Inhoudsopgave

4 Condensatoren en spoelen

4.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

In hoofdstuk 3 hebben we onder meer kennis gemaakt met weerstanden. Die zetten elektrische energie om in warmte. In dit hoofdstuk maken we kennis met twee andere veelgebruikte componenten (=onderdelen), namelijk condensatoren en spoelen. Hoewel ze onderling verschillen, hebben ze één ding gemeen. Ze slaan elektrische energie tijdelijk op en kunnen die ook weer als elektrische energie teruggeven. Waarom dat zo nuttig is, zullen we vooral in hoofdstuk 5 zien. In dit hoofdstuk gaat het er vooral om, hoe het in zijn werk gaat.

Condensatoren gebruiken een elektrisch veld om energie op te slaan, spoelen een magnetisch veld. We beginnen daarom met elektrische en magnetische velden. Daarna bekijken we het gedrag van die velden in condensatoren, respectievelijk spoelen: hoe ze uit spanningen of stromen worden opgebouwd en terug worden omgezet in stroom en spanning. Ook zullen we het hebben over het afschermen van elektrische en magnetische velden. We gaan ook in op het gedrag van condensatoren en spoelen in combinatie met weerstanden. Je maakt net als bij weerstanden kennis met parallel- en serieschakeling van condensatoren en spoelen. We beperken ons in dit hoofdstuk tot situaties met soms veranderende gelijkstroom en –spanning. Wisselstroom en -spanning in combinatie met weerstanden, condensatoren en spoelen komen in hoofdstuk 5 aan de orde.

4.2 Elektrische en magnetische velden

4.2.1 Elektrische velden

In hoofdstuk 3 zagen we dat elektrische stroom verplaatsing van elektronen is. Elektronen zijn negatief geladen en bewegen zich rond een atoomkern. In de atoomkern zitten protonen. Die hebben een positieve lading. 1 elektron compenseert 1 proton. Een atoom heeft evenveel elektronen als protonen. Daarmee is de netto elektrische lading van een atoom 0.

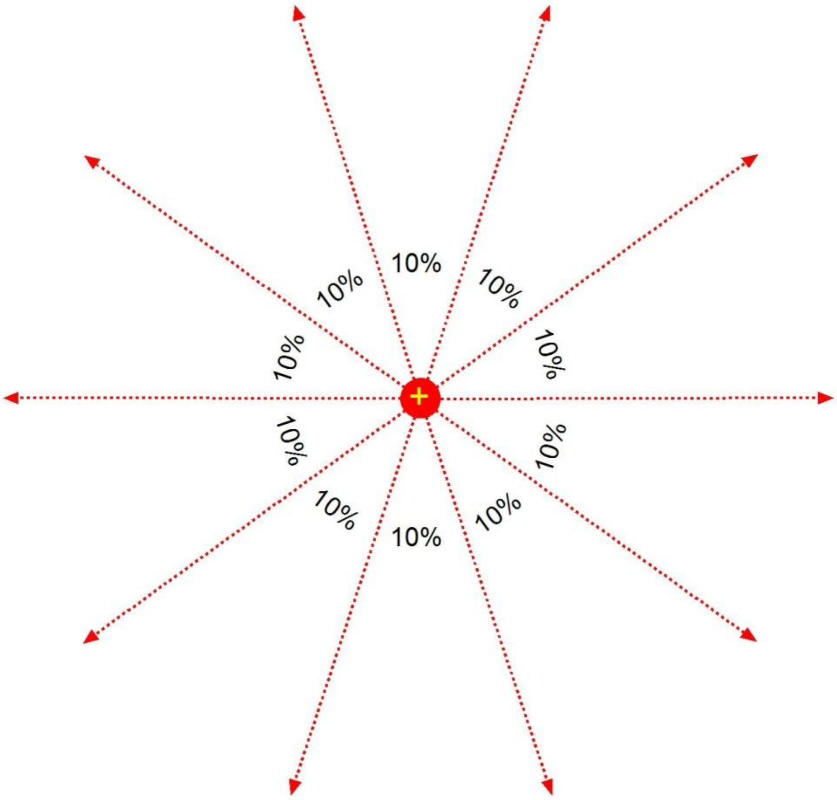
Positieve en negatieve lading trekken elkaar aan. Door zijn draaisnelheid blijft het negatieve elektron op afstand van de positieve kern. Dat lijkt een beetje op de maan die om de aarde draait of op de aarde die om de zon draait.

De eenheid van lading, symbool Q, is de coulomb, afgekort C. Die kwamen we in hoofdstuk 2 al tegen. 1 C is de lading van $6{,}24 \cdot 10^{18}$ protonen. -1 C is de lading van $6{,}24 \cdot 10^{18}$ elektronen.

Als ergens een positieve lading is, is er een tekort aan elektronen. Wiskundig gezien is dat hetzelfde als een overschot aan positieve lading. Er zijn dan meer protonen dan elektronen. Is de lading negatief, dan zijn er meer elektronen dan protonen.

Het krachtenveld tussen elkaar aantrekkende of afstotende elektrische ladingen noemen we een *elektrisch veld.* Worden de ladingen verbonden door een weerstand, dan ontstaat stroom. Het ladingsverschil verdwijnt daardoor. Het elektrische veld ook. Door de stroom is de weerstand warmer geworden. Het elektrische veld is omgezet in warmte-energie. Dat betekent dat een elektrisch veld een vorm van energie is.

Een elektrisch veld heeft *veldlijnen.* De mens heeft bedacht, ze van een positieve naar een negatieve lading te laten lopen. Als er geen tegengestelde lading is, lopen ze van de aanwezige lading naar oneindig. Zie de pijlpunten in Figuur 4.2-1. Een veldlijn kun je zien als de route die een andere lading, bijvoorbeeld een elektron, in het veld zou volgen als die zich vrij zou kunnen bewegen. Eigenlijk is een veldlijn dus een stroomlijn, maar die naam is nooit ingeburgerd. Het aantal veldlijnen in een elektrisch veld is oneindig.



Figuur 4.2-1. Puntlading met tien getekende veldlijnen. Tussen twee opeenvolgende veldlijnen ligt steeds 10% van het totale veld van de puntlading. De pijlpunten geven aan dat de veldlijnen oneindig ver doorlopen.

Tussen de tien getekende veldlijnen in Figuur 4.2-1 ligt steeds 10% van het totale veld. In werkelijkheid ligt een elektrisch veld niet in een plat vlak, maar in een driedimensionale ruimte. Figuur 4.2-1 is een tweedimensionale vereenvoudiging.

Een tegengesteld veld van Figuur 4.2-1 zou een minteken in het midden en omgekeerde veldlijnen (pijlen) hebben. Het gezamenlijke veld van twee ladingen is de optelling van beide velden.

Het veld van een lading wordt zwakker met toenemende afstand tot de lading. Vergelijk het met een lamp. Hoe groter de afstand tot de lamp, des te minder licht die lijkt te geven. Om precies te zijn: de lichtsterkte neemt af met het kwadraat van de afstand tot de lamp. Een twee keer zo grote afstand betekent een vier keer zo kleine lichtsterkte.

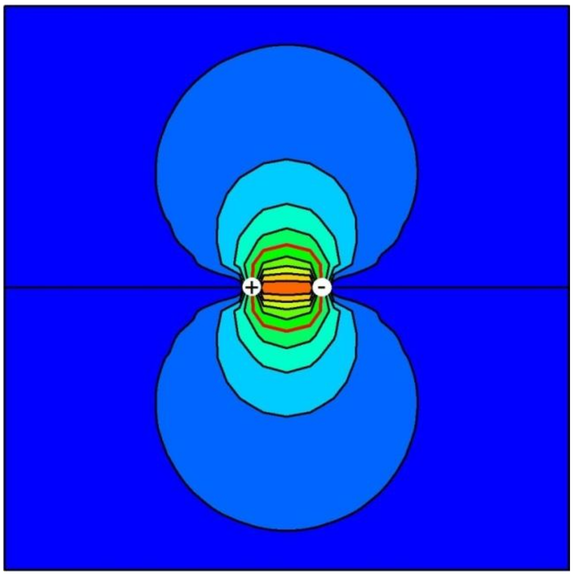
Zo gaat het ook met de sterkte van het elektrische veld van de puntlading in Figuur 4.2-1. De eenheid van elektrische veldsterkte met symbool $\vec{E}$ is Vm^{-1}, uitgesproken als "*volt per meter*". Voor een heel klein stukje afstand d in de richting van het veld geldt

$$\vec{E} = \frac{U}{d} \qquad (4.2\text{-}1)$$

Iedere plek van het veld heeft zijn eigen $\vec{E}$. De pijl op de $\vec{E}$ betekent dat het gaat om een grootheid met een richting. In de natuurkunde heet dat een *vectorgrootheid*. In de praktijk van de zendamateur 'vergeten' we meestal de pijl. Dan schrijven we E in plaats van $\vec{E}$. De veldsterkte is evenredig met de kracht die een elektrisch veld op een elektrische lading uitoefent. Dus: veldsterkte 2x zo groot, kracht 2x zo groot.

De meesten onder ons zijn gewend, spanning U te zien als een grootheid die verband houdt met spanning over geleidende weerstanden. Dan voelt het misschien wat onwennig, je een spanning voor te stellen in een niet-geleidende ruimte. We spreken daarbij niet over *spanning*, maar over *potentiaal.* Potentiaal is energie per lading. Spanning en potentiaal zijn natuurkundig gezien dezelfde grootheden. Spanning is het verschil tussen twee potentialen, in dit geval het potentiaalverschil over het afstandje d.

Het gezamenlijke veld van twee ladingen is anders van vorm dan dat in Figuur 4.2-1. Deze vorm is bij benadering per computer te berekenen (Figuur 4.2-2).

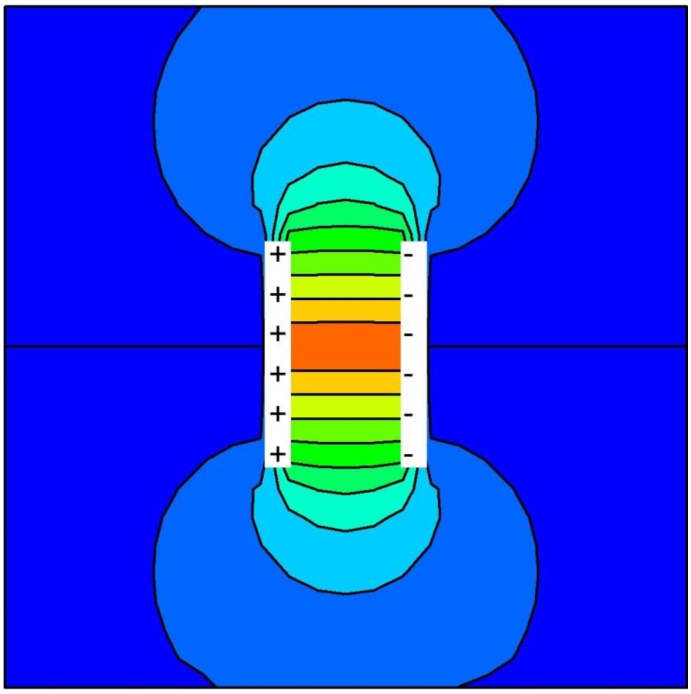


Figuur 4.2-2. Elektrisch veld van twee tegengestelde puntladingen, aangegeven door de witte cirkeltjes. Gebieden van dezelfde kleur boven en onder het midden bevatten samen 10% van de energie van het totale veld. 50% van het veld ligt binnen de rode lijn. De andere 50% ligt er dus buiten.

De figuur toont een tweedimensionale doorsnede van het veld tussen twee tegengestelde puntladingen. Het plaatje heeft geen mooie vloeiende lijnen omdat het berekend is voor een raster van maar 900 punten. Dat is genoeg om de vorm te laten zien, maar onvoldoende voor mooie vloeiende lijnen. Strikt genomen ontstaan die pas als het aantal rasterpunten oneindig is.

