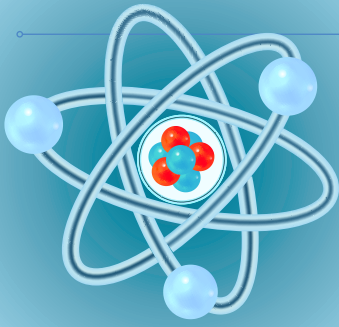


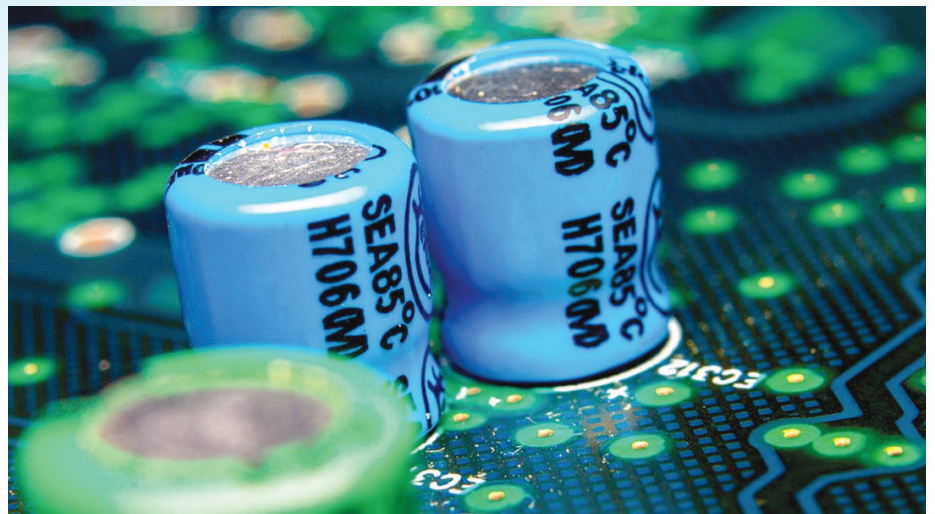


Alle begin...

...sluit het onderwerp "condensatoren" hiermee af

Eric Bogers

In de laatste aflevering [1] hebben we gezien dat condensatoren gelijkstroom blokkeren maar wisselstroom doorlaten. Maar dat is lang niet alles – spanning en stroom raken uit fase, en dat kan berekeningen een beetje lastiger maken. Maar dat is nog geen reden om bang te worden!



Fasehoek

Fase? Wat is dat? Om dat te verduidelijken, keren we kort terug naar onze nederige weerstand. Wanneer we een spanning over de weerstand zetten, gaat er meteen een stroom lopen. Spanning en stroom zijn hier *in fase*: op het moment dat de spanning toeneemt, neemt ook de stroom toe en omgekeerd. Bij een condensator echter is dat anders, en dat kunnen we op de volgende manier aanschouwelijk maken. Op het moment dat we een spanning over een ongeladen condensator zetten, gedraagt deze zich als een kortsluiting: er loopt een maximale laadstroom, maar de spanning over de condensator is nul (zoals het een goede kortsluiting betaamt). Naarmate de condensator geladen wordt, neemt de spanning erover toe terwijl de stroom afneemt; Uiteindelijk is de condensator geladen, de spanning erover is maximaal terwijl de stroom dan nul is. We kunnen zodoende zeggen: eerst komt de stroom, en dan pas komt de spanning. In

vakjargon: de stroom *ijlt voor* op de spanning. Bij een zuiver sinusvormige spanning over de condensator bestaat er een *faseverschil* van exact 90° tussen spanning en stroom.

