

De condensator

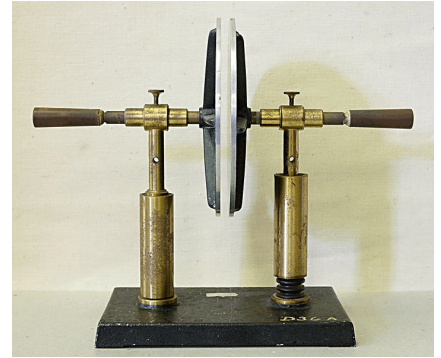
nodige voorkennis: wet van Coulomb, wet van Ohm

Gedachtenproef:

Zet twee metalen platen op korte afstand van mekaar en sluit de polen van een batterij elk op een plaat aan. Wat zal er gebeuren?

De batterij, die men zich kan voorstellen als een elektronen-pomp, zal elektronen naar één plaat sturen, die daardoor negatief geladen wordt. De elektronen moeten ergens vandaan komen, en de grootste voorraad is te vinden in de andere plaat. Door deze "leegroef" wordt die dan positief geladen. De elektronen in de andere plaat worden nu nog meer aangetrokken door de nabije positieve plaat, en het lijkt erop dat dit een vicieuze cirkel wordt, en dat dus alle elektronen op die ene plaat zullen komen te zitten, ware het niet dat de elektronen mekaar onderling meer en meer zullen afstoten. Er zal dus een evenwicht ontstaan, met name als het potentiaalverschil tussen de platen even groot geworden is als de batterijspanning.

Stel nu dat we de verbindingen met de batterij verbreken. Wat zal er met de lading gebeuren? Als we een lading op één plaat hadden gezet, zou deze al vlug via (vooral de watermolekulen in) de lucht verspreid geraken en dus van de plaat verdwijnen. Nu echter, is er iets dat de ladingen tegenhoudt: de tegengestelde lading op de andere plaat! We hebben dus eigenlijk een effectieve "val" voor ladingen gemaakt! De ladingen blijven als het ware "gekondenseerd" in deze opstelling; en we noemen zoiets dus een "condensator".



Symbol: 

Hoeveel lading per plaat (Q) kan er in een condensator?

Hoe meer spanning (U) we over de condensator zetten, hoe sterker het aanzuigend effect. Hoe groter de oppervlakte (A) van de platen, hoe meer plaats er is voor vrije elektronen; en hoe kleiner de afstand (d) tussen de platen, hoe sterker het elektrisch veld ertussen, dus ook de aantrekking.

We kunnen dus veronderstellen dat

$$Q \propto U, \quad Q \propto A, \quad Q \propto 1/d$$

Dit kan inderdaad experimenteel vastgesteld worden, en met behulp van integraalrekening kan bewezen worden dat de evenredigheidscoëfficiënt de permittiviteit (ϵ) van de stof tussen de platen is (dezelfde ϵ als die in de wet van Coulomb):

$$Q = \epsilon \frac{A}{d} \cdot U$$

Het eerste deel ($\epsilon A/d$) is enkel afhankelijk van de konstruktie van de condensator, en wordt aldus de "kapaciteit" (C) van de condensator genoemd.

We kunnen dus ook schrijven:

$$Q = CU, \quad C = \epsilon \frac{A}{d}$$

De eenheid van capaciteit (coulomb per volt) krijgt een aparte naam: de "farad" (F), genoemd naar Michael Faraday (1791-1867).

$$1 F := 1 \frac{C}{V}$$

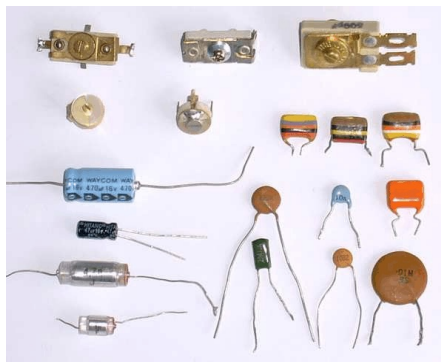
Hoe groot moet een condensator van 1 farad zijn als de afstand tussen platen 1mm is, en er gewoon lucht tussen is?