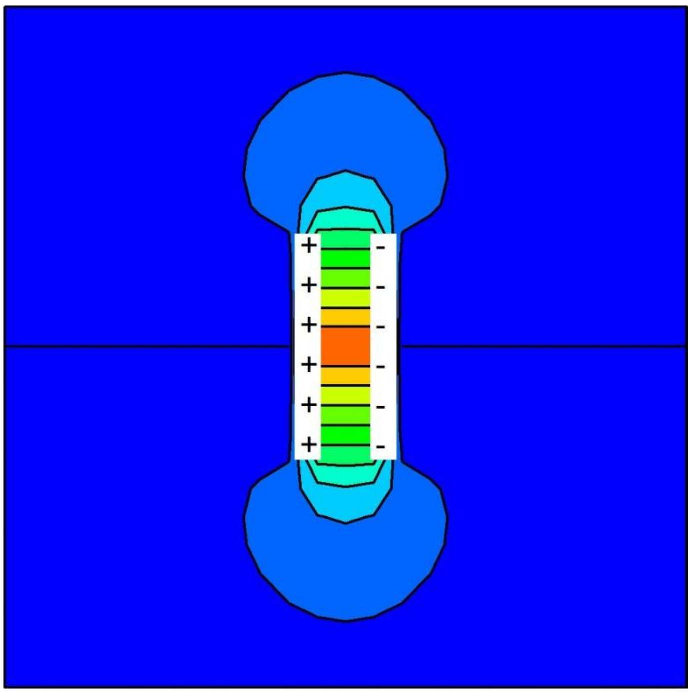
Net als in Figuur 4.2-1 zit tussen twee opeenvolgende veldlijnen 10% van het totale veld. Verwisselen van + en – leidt tot omkering van de richting van de veldsterkte, maar de vorm van het veld blijft dezelfde. Vlak bij de ladingen zit de meeste energie, veraf veel minder. In het kleine oranje stukje in het midden zit net zo veel als in het grote donkerblauwe gebied dat zich oneindig ver buiten de figuur uitstrekt.

Vervangen we de puntladingen in Figuur 4.2-2 door twee evenwijdige platen, dan ontstaat Figuur 4.2-3. Voor de berekening is hetzelfde raster gebruikt. Op doorsnede horen de platen eruit te zien als lijnen; door de grove benadering in de berekening zijn het rechthoeken.



Figuur 4.2-3. Dwarsdoorsnede door een elektrisch veld tussen twee platen (wit getekend) met tegengestelde lading. Door de grove benadering zien de platen er op doorsnee uit als rechthoeken. Gebieden van dezelfde kleur bevatten elk 10% van de energie van het totale veld.

Dit is de opbouw van een condensator, waarover in 4.3 meer. We zien nu rechte veldlijnen tussen de platen, maar ongeveer de helft van het veld valt in meerdere of mindere mate buiten de platen. Als we de platen dichter bij elkaar brengen, ontstaat Figuur 4.2-4.



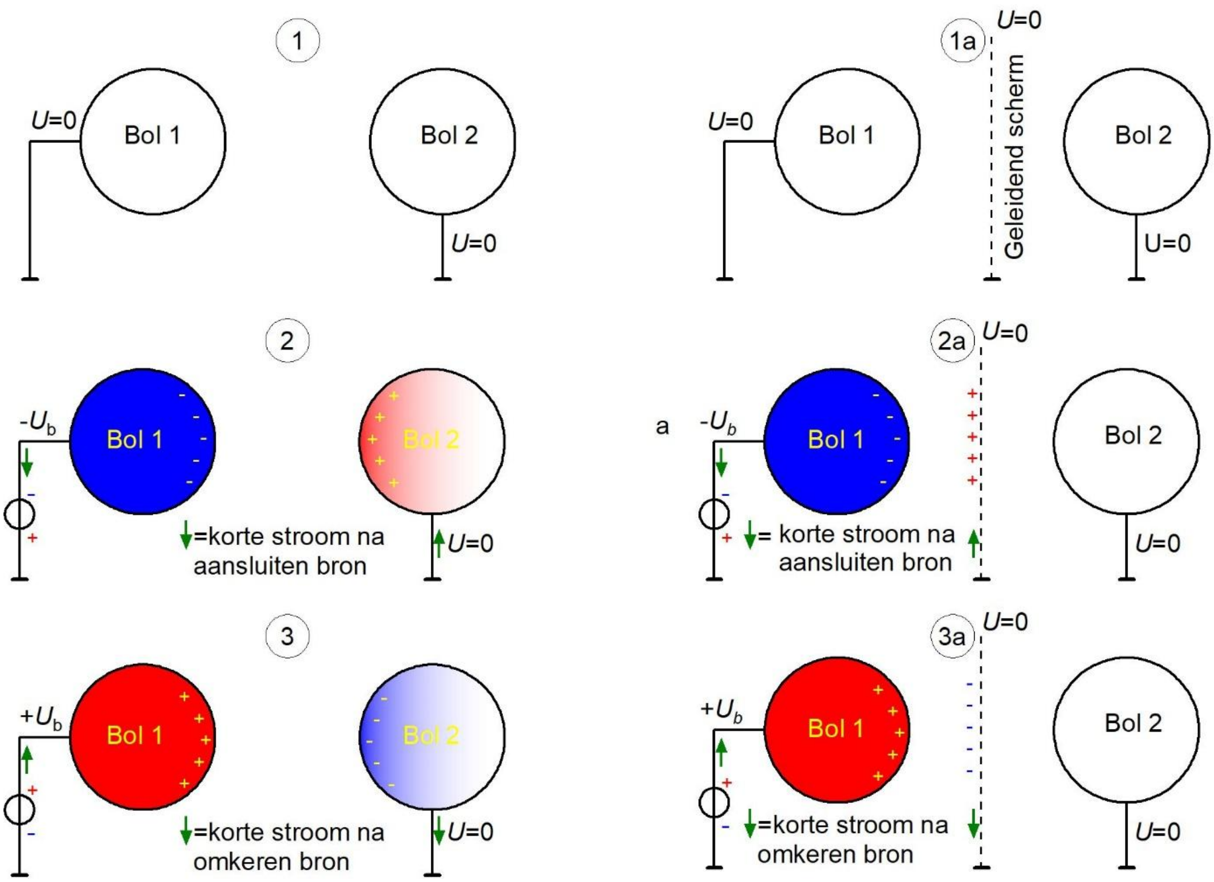
Figuur 4.2-4. Dwarsdoorsnede door een elektrisch veld tussen twee platen met tegengestelde lading, maar dichter bij elkaar dan in Figuur 4.2-3. Door de grove benadering zien de platen er ook hier op doorsnee uit als rechthoeken. Tussen twee opeenvolgende getekende veldlijnen ligt steeds 10% van het totale veld.

De uitstulping van het elektrisch veld buiten de platen in Figuur 4.2-4 is kleiner dan in Figuur 4.2-3. Naarmate de platen van een condensator dichter bij elkaar komen, wordt het veld dus naar binnen getrokken. Dit gedrag is het omgekeerde van dat van een dubbele boterham met jam ertussen of van een tompouce. Als je die samendrukt, bijvoorbeeld door erin te bijten, komt de inhoud naar buiten. Bij twee elektrisch geladen platen gebeurt het omgekeerde! De verklaring is, dat de platen elkaars velden sterker beïnvloeden, naarmate hun onderlinge afstand kleiner wordt. Ze trekken elkaars veld steeds sterker naar zich toe, waardoor een steeds kleiner deel ervan buiten de ruimte tussen de platen komt te liggen.

Je kunt deze eigenschap van een elektrisch veld ook gebruiken om velden af te schermen. In radioschakelingen gebeurt dat veel. Afscherming voorkomt dat delen van een schakeling elkaar beïnvloeden. Zet tussen die delen een geleidend plaatje dat verbonden is met een vaste spanning. Dan trekt die het veld naar zich toe en de verschillende delen ‘zien’ elkaar minder goed of helemaal niet meer. Als ‘minder goed’ niet goed genoeg is, kan een (deel van een) schakeling ook in zijn geheel worden *ingeblikt*, zoals elektronici dat wel noemen.

Figuur 4.2-5 toont de afscherming van geladen bollen. Bij andere vormen dan de bolvorm werkt het ook zo.

%%%%%%%%%%



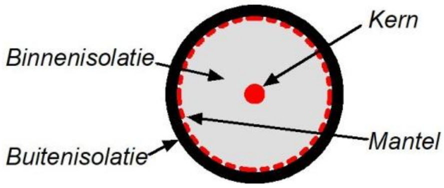
Figuur 4.2-5. Elektrisch veld tussen twee bollen zonder en met afscherming (getekend als verticale stippellijn naar 'aarde', symbool ⊥). De aangegeven stroomrichting is de 'technische' stroomrichting. De elektronen gaan dus tegen de pijlrichting in. Rood is +, blauw is -.

We zien in (1) twee geleidende bollen die allebei met massa zijn verbonden. U=0 geldt voor beide. Er gebeurt niets na het aanbrengen van de afscherming (1a).

In (2) wordt Bol 1 verbonden met een bron met spanning -U_b (links). Er loopt een kortdurende stroom uit Bol 1 die de bol negatief maakt ten opzichte van massa. Zodra Bol 1 de spanning -U_b heeft, stopt de stroom. Voor Bol 2 geldt nog steeds U=0. De negatieve lading van Bol 1 veroorzaakt een elektrisch veld. In Bol 2 duwt dat veld elektronen weg van de oppervlakte. Die vloeien naar massa. Op de linker kant van bol 2 wordt daardoor de lading positief, ook al is de spanning door de verbinding met massa nog steeds 0. Bol 1 en Bol 2 zijn nu de polen van een elektrisch veld. In (2a) gebeurt hetzelfde met Bol 1, maar nu met afscherming. In Bol 2 gebeurt niets.

In (3) is de bron omgepoold, zodat een stroompje naar Bol 1 daar een positieve lading veroorzaakt. Bol 2 krijgt een negatieve lading, maar houdt door de massaverbinding de spanning U=0. Ook hier ontstaat een kortstondig stroompje, nu naar massa. In (3a) gebeurt in het scherm wat eerst in Bol 2 gebeurde, In Bol 2 gebeurt nu niets. Dat is *afscherming*.

Een goed voorbeeld van afscherming is coaxkabel (Figuur 4.2-6). De mantel, meestal van gevlochten koperdraad, scheidt elektrisch gezien de kern van de buitenwereld. Kern en buitenwereld kunnen elkaar zo niet beïnvloeden. De mantel ligt meestal aan massa, zoals het scherm in Figuur 4.2-5. De mantel wordt ook gebruikt voor de retourstroom.



Figuur 4.2-6. Coaxkabel in dwarsdoorsnee. Rood is geleidend materiaal, grijs en zwart isolerend.

4.2.2 Magnetische velden

Vrijwel iedereen heeft wel eens met magnetisme van doen gehad, al is het maar de magneetsluiting van een keukenkastje of een magnetische schroevendraaier. Een magneet trekt stukjes ijzer, nikkel en sommige andere materialen aan. Die laatsten zijn meestal ijzerhoudend.

We onderscheiden

- Permanente magneten die altijd magnetisch zijn
- Tijdelijke magneten die alleen magnetisch zijn als ze door een elektrische stroom magnetisch worden gemaakt. Dus stroom weg, magnetisme weg.