Als we een wisselspanning over een condensator aanleggen, loopt er een wisselstroom door de condensator – dat hebben we de vorige keer al gezien. En dat betekent dat we ook een (wisselstroom-)weerstand van die condensator kunnen berekenen. Alleen wordt die geen weerstand genoemd, maar *impedantie*, waarvoor het symbool X wordt gebruikt. De eenheid van impedantie is weer de ohm. Er geldt (zonder dat we u met de afleiding lastigvallen):

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

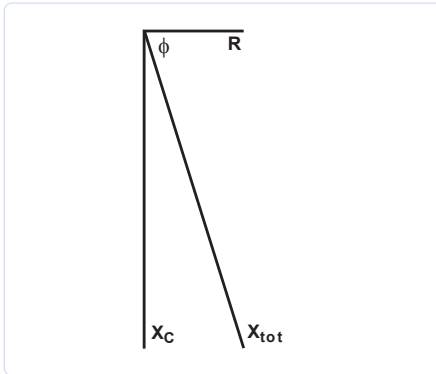
Hoe groter ('dikker') de condensator is, des te meer lading hij kan opnemen en des te meer stroom er vloeit bij het laden van die condensator – en des te kleiner is zijn impedantie.

Ook geldt: hoe hoger de frequentie, des te vaker (per tijdseenheid) de condensator wordt omgeladen, des te meer stroom er loopt en weer: des te kleiner zijn impedantie.

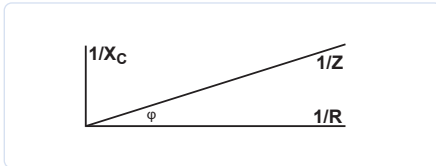
Wat u in elk geval moet onthouden: de impedantie van een condensator is geen vaste grootheid, maar is afhankelijk van de frequentie.

Nu kunt u natuurlijk uw schouders ophalen en denken: "Oké, da's heel leuk met dat faseverschil, maar daar lig ik verder niet van wakker." Was het maar zo simpel... In de elektronica-praktijk komen condensatoren en weerstanden zelden 'alleen' voor; vaker wel dan niet hebben we met een serie- of parallelschakeling van verschillende componenten te maken. En dat faseverschil is er de schuld van dat we bijvoorbeeld bij een serieschakeling van een condensator en een weerstand de impedantie en weerstand niet gewoon bij elkaar mogen optellen; dat moet *vectorieel* gebeuren.

We zullen dit demonstreren aan de hand van een serieschakeling van een condensator van



Figuur 1. Serieschakeling van een weerstand en een condensator.



Figuur 2. Parallelschakeling van een weerstand en een condensator.

0,1 μF en een weerstand van 10 k Ω . We willen de totale impedantie weten bij een frequentie van 50 Hz.

We berekenen eerst de impedantie van de condensator:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,1 \mu\text{F}} = 31,830 \text{ k}\Omega$$

Voor de totale impedantie van de serieschakeling geldt dan:

$$X_{\text{tot}} = \sqrt{X_c^2 + R^2} = \sqrt{(31,830 \text{ k}\Omega)^2 + (10 \text{ k}\Omega)^2} = 33,364 \text{ k}\Omega$$

De zo berekende totale impedantie wordt vaak met de letter Z aangeduid (in plaats van met X_{tot}).

De impedantie Z heeft ook een bepaalde fasehoek (die logischerwijze tussen de -90° van de condensator en de 0° van de weerstand moet liggen). Hiervoor geldt:

$$\tan \varphi = \frac{X_c}{R}$$

Voor de fasehoek geldt dan (sorry, daarvoor hebt u waarschijnlijk een 'wetenschappelijke' zakrekenmachine nodig):

$$\varphi = \arctan \frac{X_c}{R} = \arctan \frac{31,830 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = -72,56^\circ$$

Bij serieschakeling vloeit door alle betrokken componenten dezelfde stroom; bij de condensator ijlt de spanning echter na op de stroom, en daarom is de fasehoek negatief. Dit probleem kan desgewenst ook grafisch worden opgelost (**figuur 1**). Omdat de draairichting (in wiskundige zin) tegen de wijzers van de klok is, moet de negatieve fasehoek naar beneden gericht getekend worden. Natuurlijk kunnen een weerstand en een condensator ook parallel worden geschakeld; dan geldt voor de totale impedantie Z (we gebruiken dezelfde onderdelen bij dezelfde frequentie als bij de serieschakeling):

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{X_c^2} + \frac{1}{R^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(31,830 \text{ k}\Omega)^2} + \frac{1}{(10 \text{ k}\Omega)^2}}} = 9,54 \text{ k}\Omega$$