Voor lucht geldt: $\epsilon = 1.00056\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$

Dus:

$$A = \frac{Cd}{\epsilon} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 112994350 \text{m}^2 \approx 113 \text{km}^2$$

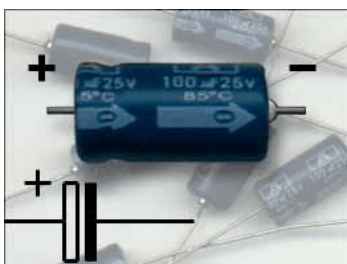
Eén farad is dus een gigantische capaciteit. De meeste condensators die in elektronische toestellen gebruikt worden, hebben dan ook capaciteiten in de grootte-orde van nano- en picofarads. Gelukkig bestaan er stoffen met een permittiviteit die veel groter is dan die van lucht (bv. strontiumtitaanaat: $\epsilon \approx 300\epsilon_0$), en kunnen de platen ook zeer dicht tegen mekaar opgerold worden (aluminiumfolie i.p.v. stijve platen), zodanig dat men sinds kort toch iets van de orde van een farad in een kubieke centimeter kan proppen! Opgelet, d kan niet willekeurig verkleind worden, want op de duur zouden de ladingen kunnen overspringen.



Verschillende modellen van praktisch gebruikte condensators

Proef 1:

Laat een grote condensator (bv. 10mF) enkele seconden opladen aan een batterij van bv. 4,5V.



Opgelet: dergelijke grote ("elektrolytische") condensators hebben door hun asymmetrisch ontwerp een polariteit. Let op dat u de positieve kant van de condensator aan de + van de batterij koppelt; zoniet kan hij ontploffen! (Vooral met zgn. tantaliumcondensators moet men opletten!)

Koppel dan de batterij los, en maak met een draad eventjes een kortsluiting tussen de twee aansluitingen van de condensator (voorzichtig, kom niet te dicht bij de contactplaats). U zal zien dat er even vonken overspringen. (Doe dit best in het halfduister voor de beste zichtbaarheid.) De vonken tonen aan dat een condensator blijkbaar op zeer korte tijd veel lading kan afgeven, of dus gedurende korte tijd een grote stroom kan leveren.

(Met nog grotere condensators en grotere spanningen is het niet aan te raden om dit te doen, want de stromen kunnen dan gevaarlijk hoog worden en tevens de condensator om zeep helpen.)

Toepassingen hiervan vinden we bv. in een flitslamp, de ontsteking van een benzinemotor, en een defibrillator (om iemands hart weer in gang te krijgen).

Proef 2:

Laad de condensator weer op; ontkoppel hem van de batterij, en koppel hem nu aan een klein lampje. Het lampje een tijdje branden en langzaam zwakker en zwakker schijnen tot de elektrische energie volledig in lichtenergie omgezet is.



Toepassingen: deze schakeling kan men natuurlijk rechtstreeks toepassen in de kinderkamer, voor kindjes die bang zijn in het donker en milieubewuste ouders die het licht niet de ganse nacht willen laten branden. Nu, een condensator wordt eigenlijk in praktisch elk elektronisch toestel parallel op de spanningsbron aangesloten om tijdens spanningsdalingen (bv. tengevolge van zware belastingen of storingen aan de bron) tijdelijk extra stroom te kunnen geven, of gegevens te kunnen veiligstellen (bv. slaapstand pc). Ook het opslaan van (niet te grote hoeveelheden) zonne-energie is natuurlijk mogelijk met condensators.

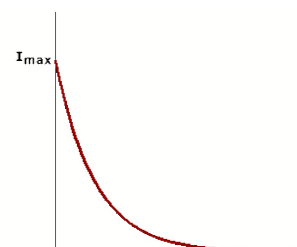
Oefening: bereken hoeveel lading er zit in een oplaadbaar AA-batterijtje (1.2V) waarop geschreven staat "2700mAh", en vergelijk deze met de lading die men met dezelfde spanning in een condensator met ongeveer hetzelfde volume (10mF) kan opslaan¹.

Het zal u hopelijk duidelijk worden waarom het voorlopig nog interessanter is om grotere hoeveelheden energie niet in condensators maar in batterijen op te slaan.

Proef 3:

Laad de condensator weer op, en meet terwijl op regelmatige tijdstippen de stroom (I).

Tracht een grafiek te maken van de stroom in functie van de tijd (t). Normaal zou u iets als de grafiek hiernaast moeten verkrijgen; een hoge stroom die snel daalt en dan altijd maar langzamer naar nul gaat.



Stroom in functie van de tijd bij opladende condensator.