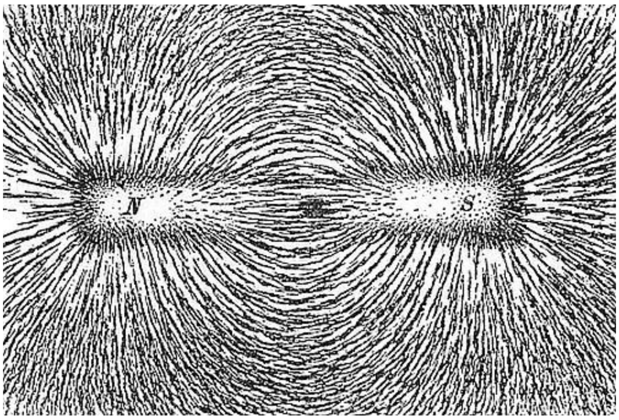
De invloedssfeer van een magneet wordt zijn *magnetisch veld* of korter *magneetveld* genoemd. De grootste magneet in onze omgeving is de aarde zelf. Het magnetisch veld van de aarde ligt bij benadering noord-zuid. Zoals een elektrisch veld een plus- en een minrichting heeft, heeft een magneetveld een noord- en een zuidrichting. Die richting kun je zichtbaar maken met een kompas. De wijzer (kompasnaald) is zelf een magneet die draaibaar is opgesteld of opgehangen. Onder invloed van het aardmagnetisch veld draait de kompasnaald zich ongeveer in een noord-zuid positie. De 'noordpool' wijst ongeveer naar het noorden, de 'zuidpool' ongeveer, maar niet precies naar het zuiden. De magnetische noord- en zuidpool van de aarde vallen namelijk niet precies samen met de 'echte' noord- en zuidpool. De kompasnaald wijst wel precies naar de magnetische polen van de aarde, zolang er maar geen ander magnetisch veld in de buurt is.

Hieruit blijkt dat magneten elkaar onderling beïnvloeden. Gelijke magneetpolen stoten elkaar af, ongelijke trekken elkaar aan. Dat is te zien in het filmpje over aantrekken en afstoten (aanklikken). Als de noordpool van een kompas naar het noorden wijst, moet de magnetische noordpool dus magnetisch gezien een zuidpool zijn. Dit is een erfenis uit een ver verleden, toen magnetisme vooral als iets geheimzinnigs werd gezien. Plus en min zouden ook logischer zijn geweest dan noord en zuid.

Het veld van een magneet strekt zich in theorie oneindig ver uit. Net als bij een elektrisch veld neemt de kracht die een magneet op een stukje ijzer of een andere magneet uitoefent, kwadratisch af met toenemende afstand tot de magneet. Dus ook hier geldt: afstand in een bepaalde richting 2x zo groot, kracht vier keer zo klein.

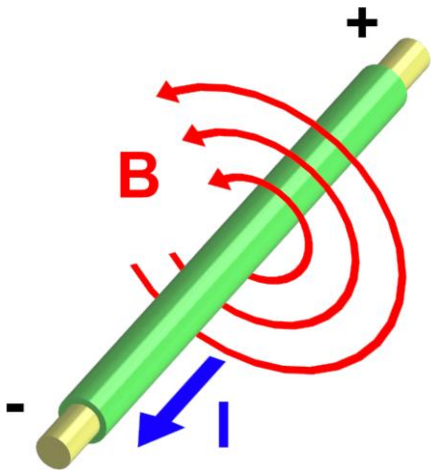
Een magnetisch veld kan worden gebundeld door materiaal dat het veld goed geleidt. Dat materiaal kan ijzer zijn, maar ook nikkel, ijzerhoudende mineralen zoals magnetiet (de naam zegt het eigenlijk al!) of ferrieten. Ferrieten zijn keramische materialen met magnetische eigenschappen. De term voor de geleiding is *magnetische permeabiliteit*, magnetische doordringbaarheid. Het filmpje over magnetische permeabiliteit laat het verschijnsel zien.

Een magnetisch veld heeft net als een elektrisch veld een sterkte (*veldsterkte*) en op elke plaats een richting. En jawel, ook veldlijnen. Dat zijn lijnen waarlangs een kompasnaald zich zou richten. De vorm van een magnetisch veld lijkt precies op die van een elektrisch veld. In het filmpje daarover is dat redelijk te zien. Daarin wordt magnetietgruis gebruikt, maar met ijzervijlsel gaat het ook. Een oude tekening is afgebeeld in Figuur 4.2-7.



Figuur 4.2-7. Een tekening van ijzervijlsel in een magnetisch veld uit een oud leerboek. 'S' staat voor zuid (South) (https://nl.wikipedia.org/wiki/Magnetisch_veld).

We zagen in het filmpje permanente magneten. Een elektrische stroom maakt ook een magnetisch veld. Als die stroom door een draad loopt, ontstaat een magnetisch veld rondom de draad en wel loodrecht erop. Zie Figuur 4.2-8. De cirkelvormige rode lijnen geven de richting van het veld aan. Dat is de richting waarin een kompasnaald zich zou richten als het aardmagnetisch veld geen roet in het eten zou gooien. Wel kun je gemakkelijk vaststellen dat een draad waar stroom doorheen loopt, de richting van een nabije kompasnaald verandert. De richting van de naald ligt dan ergens tussen de richting van het veld rond de draad en die van het aardmagnetisch veld in.



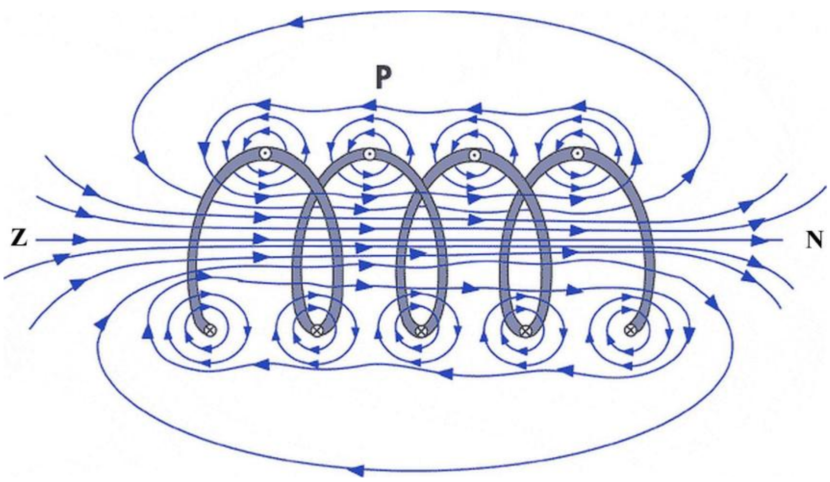
Figuur 4.2-8. Het magnetisch veld (B) rond een stroomvoerende draad. Bij de aangegeven stroomrichting draait een theoretisch gewichtloos noordpooltje in de pijlrichting om de draad (geen examenstof). (https://nl.wikipedia.org/wiki/Magnetisch_veld).

Als de stroomrichting (blauwe pijl in Figuur 4.2-8) wordt omgekeerd, keert ook het magnetisch veld om. De rode pijlpunten in Figuur 4.2-8 moeten dan in tegengestelde richting worden getekend. De omkering van stroom en het bijbehorende magnetische veld kunnen we zien in een filmpje (aanklikken).

Samengevat voor Figuur 4.2-8 (geen examenstof, wel goed om te weten):

- Stroom naar je toe: veld linksom.
- Stroom van je af: veld rechtsom.

Een spoel is een opgewikkelde draad. Het is eigenlijk een voortdurende herhaling van dezelfde draad. Het laat zich raden dat daardoor het magnetisch veld van een spoel bij dezelfde stroomsterkte sterker is dan dat van een enkele draad (Figuur 4.2-9).



Figuur 4.2-9. Het magnetisch veld van een spoel.

Als we in een spoel een magnetisch permeabel materiaal aanbrengen, wordt het veld van de spoel sterker. Zo maken we een *elektromagneet*. Samenvattend: met een stroom door een enkele draad maken we een magnetisch veld, met een spoel maken we een sterker veld en met een permeabele kern in de spoel maken we een nog sterker veld. Dit is te zien in het filmpje over elektromagnetisme.

Zoals gezegd heeft magnetische veldsterkte net als elektrische veldsterkte een richting en een grootte. Het gebruikelijke symbool is $\vec{H}$ en ook hier laten we in de praktijk van de zendamateur de pijl vrijwel altijd weg, dus H. De eenheid is A/m, ampère per meter. Hoe die eenheid in elkaar zit is wat lastiger te begrijpen dan de V/m van de elektrische veldsterkte en het is geen examenstof. We gaan er hier dus niet verder op in. Wel is het goed om te onthouden dat elektrische veldsterkte is gebaseerd op spanning (vandaar de V/m) en magnetische veldsterkte op stroom (vandaar de A/m). Dat komt in hoofdstuk 14 uitvoerig terug als we het daar hebben over elektromagnetische velden. De naam zegt het: die zijn een combinatie van een elektrisch en een magnetisch veld.

Afscherming van magnetische velden wordt toegepast om dezelfde reden als afscherming van elektrische velden. Dat gaat op een vergelijkbare manier, maar bedenk dat een elektrische afscherming niet volautomatisch een goede magnetische afscherming betekent. Een elektrische afscherming met bijvoorbeeld koper, dat een heel goede elektrische geleider is, schermt een magnetisch veld niet af. Dat veld gaat dwars door het koper heen. De oorzaak: koper heeft een lage magnetische permeabiliteit.

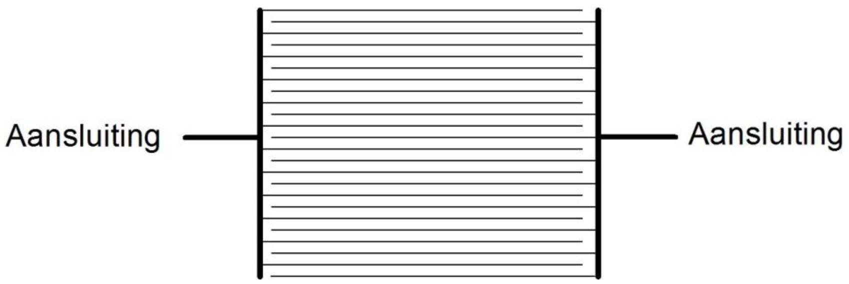
Zoals je voor een afscherming van een elektrisch veld goed elektrisch geleidend materiaal nodig hebt, heb je voor afscherming van een magnetisch veld goed magnetisch geleidend materiaal nodig. Dat is materiaal met een hoge magnetische permeabiliteit.

Daarvoor bestaan speciale metaallegeringen (mengsels) die bekend staan onder de naam *mu-metaal*. Meer informatie vind je op https://nl.wikipedia.org/wiki/Mumetaal. Mu-metaal is, zoals de naam zegt, metaal. Daarom is het ook elektrisch geleidend en schermt het elektrische velden ook nog eens redelijk af. Ferrieten kunnen ook voor magnetische afscherming worden gebruikt. Ze zijn echter niet elektrisch geleidend en een elektrisch veld gaat er dan ook gewoon doorheen.

4.3 Condensatoren

4.3.1 Opbouw

Een condensator slaat elektrische energie op in een elektrisch veld. Dat veld zit tussen twee platen, zoals we in 4.2.1 zagen. Die platen zijn soms samen in een rolletje opgewikkeld of om en om gestapeld (Figuur 4.3-1) om ruimte te sparen en om het elektrische veld tussen de platen effectief af te schermen. Hoe groter de platen en hoe kleiner de afstand ertussen, des te kleiner is het aandeel van het veld erbuiten in het totale veld. De aard van de toepassing bepaalt meestal de keuze. Daarover later meer.



Figuur 4.3-1. Gestapelde condensator in zijaanzicht

De platen heten ook wel *elektroden*. Tussen de elektroden zit een isolerende laag, het *diëlektricum*. Dat diëlektricum kan bestaan uit een luchtledig (vacuüm), lucht, of een ander isolerend materiaal. Als je er een gelijkspanning op aansluit, wordt de condensator opgeladen tot de bronspanning is bereikt.