Voor de fasehoek geldt in dit geval:

$$\varphi = \arctan \frac{R}{X_c} = \arctan \frac{10 \text{ k}\Omega}{31,830 \text{ k}\Omega} = 17,44^\circ$$

Ook nu is een grafische oplossing mogelijk, zie **figuur 2**. Bij parallelschakeling staat over alle betrokken componenten dezelfde spanning. De stroom door de condensator ijlt echter voor op de spanning, zodat in dit geval de fasehoek positief is en naar boven gericht wordt getekend.

Een laatste opmerking: het verschil tussen de fasehoek bij serieschakeling en die bij parallelschakeling (van dezelfde onderdelen) bedraagt precies 90° .

Hoog- en laagdoorlaatfilters

In Elektor september/oktober 2020, november/december 2020 en januari/februari 2021 zijn we zeer uitgebreid op (het ontwerpen van) filterschakelingen ingegaan. Voor beginnende elektronica-hobbyisten waren die drie artikelen echter waarschijnlijk een beetje veel van het goede... Niettemin zijn filterschakelingen in de elektronica van eminent belang. Daarom

stippen we ze hier in het kort aan, zonder al te veel theorie.

Uit de formule voor de impedantie van een condensator volgt dat deze bij een frequentie van 0 Hz (dus bij een gelijkspanning) naar oneindig gaat, en bij toenemende frequentie steeds kleiner wordt. Daarom kan een condensator worden gebruikt om uit een 'mengsel' van gelijk- en wisselspanning het gelijkspanningsaandeel te verwijderen (tegen te houden).

We hebben zo'n schakeling bijvoorbeeld nodig in de ingangstrap van een microfoon-versterker: de wisselspanning (het elektrische equivalent van het akoestische signaal) die door de microfoon wordt geleverd, is gesuperponeerd op de gelijkspanning waarmee de microfoon wordt gevoed (we spreken over fantoomvoeding; het voordeel is dat er dan geen separate kabels voor signaal en voeding nodig zijn). Die voedingsspanning willen we uiteraard niet versterken, alleen de signaalspanning.

Om deze gelijkspanning te verwijderen gebruiken we een hoogdoorlaatfilter (**figuur 3**), dat zo heet omdat het hoge(re) frequenties doorlaat en lage frequenties blokkeert.

In **figuur 4** zien we de frequentie- en fasekarakteristiek van een hoogdoorlaatfilter; het meetsysteem dat voor het maken van deze grafieken is gebruikt, is aan de uiteinden van het frequentiebereik helaas niet bijzonder nauwkeurig. Niettemin kunnen we duidelijk drie bereiken onderscheiden:

- > het doorlaatbereik begint (in deze grafiek) bij ongeveer 1 kHz. In dit bereik wordt het signaal vrijwel ongehinderd doorgelaten, en ook treedt hier nauwelijks faseverschuiving op;
- > het stop- of sperbereik ligt beneden ongeveer 100 Hz. Hier wordt het signaal met afnemende frequentie steeds sterker verzwakt – om precies te zijn met 6 dB per octaaf of 20 dB per decade; de fase nadert hier asymptotisch tot 90° ;
- > tussen deze beide bereiken ligt de kantel- of afsnijfrequentie. Deze is gedefinieerd als de frequentie waarbij het signaalniveau ten opzichte van het doorlaatbereik met 3 dB is afgenomen. Bij de kantelfrequentie is de capacatieve impedantie gelijk aan de weerstand, zodat we mogen schrijven:

$$f_{\text{kantel}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Het gedrag van een eenvoudig filter als dit kan bij het kantelpunt niet nader worden gespecificeerd; daarvoor zijn 'meertraps' filters ('hogere-orde filters') nodig. Deze materie is in de al genoemde artikelreeks in Elektor [2] uitgebreid aan de orde gekomen.

