus tenminste 10 condensatoren en spoelen en heeft een steilheid van 60dB/octaaf.

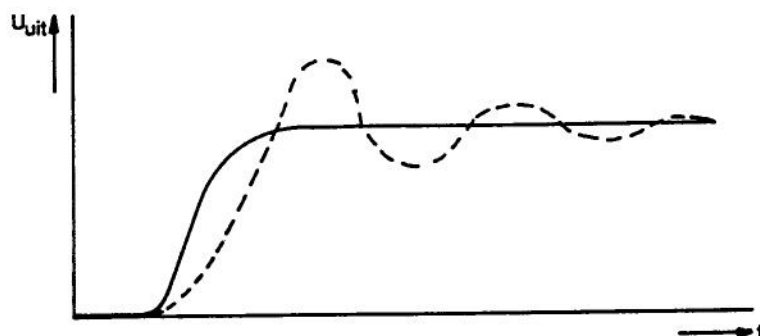
Voor A/D omzetters zijn passieve filters van de 7e, 9e of 13e orde gangbaar. Deze bestaan in principe uit spoelen in de lengterichting en condensatoren in de dwarsrichting, alles in cascade opbouw, zoals onderstaande afbeelding illustreert.



Met zes spoelen en zeven condensatoren kan zo een 13e orde filter worden gerealiseerd met een steilheid van $13 \times 6 \text{ dB/octaaf} = 78 \text{ dB/octaaf}$. Dat is als "brick wall" filter nog altijd niet de gewenste steilheid van ruim 250 dB/octaaf . Om die te bereiken, worden in de lengterichting condensatoren parallel aan de spoelen geschakeld. Er ontstaan dan LC kringen. De resonantiefrequenties liggen vervelend genoeg in het sfergebied vlakbij de grensfrequentie.

Bij elke resonantie neemt niet alleen de verzwakking sterk toe, maar ook de nare bijverschijnselen (opslingering, rimpels, fasefouten) nemen sterk toe. Wel is het mogelijk om met een 13e orde filter het frequentiegebied vlak boven de grensfrequentie met een steilheid van ruim 500 dB/octaaf af te kappen.

Sprongresponsie of stapresponsie (impulsgedrag)



De sprongresponsie van een filter geeft grafisch weer, hoe het uitgangssignaal verloopt bij een stapvormige verandering van het ingangssignaal.

In het ideale geval moet de gestippelde blok vorm worden bereikt. Hoezeer dat mislukt, blijkt uit de beide ingetekende sprongresponsies bij het betreffende 4e orde filter. Ze gelden voor verschillende filtertypes, die verderop worden beschreven.

Fasekarakteristiek

De fasekarakteristiek is bij filters een grafiek, waarin de faseverschuiving tussen in- en uitgangssignaal van dat filter als functie van de frequentie is weergegeven.

Uit een dergelijke karakteristiek blijkt, in welke mate fasevervorming (groepslooptijden en hun verschillen) optreedt. De fasevervorming is gelukkig ook enigszins af te lezen uit de sprongresponsie. Een gave sprongresponsie wijst op een goede fasekarakteristiek, dus op geringe fasevervorming.

De bekende blok golfbeelden, die met CD test- en meetplaten bij diverse frequenties kunnen worden opgeroepen, illustreren fraai de filterwerking achter de D/A omzetter, waar immers ook