Het elektrisch veld zit praktisch helemaal opgesloten tussen de platen. Als U de spanning over de condensator is en d de afstand tussen de platen, dan geldt voor de elektrische veldsterkte E tussen de platen

$$E = \frac{U}{d} \qquad (4.3\text{-}1)$$

Deze vergelijking kenden we al uit 4.2.1 Zoals we al in Figuur 4.2-3 en Figuur 4.2-4 zagen, is met afnemende plaatafstand de richting van het veld in toenemende mate loodrecht op de platen. Bij praktische uitvoeringen van condensatoren is die loodrechtheid vrijwel volledig. Het pijltje boven de E in vergelijking (4.2-1) is dus in vergelijking (4.3-1) inderdaad praktisch gezien overbodig, want er is maar één richting. Tussen de platen is de veldsterkte overal nagenoeg gelijk, zolang de plaatafstand ook overal dezelfde is.

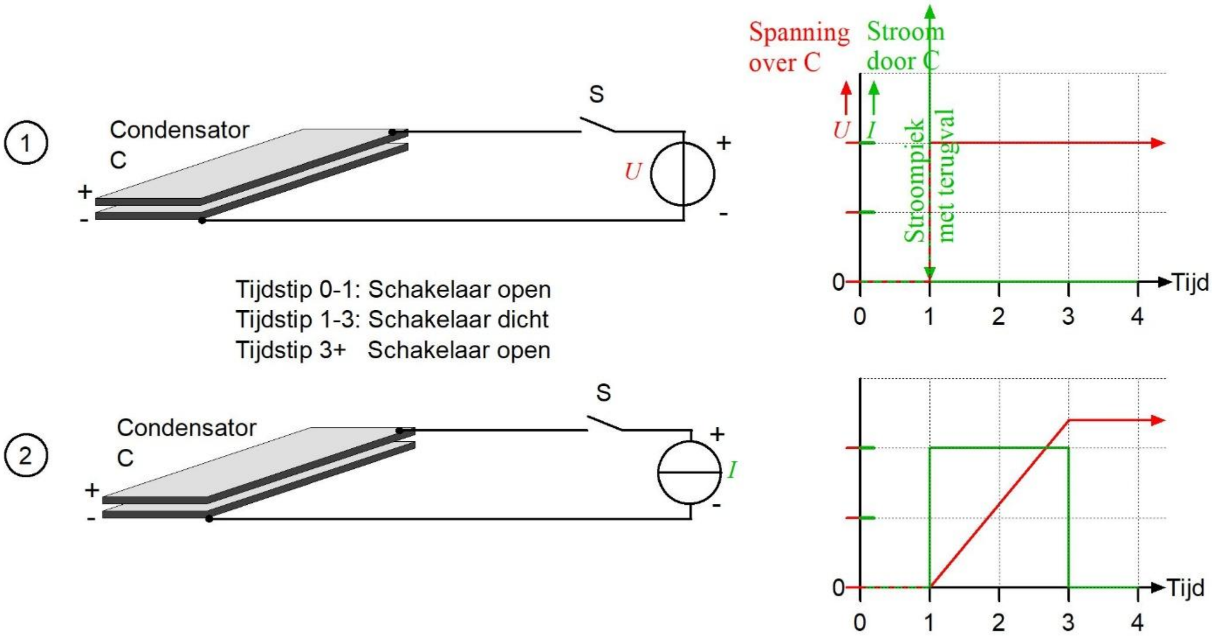
Een rekenvoorbeeld

Als in Figuur 4.3-2 de afstand tussen de platen 1 mm is en het spanningsverschil tussen de platen 5V dan is de veldsterkte E gelijk aan 5V/1mm = 5 V/10^{-3}m = 5000 V/m. Dit grote getal komt door het gebruik van de m als eenheid van lengte (of afstand).

Tip: de vergelijking is tamelijk gemakkelijk te onthouden, omdat de samenstelling van de eenheid waarin E wordt uitgedrukt, hem verraadt. Die is V/m, dus U/d.

4.3.2 Een condensator opladen uit een spannings- of stroombron

In Figuur 4.3-2 zien we in plaatje 1 (bovenste helft) een schakeling met een spanningsbron met spanning U, een schakelaar S en een condensator. Als de schakelaar wordt gesloten, loopt er een kortstondige stroom, (in theorie 0 sec, in de praktijk ietsje meer), totdat de condensator dezelfde spanning heeft als de bron. Dat zien we in de grafiek rechts naast het plaatje met bron en condensator. Zodra de schakelaar op tijdstip 1 wordt gesloten, loopt er in theorie een oneindig hoge stroom gedurende 0 seconden van bron naar condensator. Zodra de condensator een spanning, gelijk aan die van de bron heeft, valt de stroom tertug op 0. Dar duurt in theorie 0 seconden.



Figuur 4.3-2. Opladen van een condensator. 1: vanuit een spanningsbron. 2: vanuit een stroombron.

In werkelijkheid gaat het er wat minder wild aan toe, omdat elke geleider nu eenmaal een bepaalde (kleine) weerstand heeft en geen bron een oneindig grote stroom kan leveren. Er loopt dus heel even een sterke stroom (verticale groene pijl) die terugvalt naar 0 en daarna 0 blijft. De groene lijn op de horizontale as geeft dat aan. De stroom heeft de condensator opgeladen tot de bronspanning U en daarna loopt er geen stroom meer. De spanning over de condensator verandert niet meer (rode horizontale lijn met pijlpunr). Als de schakelaar op tijdstip 3 weer geopend wordt, blijft in theorie de spanning over de condensator eeuwig in stand (rode pijl naar rechts). In werkelijkheid verliest de condensator langzaam zijn lading, want geen enkele stof, ook geen enkel diëlektricum, is een volkomen isolator.

4.3.3 Verband tussen lading, stroom en spanning

We kijken nu naar plaatje 2 van Figuur 4.3-2. Als we een condensator opladen uit een stroombron, dus met een constante stroom I, dan loopt de lading Q evenredig op met de tijd t. De schakelaar wordt gesloten op tijdstip 1 en gaat weer open op tijdstip 3. Tussen deze tijdstippen loopt er een constante stroom (groene lijn). De spanning op de condensator loopt dan in rechte (rode) lijn op. Als de stroom stopt, blijft de spanning in theorie dezelfde (horizontale rode lijn met pijlpunt). In werkelijkheid is er altijd een beetje lekstroom omdat een ideale isolator niet bestaat en daalt de lijn dus langzaam. Voor de verplaatste lading Q tussen de tijdstippen 1 en 3 geldt:

$$Q = It \tag{4.3-2}$$

Stroom is lading per tijd en dus is lading stroom maal tijd (hoofdstuk 3). Dat kun je zien door in de vergelijking hierboven rechter- en linkerlid te verwisselen en beide te delen door t (vergelijking (4.3-3):

$$I = \frac{Q}{t} \quad (4.3\text{-}3)$$

De spanning U over een condensator is evenredig met de lading Q en omgekeerd evenredig met de capaciteit, dus:

$$U = \frac{Q}{C} \quad (4.3\text{-}4)$$

Dat is hetzelfde als:

$$Q = UC \quad (4.3\text{-}5)$$

4.3.4 De eenheid van capaciteit

De evenredigheidsconstante tussen de lading Q van een condensator en de spanning U is de capaciteit C. Hoe groter C, des te meer lading de condensator bevat bij eenzelfde spanning: C twee keer zo groot: lading bij dezelfde spanning twee keer zo groot. Sommigen vergelijken een condensator wel met een fietsband. Hoe meer lucht je erin perst, des te hoger wordt de druk. In vergelijking (4.3-4) zou de spanning U dan voor de druk staan, de lading Q voor de hoeveelheid lucht en C voor de inhoud van de band. De Si-eenheid van capaciteit is de farad, afgekort F.

1 F is hetzelfde als 1 Coulomb/Volt, afgekort 1 C/V of 1 CV^{-1}.

Een condensator van 1 F heeft bij een spanning van 1V dan ook een lading van 1 C. Het symbool C (rechtop!) voor de eenheid van lading Coulomb is niet hetzelfde als de grootheid capaciteit die met een cursieve C wordt aangeduid. In schema's gaat men hiermee nogal losjes om. Dat is niet erg, zolang maar duidelijk is wat er bedoeld wordt.

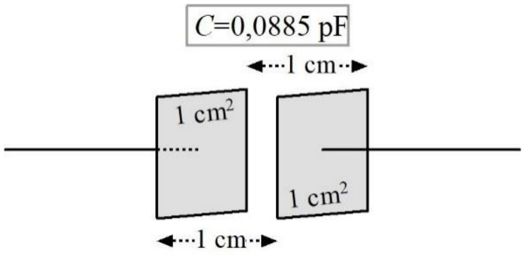
4.3.5 Wat bepaalt de capaciteit van een condensator?

De capaciteit C van een condensator hangt af van

- De oppervlakte A van de platen (eenheid: cm^2)
- De afstand d tussen de platen (eenheid: cm)
- De eigenschappen van het diëlektricum die tot uitdrukking komen in de relatieve diëlektrische constante ε_r. Het symbool is de Griekse letter *epsilon*. De kleine ondergeschreven r is van 'relatief'. *Relatief* is hier ten opzichte van vacuüm (luchtledig). De "echte" ε voor vacuüm, ε_0, heeft bij benadering de getalswaarde 0,0885, mits de hierboven aangegeven eenheden worden gebruikt. De relatieve grootheid ε_r voor vacuüm is gelijk aan 1, voor lucht vrijwel 1. In de vergelijking komt die 0,0885 terug:

$$C = 0{,}0885\varepsilon_r\frac{A}{d} \quad (4.3\text{-}6)$$

Figuur 4.3-3 laat vergelijking (4.3-6) als luchtcondensator zien met een plaatoppervlakte van 1 cm^2 en een plaatafstand van 1 cm en een capaciteit van 0,0885 pF.



Figuur 4.3-3 Luchtcondensator van 0,0885 pF met een plaatafstand 1 cm en een plaatoppervlakte van 1 cm².

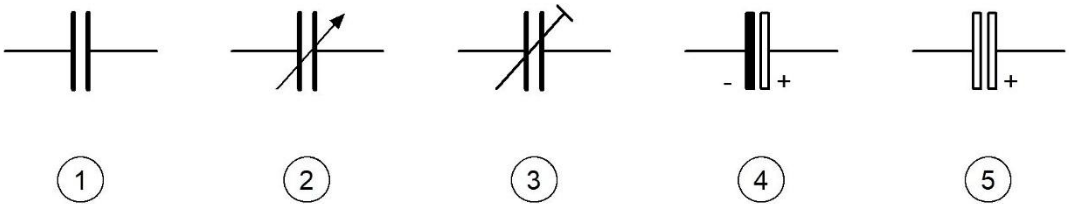
Zou er bijveelbeeld kwarts, zeg maar kiezelsteen, in plaats van lucht tussen de platen zitten, , dan is $\varepsilon_r = 4{,}3$ en wordt C 4,3 keer zo groot als met lucht of vacuüm tussen de platen. Zo heeft elk materiaal zijn eigen ε_r. De F is voor radiotoepassingen bijna altijd een veel te grote eenheid. We gebruiken meestal pF, nF of µF.

Het verband dat (4.3-6) weergeeft, is examenstof, maar het getal 0,0885 niet. Dat een n maal zo grote diëlektrische constante ε_r leidt tot een n maal zo grote capaciteit C is dat weer wel.

Een ander en moderner woord voor relatieve diëlektrische constante is *relatieve permittiviteit.* Voor een luchtledig geldt de waarde 1, voor lucht nagenoeg 1 en voor de meeste vaste stoffen een getal tussen 1 en 10. Een tabel met waarden vind je bijvoorbeeld op https://nl.wikipedia.org/wiki/Permittiviteit. Een diëlektricum heet op die site *middenstof.* Die laatste term zal voor de meesten onder ons gemakkelijker te onthouden zijn, maar staat helaas niet in examens of in de exameneisen. De term *diëlektricum* wel.

4.3.6 Schemasymbool

Het schemasymbool voor een condensator verraadt de opbouw met twee platen (Figuur 4.3-4). Het diëlektricum kan lucht zijn, maar ook een andere stof. Uit het schemasymbool blijkt dat meestal niet, behalve bij elektrolytische condensatoren (nummer 4 en 5 in Figuur 4.3-4).