Let op: de wet van Ohm toepassende, lijkt het erop dat de condensator een weerstandswaarde heeft die van zeer klein naar oneindig verandert, maar eigenlijk is die altijd oneindig. De gemeten stroom is alleen afkomstig van elektronen die

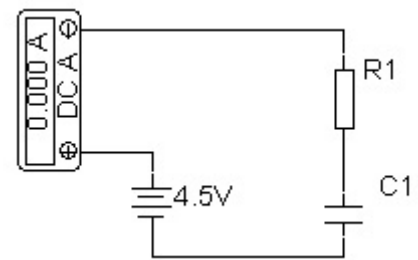
van de ene naar de andere plaat stromen via de batterij!

Proef 4:

Ontlaad de condensator (bv. met het lampje) en zet nu een weerstand (R) in serie ermee.

De stroom zal nu begrensd worden en het opladen zal dus minder snel gebeuren. Met integraalrekening kan men aantonen dat de stroom exponentieel daalt tijdens het opladen:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{met } I_0 = U_{\text{batt}}/R \text{ de beginstroom})$$

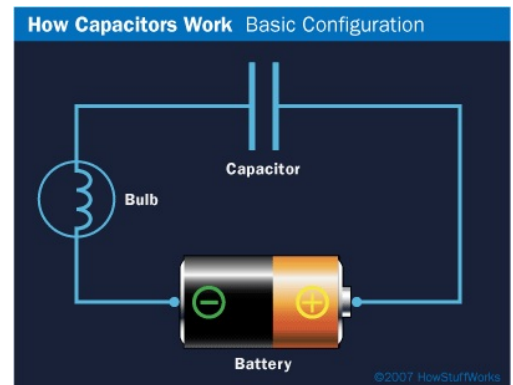


Na een tijdspanne van RC is de stroom dus gezakt tot $1/e \approx 0.368$ of 36.8% van de beginstroom.

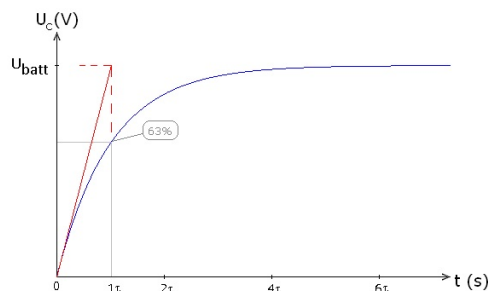
(Verifieer dat weerstand maal stroom inderdaad tijd geeft! ²)

Het opladen kan ook zichtbaar worden gemaakt met een lampje i.p.v. een ampèremeter (zie hiernaast).

Meet ook eens de spanning over de condensator terwijl hij oplaadt; dat zou dan een kromme moeten geven die eerst sterk stijgt, en dan steeds langzamer, met als horizontale asymptotische waarde de spanning van de batterij.



(electronics.howstuffworks.com/capacitor.htm)



Probeer hetzelfde met verschillende weerstands- en capaciteitswaarden, en noteer telkens de tijd nodig om de condensator 63% op te laden. Die zou moeten gelijk zijn aan $\tau = RC$ (waarom? ³).

Spanning over een opladende condensator

Toepassingen: door nu de condensator een of andere schakelaar te laten bedienen (relais, transistor, thyristor, flip-flop,...), kan men dus na een zekere tijd, bepaald door RC, een verbinding verbreken of maken, m.a.w. de tijdschakelaar is geboren. Door "terugkoppeling" (de oplaadstroom d.m.v. deze schakelaar onderbreken als de condensator voldoende opgeladen is) kan men iets periodiek laten aan en uit gaan (bv. een knipperlicht). Als de schakelaar niet alleen aan en uit kan zijn, maar zich ook in tussenstadia kan bevinden (transistor), kan men zo een oscillator (wisselspanningsgenerator) maken (gebruikt in ontelbare toepassingen van sirenes tot zenders).

Parallel- en serieschakeling

Zet men verschillende condensators C_1, C_2, C_3, \dots parallel met mekaar, dan vergroot men in feite gewoon de oppervlakte, en kan men dus de capaciteiten gewoon optellen:

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Zet men ze in serie, dan wordt de spanning verdeeld over de verschillende condensators, zoals in een parallelschakeling van weerstanden de stroom verdeeld wordt, en verkrijgt men:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Hoeveel energie kunnen we opslaan in een condensator?