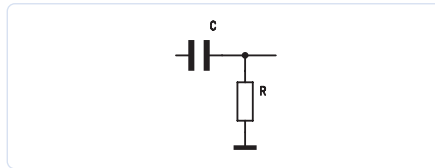
Waar hoogdoorlaatfilters bestaan, bestaan ook laagdoorlaatfilters. Die zien er hetzelfde uit, alleen zijn weerstand en condensator van plaats verwisseld – zie **figuur 5**. Hoe hoger de frequentie, des te meer het signaal door de condensator naar massa wordt kortgesloten. Dit soort filters wordt (onder andere) gebruikt om hoogfrequente storing uit een signaal weg te filteren.

In **figuur 6** ziet u de frequentie- en fasekarakteristiek van een laagdoorlaatfilter (in dit specifieke geval zijn andere onderdelenwaarden gebruikt als in het voorbeeld van figuur 4). Ook hier onderscheiden we weer drie bereiken: het doorlaatbereik onder de kantelfrequentie, het stop- of sperbereik boven de kantelfrequentie, en de kantelfrequentie zelf, waar de capacatieve impedantie gelijk is aan de weerstand.

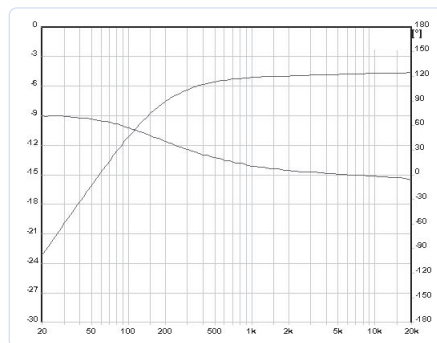
Hiermee sluiten we onze bespreking van condensatoren af; volgende keer gaan we verder met spoelen – onderdelen die (ten onrechte) door veel elektronici worden verafschuwd... 

210183-02

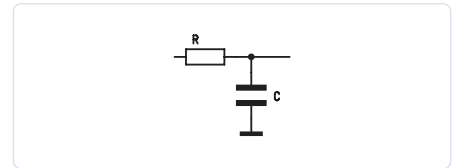
De artikelreeks "Alle begin..." is gebaseerd op het boek "Basiscursus elektronica" van Michael Ebner, dat bij Elektor is verschenen.



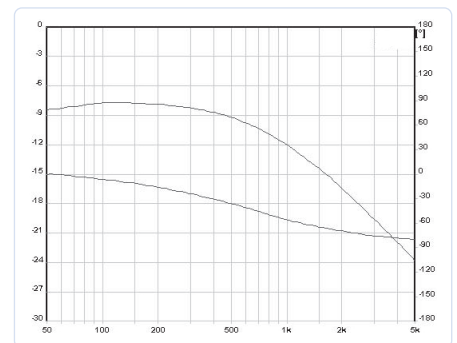
Figuur 3. Hoogdoorlaatfilter.



Figuur 4. Frequentie- en fasekarakteristiek van een hoogdoorlaatfilter.



Figuur 5. Laagdoorlaatfilter.



Figuur 6. Frequentie- en fasekarakteristiek van een laagdoorlaatfilter.



Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur of naar de redactie van Elektor, via redactie@elektor.com.

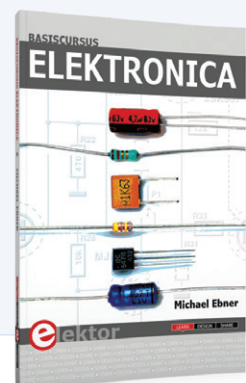
Een bijdrage van

Idee en illustraties: **Michael Ebner**
Tekst en redactie: **Eric Bogers**
Layout: **Giel Dols**



GERELATEERDE PRODUCTEN

- > **Boek: Basiscursus elektronica**
www.elektor.nl/13950
- > **E-boek: Basiscursus elektronica**
www.elektor.nl/18232



WEBLINKS

- [1] **Eric Bogers, "Alle begin..."**, Elektor mei/juni 2021: www.elektormagazine.nl/200680-02
- [2] **Alfred Rosenkränzer, "Analoge filters ontwerpen"**, drie afleveringen vanaf Elektor september/oktober 2020: www.elektormagazine.nl/200318-01