Figuur 4.3-4. Schemasymbolen voor condensatoren. 1: vaste condensator; 2: variabele condensator; 3: instelbare condensator (heet ook trimcondensator of trimmer) 4: elektrolytische condensator (elco), oud; 5: elektrolytische condensator (elco), modern symbool.

De elektrolytische condensator, in het spraakgebruik meestal *elco* genoemd, heeft een plus- en een minaansluiting. Dat komt doordat het diëlektricum binnen de condensator wordt gevormd via een elektrochemische reactie. Keer je de polariteit van de aangesloten spanning om, dan verniel je het diëlektricum en daarmee de condensator. Het diëlektricum is heel dun, in de orde van één of enkele µm, waardoor de capaciteit van een elco heel hoog is. Meestal zijn elco's gebaseerd op aluminium. Tantaal (tantalium) is voor lagere waarden en kleinere afmetingen ook gebruikelijk. Meer over elco's vind je bijvoorbeeld op https://nl.wikipedia.org/wiki/Elektrolytische_condensator. Elco's hebben een relatief grote lekstroom en de aangegeven capaciteit is niet erg nauwkeurig. De werkelijke waarde ligt vaak tussen de helft en het dubbele van de aangegeven waarde.

4.3.7 Doorslagspanning

Als de spanning over een condensator te groot wordt, dan wordt het elektrisch veld in het diëlektricum zo sterk dat elektronen eruit worden 'losgetrokken'. Dan brandt er een gat in het diëlektricum. Het is bliksemontlading in het klein. De condensator en naburige onderdelen in een schakeling kunnen erdoor worden vernield. Sommige soorten zijn zelfherstellend. Op condensatoren is de maximale spanning vrijwel altijd aangegeven.

4.3.8 Uitvoeringen van condensatoren

De toepassing bepaalt vaak de keuze van een condensator. Soms is aan de uiterlijke vorm te zien, om wat voor soort condensator het gaat. We tonen enkele voorbeelden van vaste condensatoren in Foto 4.3-1. Foto 4.3-2 toont enkele variabele condensatoren die na te zijn ingesteld niet meer hoeven te worden aangepast. Foto 4.3-3 toont enkele uitvoeringen van elco's. Foto 4.3-4 toont twee variabele condensatoren met een as waarop een draaiknop kan worden gezet om ze tijdens gebruik te kunnen instellen.

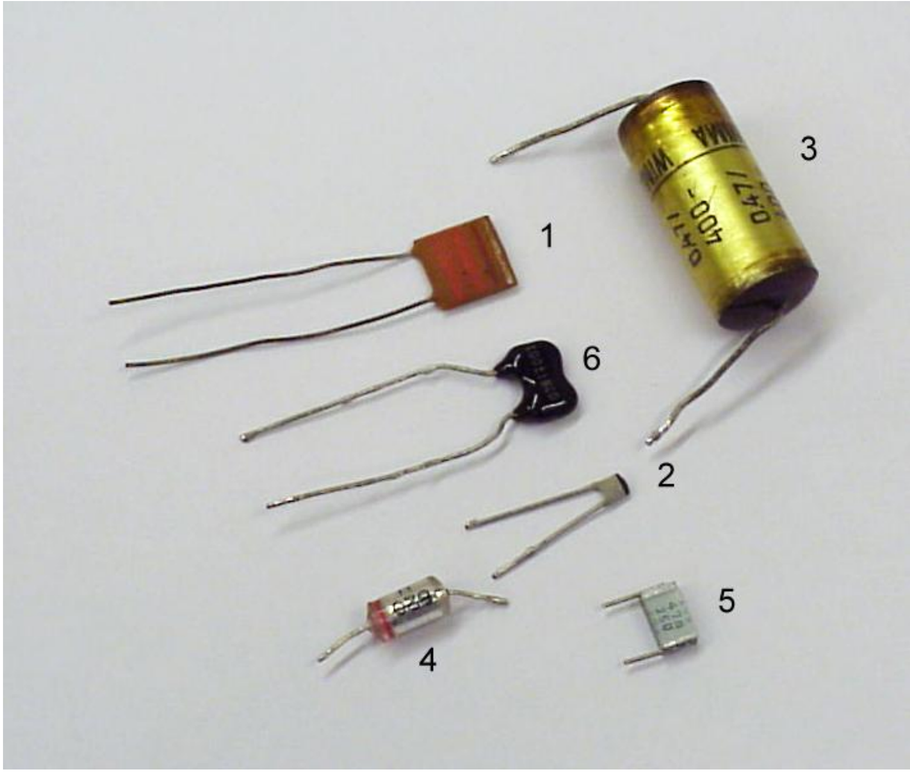


Foto 4.3-1. Enkele uitvoeringen van vaste condensatoren. 1 en 2 zijn keramische types, 3 is een polyester type, 4 is een styroflex type en 5 is een polyethyleen type (MKT). 6 is een mica-condensator. Mica is een bladsilicaat (een mineraal). Deze namen hebben betrekking op het soort diëlektricum. 3, 4 en 5 zijn verschillende soorten kunststof.

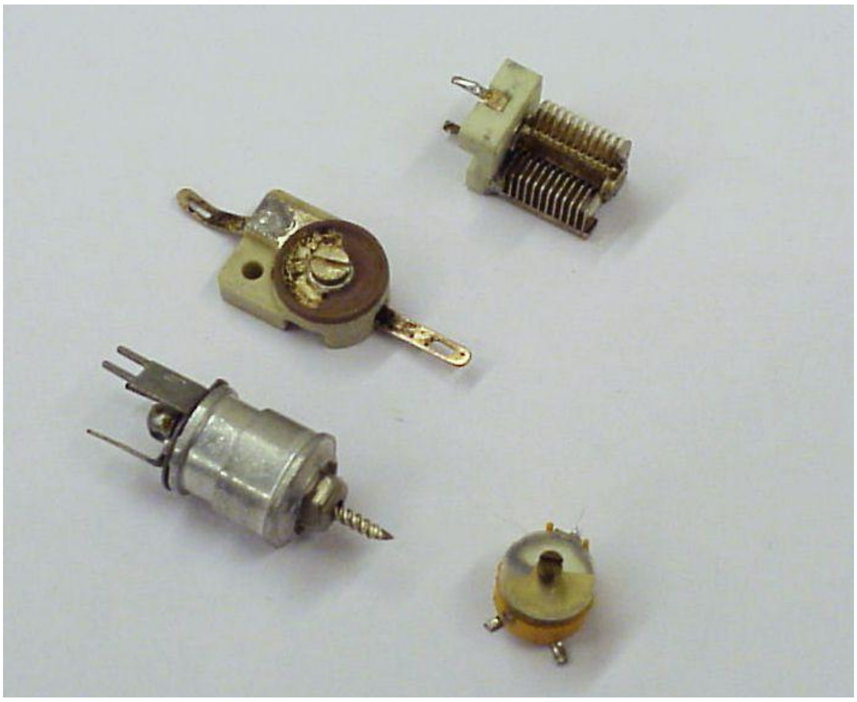


Foto 4.3-2. Enkele uitvoeringen van variabele condensatoren. Door draaien zijn ze in te stellen op de capaciteit die in de schakeling nodig is. Daarna blijven ze op de ingestelde capaciteit. Ze heten ook wel instelcondensator *of* trimcondensator *of kortweg* **trimmer**. *Boven ligt een luchtcondensator, platen zichtbaar. Daaronder: een condensator met mica als diëlektricum, daaronder weer één met lucht en ronde platen die in elkaar vallen, helemaal onderaan één met kunstoffolie als diëlektricum.*

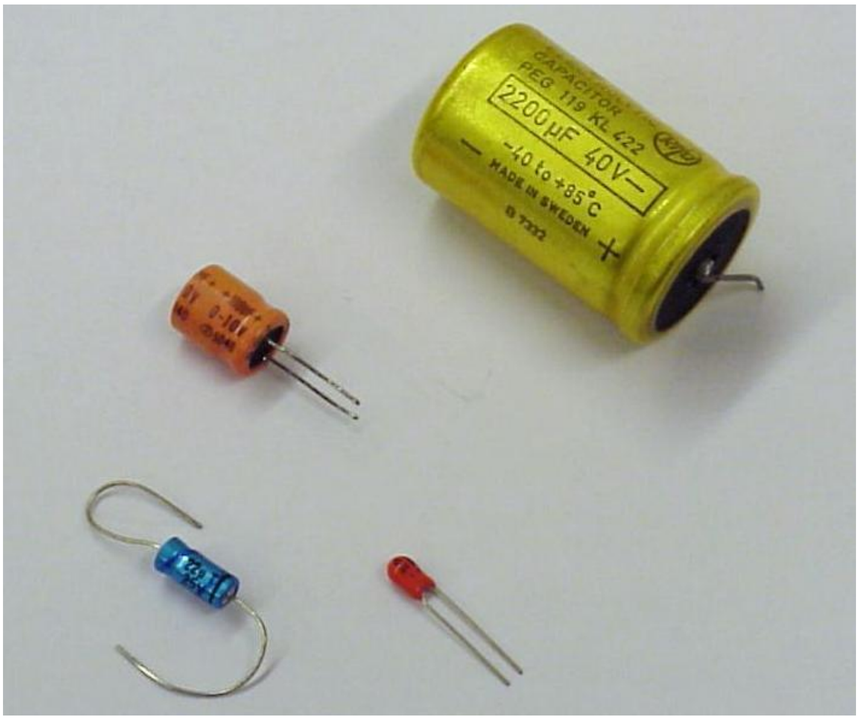


Foto 4.3-3. Enkele voorbeelden van elektrolytische condensatoren. De kleine rode condensator rechtsonder heeft een tantalium elektrode. De andere drie condensatoren hebben een aluminium elektrode.

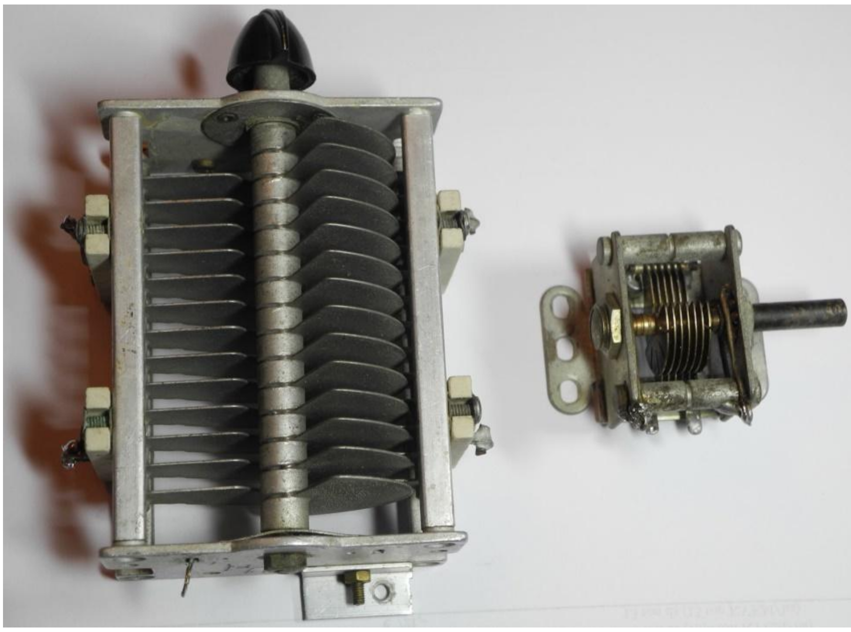
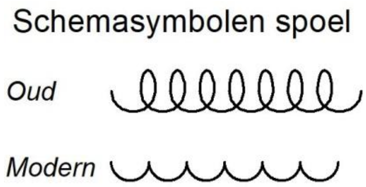


Foto 4.3-4. Twee variabele condensatoren die dienen voor afstemming van een zender of ontvanger. Het diëlektricum is lucht. De grote afstand tussen de platen links is bedoeld om een hoge doorslagspanning te verkrijgen. Vooral bij toepassingen in zenders kan dat van belang zijn.