Lading maal spanning is energie. Tijdens het opladen van een condensator is de spanning echter niet konstant. Het beetje arbeid ΔW om een beetje lading ΔQ in de condensator te proppen als er al een spanning U opstaat, is dus:

$$\Delta W = U \cdot \Delta Q = \frac{Q}{C} \Delta Q$$

Het wordt dus altijd maar moeilijker om er lading bij te krijgen, want de benodigde arbeid neemt lineair toe met de lading die er al op zat! Nu is de gemiddelde lading die er tijdens het ganse laadproces op zit, de helft van de eindlading. Vandaar dat de benodigde arbeid (W) om de condensator vanaf de lege toestand op te laden (en dus de energie die we erin kunnen opslaan), gelijk is aan:

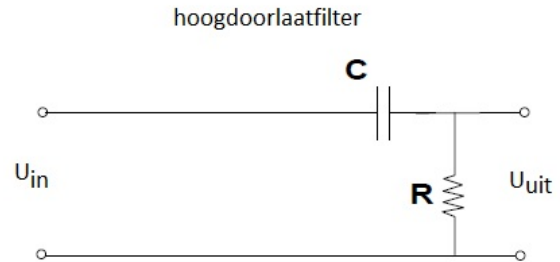
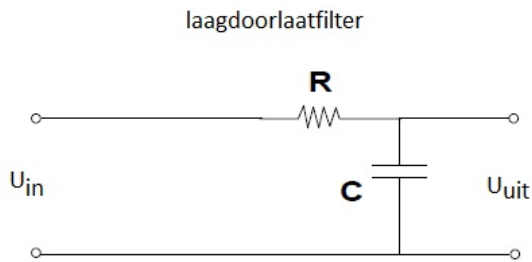
$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} UQ = \frac{1}{2} CU^2$$

(Dit kan netter bewezen worden met integraalrekening.)

Bemerk de sterke gelijkenis met de kinetische energie ($mv^2/2 =$ arbeid om een voorwerp met massa m een snelheid v te geven), en de energie die in een uitgerokken veer gestoken kan worden ($kx^2/2$, met k de veerconstante en x de uitrekking)!

Filters

De volgende schema's tonen hoe men met een weerstand en een condensator wisselspanningen met een hoge of lage frekwentie kan tegenhouden:



Bij de laagdoorlaatfilter worden snelle variaties in U_{in} gedempt en zal U_{uit} dus nooit zo snel kunnen variëren als U_{in} .

Bij de hoogdoorlaatfilter gaat het omgekeerd: als U_{in} niet of traag verandert, zal de condensator na een tijdje opgeladen zijn en zakt U_{uit} naar 0. Als U_{in} plots verandert, zal U_{uit} plots mee veranderen vermits de condensator nog geen tijd heeft gehad om te ontladen en de spanning over de condensator nog praktisch niet veranderd is. Een plotse verandering zal dus doorgegeven worden.

Een toepassing hiervan vindt men natuurlijk in de toonregeling van versterkers (minder of meer bassen of hoge tonen doorlaten). Door de weerstand veranderlijk te maken (potentiometer met draaiknop), kan men de omslagfrequentie regelen. Voor de afstemming van een radio wordt iets soortgelijks gebruikt (maar dan met een spoel en een regelbare condensator).

Het doorgeven van signalen via een celmembraan gebeurt ook ongeveer zoals bij een hoogdoorlaatfilter.

De wiskundige berekeningen die voorspellen wat deze schakelingen juist zullen doen, zijn doorspekt met integralen en komplekse getallen, en dus niet zo eenvoudig.

Google eens op: condensator, leidse fles, RC-filter, capacitor.

Prachtige simulatiesoftware vindt u op www.circuitlogix.com (gratis studenterversie); een simpele animatie van het opladen: <http://www.lon-capa.org/~mmp/kap23/RC/app.htm>.

Koen Van de moortel, 2010 02 14

PS: hebt u opmerkingen i.v.m. mijn spelling? Lees a.u.b. mijn artikel "De toestand van het Nederlands" op www.astrovdm.com/toest_nl.htm.

1. Lading in batterij: $Q = 2700 \text{ mAh} = 2.7 \text{ Ah} = 2.7 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 9720 \text{ C}$.
Lading in condensator: $Q = CU = 0.01 \text{ F} \cdot 1.2 \text{ V} = 0.012 \text{ C}$.
2. $R \cdot C = U/I \cdot Q/U = It/I = t$
3. De spanning over de condensator $U = U_{batt} - RI$.
Na een tijd RC is $U = U_{batt} - RI_0 \cdot 37\% = U_{batt} \cdot 63\%$