4.4 Spoelen

4.4.1 Schemasymbool

In Figuur 4.4-1 zien we een oud en een modern schemasymbool voor een spoel. Het oude symbool spreekt voor zichzelf; het moderne is gemakkelijker te tekenen.

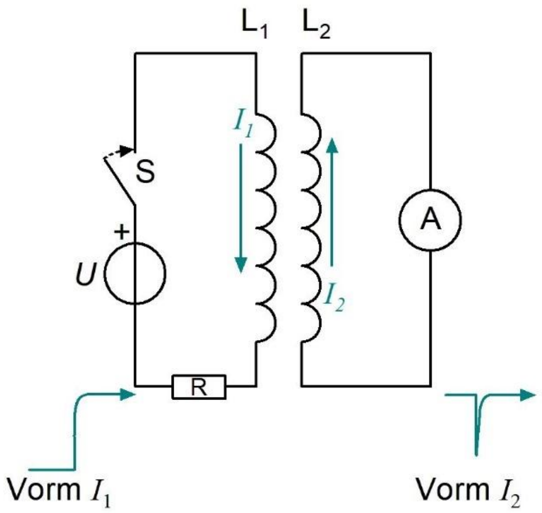


Figuur 4.4-1. Schemasymbolen van een spoel; oud en modern.

4.4.2 Inductie en zelfinductie

In het filmpje over elektromagnetisme zagen we dat stroom door een spoel een magnetisch veld laat ontstaan. Het omgekeerde effect, een veranderend magnetisch veld dat leidt tot stroom door een draad of spoel, bestaat ook. Het staat bekend onder de naam *inductie*. Ook daarvan is een filmpje. De bewegende magneet die in een spoel een stroom opwekt, is het basisprincipe van fietsdynamo's tot generatoren in windmolens of elektrische centrales.

Een magnetisch veld in een spoel kun je ook zonder magneet laten veranderen. Neem een tweede spoel, zet die zonder afscherming dichtbij de eerste en laat er een veranderende stroom door lopen. Die beïnvloedt de stroom door de eerste spoel. Reden genoeg om daar eens goed naar te kijken. In Figuur 4.4-2 zijn twee spoelen getekend.



Figuur 4.4-2. Twee spoelen; links met spanningsbron, schakelaar en weerstand, rechts met ampèremeter.

De linker spoel L_1 is via een schakelaar en een weerstand R verbonden met een spanningsbron, de rechter met een ampèremeter. Het enige doel van de weerstand is het beperken van de stroom. Als de schakelaar S wordt gesloten, gaat de stroom I_1 lopen. Dat veroorzaakt een magnetisch veld in en rond spoel L_1. Een deel van dat veld loopt door spoel L_2. Daardoor ontstaat een stroom I_2 door L_2. De richting van I_2 is tegengesteld aan die van I_1. De ampèremeter slaat even uit en valt dan terug in de nulstand. De stroom I_2 duurt dus kort, terwijl I_1 doorgaat. Dat is weergegeven in de groene vormgrafiekjes onder in de figuur. We zien *inductie*.

Nu de verklaring. Inschakelen van de stroom I_1 veroorzaakt een magnetisch veld. Daardoor ontstaat in L_2 een stroom I_2 die een tegengesteld magnetisch veld maakt. Dat werkt de vorming van het veld van L_1 tegen. Doordat na enige tijd I_1 praktisch niet meer verandert, verandert het magnetisch veld ook niet meer en is I_2 gelijk aan 0 geworden.

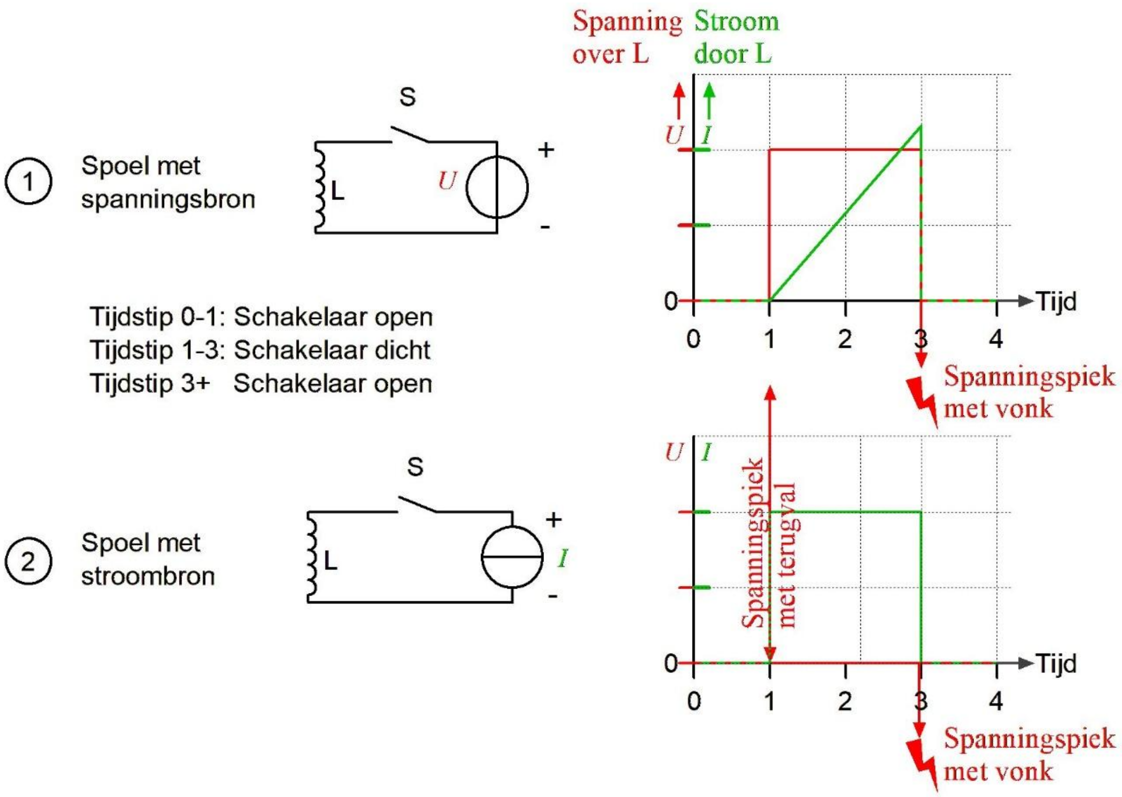
Als dit met twee spoelen gebeurt, hoe zit het dan met een enkele spoel? Als daar stroom doorheen loopt, zit die spoel in zijn eigen magnetisch veld. Als we een enkele spoel op een stroom- of spanningsbron aansluiten, bouwt zich een magnetisch veld op. Die opbouw wekt in de spoel een tegenstroom op. De netto-stroom is de som van stroom en tegenstroom. De stroom door de spoel komt daardoor niet ineens, maar geleidelijk op gang.

Ook dit is inductie, maar nu in de spoel die zelf het magnetisch veld veroorzaakt. Daarom heet deze vorm van inductie *zelfinductie.* Een spoel wordt ook vaak met die term aangeduid. Een stroomverandering in een zelfinductie werkt zichzelf tegen. Dit is de *wet van Lenz.* Wil je daarover meer weten, kijk (bijvoorbeeld) op https://www.natuurkunde.nl/artikelen/2091/53-de-wet-van-lenz of google 'wet van Lenz'. Heinrich Lenz was een Duitstalig natuurkundige uit Estland. De letter L die meestal voor spoelen wordt gebruikt en het gangbare symbool L voor de grootheid zelfinductie, zijn ontleend aan zijn achternaam. De eenheid van zelfinductie is echter niet naar Lenz genoemd, maar naar de Amerikaanse natuurkundige Joseph Henry. De henry wordt afgekort met H. "*L*= 0,1 H" is dus een normale uitdrukking.

In de volgende sub-paragraaf zullen we zien wat de henry betekent.

4.4.3 Op gang komen van de stroom door een spoel uit een spannings- of stroombron

We bekijken Figuur 4.4-3 en de tekst die erop volgt.



Figuur 4.4-3. Begin en einde van een magnetisch veld bij een spoel. Deel 1: bij gebruik van een spanningsbron. Deel 2: bij gebruik van een stroombron.

Tijdstip 1. De schakelaar wordt gesloten

Na sluiting van de schakelaar S in Figuur 4.4-3 op tijdstip 1 is in deel 1 de spoel verbonden met een spanningsbron en in deel 2 met een stroombron. We bespreken beide delen.

Deel 1: De stroom komt uit een spanningsbron. De zelfinductie voorkomt dat onmiddellijk na inschakelen een enorme stroom ontstaat. De stroom begint zelfs op 0.

Deel 2: De stroom komt uit een stroombron. Wordt zo'n bron plotseling aangesloten op een spoel, dan doet de wet van Lenz zich gelden. De bron moet een hoge spanning leveren om de stroom, waarop hij is ingesteld, aan de gang te krijgen. Er ontstaat een spanningspiek. Die valt op 0 terug als de stroom eenmaal de ingestelde waarde heeft bereikt. In theorie is die kortstondige spanning oneindig hoog en duurt 0 seconden. In werkelijkheid gaat het er rustiger aan toe, vooral omdat de hoogste spanning die een bestaanbare stroombron kan maken, beperkt is. Met die theoretisch oneindige spanning bij het inschakelen zal het dus in werkelijkheid zo'n vaart niet lopen. Maar na heel korte tijd is de stroom praktisch even groot als de op de bron ingestelde waarde en is de spanning over de spoel teruggevallen op nagenoeg 0.

Periode tijdstip 1-3. Gesloten schakelaar

Deel 1: de stroom I loopt evenredig met de tijd op. De stroomsterkte is evenredig met zowel de aangelegde spanning U als de tijd t die sinds het inschakelen is verstreken. De bijbehorende vergelijking is

$$I = \frac{Ut}{L} \qquad (4.4\text{-}1)$$

De evenredigheidsconstante is hier $^1/_L$. L heet officieel *coëfficiënt van zelfinductie.* In de praktijk wordt gesproken over *zelfinductie*. Strikt genomen is dat niet helemaal juist, maar in de praktijk van alledag gebruiken we alleen het woord *zelfinductie*.

De snelheid waarmee de stroom verandert, is omgekeerd evenredig met de zelfinductie. Hoe groter L, des te trager loopt I op. Oorzaak: hoe groter L, des te sterker het magnetisch veld bij eenzelfde waarde van I en dus ook de tegenwerking bij veranderende I. Bij een spoel van 1 H leidt een spanning van 1 V tot een stroomverandering van 1A/s (As^{-1}).

Deel 2: de op de bron ingestelde stroomsterkte wordt heel kort na inschakelen bereikt en blijft daarna gelijk, zoals het een stroombron betaamt.

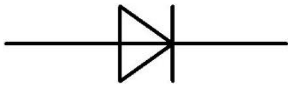
Tijdstip 3. De schakelaar gaat weer open.

Deel 1: De spanning wordt uitgeschakeld. De wet van Lenz zegt dat de stroom door de spoel wil blijven doorlopen. De energie van het magnetisch veld moet ergens blijven, maar er is geen geleidende schakeling meer tussen de uiteinden van de spoel. Over de schakelaar ontstaat daardoor een hoge spanning. Eigenlijk wordt het magnetisch veld omgezet in een elektrisch veld tussen de schakelcontacten. Die vormen samen een mini-condensator, waarin een kleine lading volstaat om een hoge spanning te krijgen. Dat leidt tot vonkoverslag tussen de schakelcontacten. Een mini-bliksempje dus. Daarom staat bij tijdstip 3 in Figuur 4.4-3 een bliksemsymbooltje. Elektrische energie wordt bij de vonkoverslag vooral omgezet in hitte. Door de hitte van de vonk kan een deel van het metaal van de schakelcontacten verdampen. Inbranden noemen we dat. Ingebrande contacten bekorten de levensduur van een schakelaar.

Deel 2: Er gebeurt hetzelfde als in deel 1.

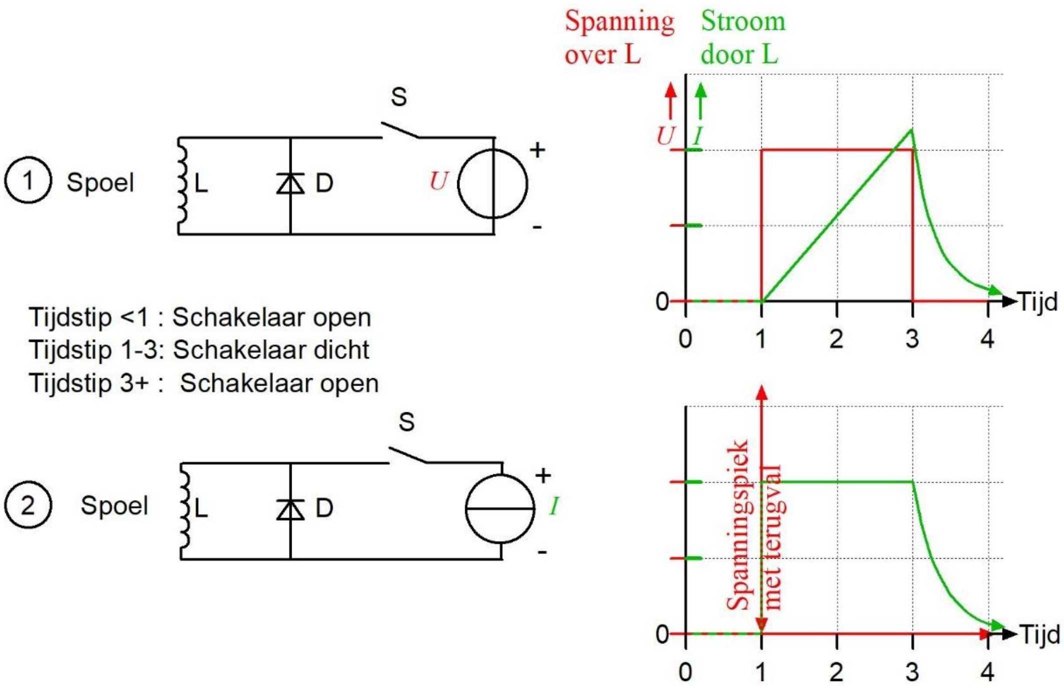
Vonkblusdiode

Een schakelaar in schakelingen met zelfinductie moet tegen inbranden worden beschermd. Dat kan met een *diode*. Die heeft de toepasselijke naam *vonkblusdiode*. Met dioden maken we nader kennis in hoofdstuk 8. Voor nu is het voldoende om te weten dat een diode een ding is dat stroom maar in één richting doorlaat. Het schemasymbool staat in Figuur 4.4-4. De doorlaatrichting van plus naar min is van links naar rechts. Als je de driehoek ziet als pijlpunt, moet dat te onthouden zijn.



Figuur 4.4-4 Schemasymbool van een diode. De "pijlpunt" geeft de doorlaatrichting van + naar - aan. De technische stroomrichting dus.

Figuur 4.4-5 toont dezelfde schakelingen als Figuur 4.4-3, maar nu met vonkblusdiode en daaraan aangepast gedrag van de stroom.



Figuur 4.4-5. Begin en einde van een magnetisch veld bij een spoel, met vonkblusdiode D. 1: bij gebruik van een spanningsbron. 2: bij gebruik van een stroombron. Effect van de diodes: vergelijk met Figuur 4.4-3.

De oplettende lezer zal hebben gezien dat de diode met zijn negatieve kant aan de + ligt. Met gesloten schakelaar S geleidt de diode dus niet, want de stroom erdoor kan alleen maar de andere kant op. In het schema is dat van beneden naar boven. En als S gesloten is, zit de + boven. De stroom door de spoel (van + naar -) is van boven naar beneden. Maar als S opengaat en het contact met de bron wordt verbroken, ontstaat met de diode een rondgaand systeem waarin de stroom in theorie eeuwig kan blijven lopen.

In werkelijkheid is er in een schakeling altijd wel ergens weerstand die van de elektrische energie warmte maakt. In dit geval zal meestal de diode de hoofddader zijn, maar ook elke spoel heeft een (kleine) weerstand. De stroom dooft daardoor toch uit, zoals de grafieken in Figuur 4.4-5 aangeven.

4.4.4 Zelfinductie en fietsen

Het op gang komen en stoppen van de stroom door een zelfinductie lijkt een beetje op fietsen. Om met de fiets op gang te komen, moet je even stevig trappen. Dat is het opbouwen van de snelheidsenergie.

Als we ophouden met trappen, rijdt de fiets nog een tijd door, waarbij de snelheidsenergie langzaam verloren gaat in wrijving met de lucht, wrijving tussen band en weg en een beetje wrijving in de lagers. Als we met één snelheid doorfietsen, hoeven we alleen maar dat verlies aan wrijvingsenergie te compenseren.

In een zelfinductie (spoel of draad) moet de spanning flink ‘duwen’ om de stroom op gang te krijgen. Die energie gaat in de opbouw van het magnetisch veld zitten. Als de spanningsbron wordt weggenomen en een rondlopende stroom door de zelfinductie mogelijk is doordat de uiteinden geleidend zijn verbonden, gebeurt hetzelfde als met de fiets: de schakeling gaat ‘freewheelen’. De stroom neemt geleidelijk af door een beetje weerstand dat altijd wel ergens in het systeem zit.

Als we een rijdende fiets in een fractie van een seconde willen stoppen, lukt dat alleen tegen bijvoorbeeld een boom of muur, met alle risico voor fiets en berijder. De bewegingsenergie moet ergens heen. Rustig afremmen zet de bewegingsenergie om in warmte en voorkomt schade.

Als we de stroom door de spoel met één schakelklik stoppen, moet de magnetische energie ergens naar toe. Zonder vonkblusdiode ontstaat er ‘klein vuurwerk’ op de schakelaar.

4.4.5 Wat bepaalt de zelfinductie van een spoel?

De zelfinductie L van een spoel hangt af van

- Het aantal windingen n
- De dwarsdoorsnede A van de spoel (cm^2)
- De lengte l van de spoel (cm)
- De relatieve magnetische permeabiliteit μ_r van het kernmateriaal

De magnetische permeabiliteit wordt meestal gegeven als de *relatieve* permeabiliteit μ_r. *Relatief* is hier ten opzichte van luchtledig (vacuüm), net als bij de diëlektrische constante van condensatoren. De permeabiliteit van vacuüm wordt aangegeven met μ_0. De permeabiliteit van lucht verschilt nauwelijks van die van vacuüm. Voor lucht geldt dus $\mu_r \approx 1$.

Een vergelijking die voor spoelen met één wikkellaag wordt gebruikt, is

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r n^2 A}{l} \qquad (4.4\text{-}2)$$

L is in μH. Bij vergelijking (4.4-2) past een kanttekening. Hij is niet onder alle omstandigheden correct, hoewel hij in examenopgaven tot in elk geval midden 2020 gebruikt is zoals hier weergegeven. Vooral de verhouding van lengte en dikte van de spoel, maar ook draaddikte en afstand tussen de wikkelingen spelen een rol.

Als we vergelijking (4.4-2) nauwkeurig bekijken, zien we dat L evenredig is met het kwadraat van het aantal windingen. Elke winding is er één en op het eerste gezicht zou je misschien verwachten dat twee windingen een twee keer zo grote zelfinductie leveren.

Waarom is dat niet zo? Het antwoord is, dat opeenvolgende windingen ook nog eens magnetisch gekoppeld zijn: ze liggen in elkaars magnetisch veld. Vergelijking (4.4-2) geldt eigenlijk alleen voor een spoel waarvan de lengte veel groter is dan de dikte, maar op het examen kom (kwam?) je geen andere tegen.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!
Bij vergelijking (4.4-2) past dan ook een kanttekening. Hij is niet onder alle omstandigheden correct, hoewel hij in examenopgaven gebruikt wordt/werd zoals hier weergegeven. Vooral de verhouding van lengte en dikte van de spoel, maar ook draaddikte en afstand tussen de wikkelingen spelen een rol. Een voorbeeld van een “alternatieve” vergelijking voor een in 1 laag gewikkelde spoel zonder kern is

$$L = Fn^2D$$

Daarin is L de zelfinductie in μH, n het aantal windingen, D de buitendiameter (cm) en F een vormfactor die afhangt van draaddikte, wikkellengte en buitendiameter van de spoel (J. Schaap, PA0HH, 1969. De kortegolf-amateur, 2e druk. Philips Technische Bibliotheek, Kluwer).

Een andere en veel gebruikte is

$$L = 0{,}197\,\frac{D^2n^2}{9D + 20l}$$

Waarin de zelfinductie L in μH, de diameter D in cm, het aantal windingen n, en de bewikkelde lengte l in cm (met dank aan Joop van Zeeland, PA9JOO).

Een puntje is de permeabiliteit van een eventuele spoelkern. Vergelijking (4.4-2) geeft een vast verband tussen permeabiliteit en zelfinductie. Maar….. bij een korte en dikke spoel zit een groter deel van het magnetisch veld buiten de kern dan bij een lange en dunne spoel. Dan moet bij de lange dunne de kern meer invloed op de zelfinductie van de spoel hebben dan bij de korte dikke. Alleen bij een ringkern zit praktisch het hele veld in de kern. En bij een luchtspoel zit het hele veld in lucht….

Let ook op A: dat is een oppervlakte. Als de diameter D van een ronde (‘cylindrische’) spoel 2x zo groot wordt, wordt de doorsnede A 4x zo groot! De zelfinductie is dus evenredig met D^2. Er zijn examenvragen die van D in plaats van A uitgaan, dus houd dat in de gaten. Wie wat meer over dit onderwerp wil lezen, kan bijvoorbeeld terecht op https://en.wikipedia.org/wiki/Inductance#Inductance_of_a_solenoid, helaas Engelstalig.

De zelfinductie van een spoel kan worden verhoogd met een kern en/of omhulling van materiaal met een hogere magnetische permeabiliteit μ_r. Voorbeelden van hoogpermeabel materiaal zijn ijzer, nikkel en ferrieten. Onder ferrieten vallen verschillende soorten keramisch materiaal met magnetische eigenschappen. Het magnetisch veld van een spoel met een permeabele kern is (veel) sterker dan zonder kern. Bekijk in dit verband als je wilt nog een keer het filmpje over elektromagnetisme.

4.5 Weerstanden in combinatie met condensatoren of spoelen

4.5.1 Inleiding

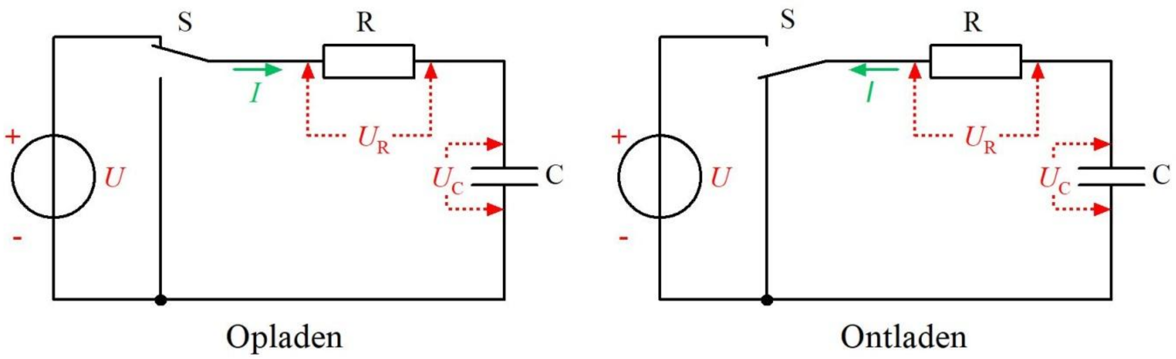
Als er spanning over een weerstand wordt gezet, loopt er onmiddellijk een stroom. Die stroom verandert niet, zolang de spanning dezelfde blijft.

We hebben gezien dat dit bij condensatoren en spoelen anders gaat. Spanning over een spoel leidt tot een almaar toenemende stroom. Stroom door een condensator leidt tot een almaar toenemende spanning.

Kortom: bij een weerstand lopen stroom en spanning netjes met elkaar in de pas; bij condensatoren en spoelen is dat niet zo. In elektronische schakelingen zijn combinaties van weerstanden met condensatoren, spoelen of met beide algemeen. In deze paragraaf maken we kennis met combinaties van weerstanden met condensatoren en van weerstanden met spoelen. Combinaties van alle drie komen we in hoofdstuk 5 tegen.

4.5.2 Weerstanden met condensatoren

Wat gebeurt er als we uit een spanningsbron een condensator opladen via een weerstand? We bekijken het deel 'Opladen' van Figuur 4.5-1.



Figuur 4.5-1. Opladen en ontladen van de condensatorspanning U_C in een RC-schakeling.

Naarmate de spanning U_C over de condensator oploopt, wordt de spanning U_R over de weerstand kleiner, want samen zijn ze gelijk (maar tegengesteld) aan de spanning U van de bron. In vergelijkingvorm: $U+U_R+U_C=0$. (tweede wet van Kirchhoff). De laadstroom I van de condensator vermindert ook, want die volgt -zoals het hoort- de afnemende U_R. Naarmate de oplaadstroom I vermindert, stijgt de spanning U_C over de condensator langzamer. Als U_C langzamer stijgt, neemt U_R langzamer af, daalt I verder en stijgt U_C nog langzamer. Het hele proces heeft iets van een zichzelf steeds verder vertragende slow-motion-film. Er komt letterlijk geen eind aan.

Bij het ontladen van C in het deel 'Ontladen' van Figuur 4.5-1 (rechts) gebeurt iets vergelijkbaars. De schakelaar S is omgezet, zodat U is afgekoppeld en de beide polen van C

via weerstand R zijn verbonden. De richting van stroom I is omgekeerd. U_R is even groot als U_C, want de aansluitingen van R zijn rechtstreeks verbonden met de polen van C. Door de ontlading daalt U_C. Dus daalt U_R en daalt I. Als I daalt, neemt de ontlaadsnelheid af, dalen U_C en U_R langzamer en daalt I langzamer. Ook dit is een zich almaar verder vertragende slow-motion-film zonder einde.

Foto 4.5-1 toont hoe het laad- en ontlaadproces eruitziet op een oscilloscoopscherm. Voor nu is het voldoende om te weten dat een oscilloscoop een apparaat is dat snel veranderende spanningen op een beeldscherm laat zien. Bij het omschakelen van laden naar ontladen (midden) is de laadkromme nog steeds niet helemaal horizontaal (zoals het hoort). Aan het eind rechts in beeld geldt dat ook voor de ontlaadkromme. Beide helften zijn elkaars spiegelbeeld.

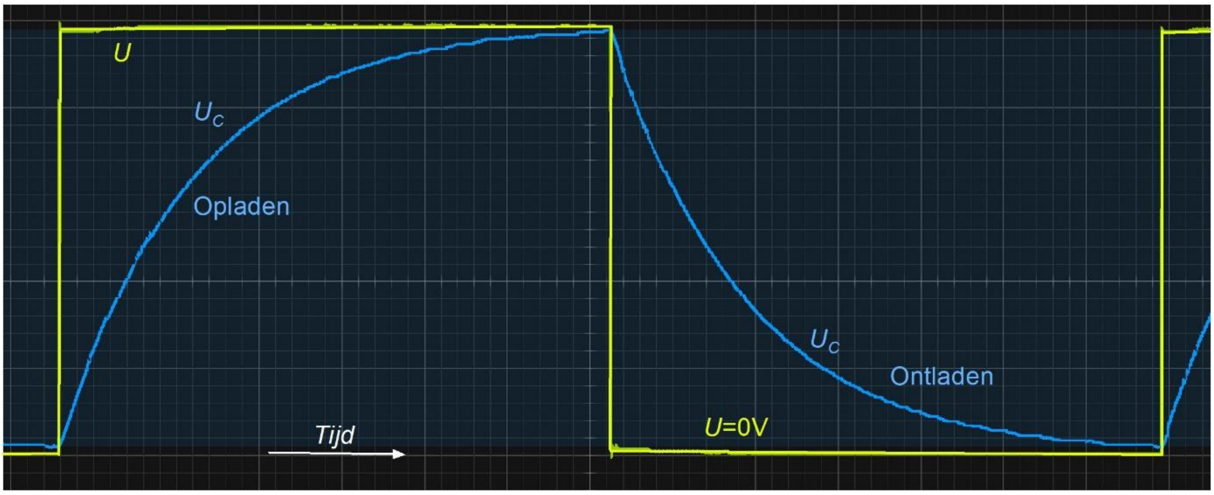


Foto 4.5-1. Oscilloscoopbeeld van het op- en ontladen van de schakeling van Figuur 4.5-1. Het schakelen tussen opladen en ontladen (midden in het beeld) ging voor de opname elektronisch. De eerst stijgende en dan dalende kromme geeft het verloop van U_C in de tijd aan.

4.5.3 De tijdconstante

Natuurkundige processen zoals te zien op Foto 4.5-1 die almaar trager verlopen en waaraan –in theorie- geen eind komt, komen veel voor. Het eindtijdstip is oneindig ver. Daar heb je dus niets aan als het op aanduiden van de snelheid van het systeem aankomt. De tijd waarin bij het opladen een vast (en afgesproken) percentage van het oorspronkelijke spanningsverschil is overbrugd, zegt dan wel wat.

Dat vaste percentage voor een RC-schakeling als in Figuur 4.5-1 is 63,2%. Dat lijkt op het eerste gezicht een vreemd getal, maar er zit een stukje wiskunde achter. De bijbehorende tijd die we de *tijdconstante* noemen, is gelijk aan RC. Met andere woorden: vermenigvuldig de weerstand (in ohm) met de capaciteit (in farad) van de condensator en je krijgt de tijdconstante in seconden. De tijdconstante wordt ook wel aangeduid met het symbool τ, de Griekse letter voor de klank “t”, die “tau” heet. Dus

$$\tau = RC \qquad (4.5\text{-}1)$$

Dat de tijdconstante evenredig is met R en met C, valt ook zonder wiskunde wel te begrijpen. Hoe groter *R*, hoe kleiner de stroom en hoe trager het laadproces. Hoe groter *C*, des te trager het laadproces, want om eenzelfde spanning U_C te krijgen, moet er meer lading de condensator in. De 63% hangt samen met het getal *e*, het grondtal van de natuurlijke logaritme, bekend van hoofdstuk 2 (subparagraaf 2.13.4). Afgerond heeft *e* de waarde 2,7183. Bereken 1-1/*e* op je zakrekenmachine en er komt 0,632…., afgerond 0,63 uit. In het niet verplichte kadertje hieronder staat nog wat meer.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!

Bij processen waarin de groei van een grootheid evenredig is met het overgebleven verschil met zijn eindwaarde, speelt het getal *e* altijd een rol. Met *e* hebben we kennis gemaakt in hoofdstuk 2 als het grondtal van de natuurlijke logaritme. Als het oorspronkelijke spanningsverschil U_0 is en U_t het spanningsverschil op tijdstip *t*, geldt

$$U_t = U_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \qquad (4.5\text{-}2)$$

Het getal *e* heeft een oneindig aantal cijfers achter de komma. De waarde is bij benadering 2,7183. Voor $t=\tau$ vinden we

$$U_t = U_0(1 - e^{-1}) \approx U_0(1 - 0{,}368) \approx 0{,}632U_0 \qquad (t = \tau) \qquad (4.5\text{-}3)$$

En voor $t=2\tau$ vinden we

$$U_t = U_0(1 - e^{-2}) \approx U_0(1 - 0{,}135) \approx 0865U_0 \qquad (t = 2\tau) \qquad (4.5\text{-}4)$$

En zo kun je tot in eeuwigheid doorgaan, zonder dat de 100% ooit wordt bereikt.

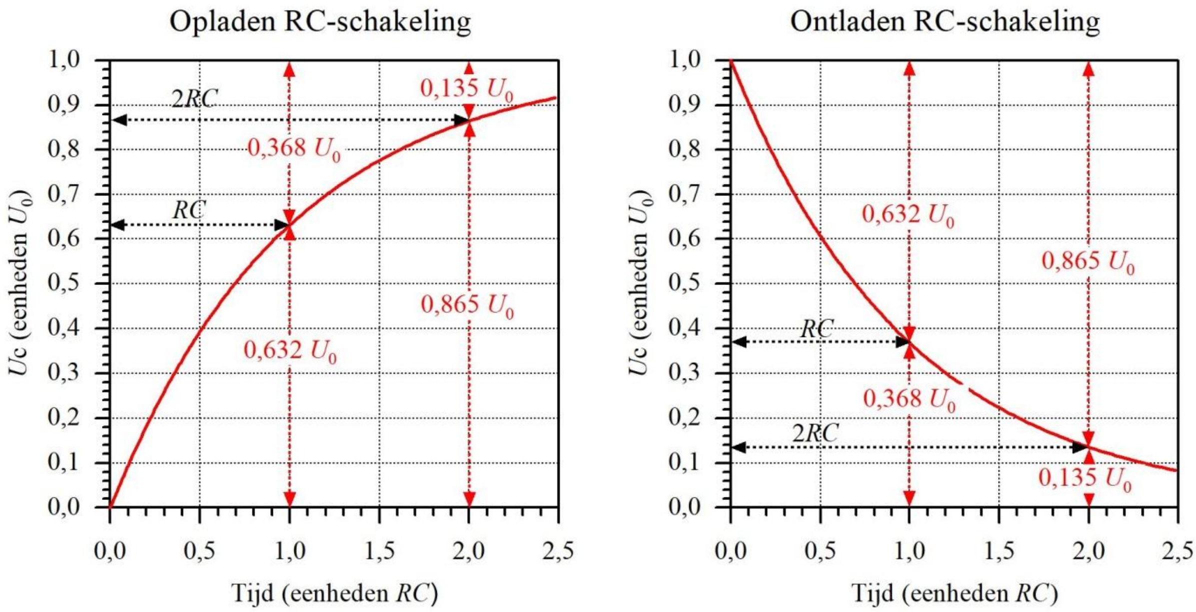
Tabel 4.5-1. Overbrugd en nog te overbruggen percentage van het oorspronkelijke spanningsverschil

Tijd in tijdconstanten τ	Overbrugd (%)	Nog te overbruggen (%)
0	0,00	100,00
1	63,21	36,79
2	86,47	13,53
3	95,02	4,98
4	98,17	1,83
5	99,33	0,67

Bij het opladen bereikt U_C na 2τ 63% plus 63% van de resterende 37% is 86,5%, enzovoort. De 100% wordt nooit bereikt In de praktijk gaan we ervan uit dat na 5τ, dus 5*RC*, geen verandering meer optreedt. Dit alles geldt ook voor het ontladen, want beide krommen zijn elkaars spiegelbeeld, zoals op Foto 4.5-1 te zien is.

4.5.4 Opladen en ontladen van een RC-schakeling grafisch weergegeven

In Figuur 4.5-2 is het verloop in de tijd van opladen en ontladen nog eens grafisch weergegeven. In plaats van τ wordt de uitdrukking RC gebruikt. Beide betekenen hetzelfde, zoals we zagen in vergelijking (4.5-1).

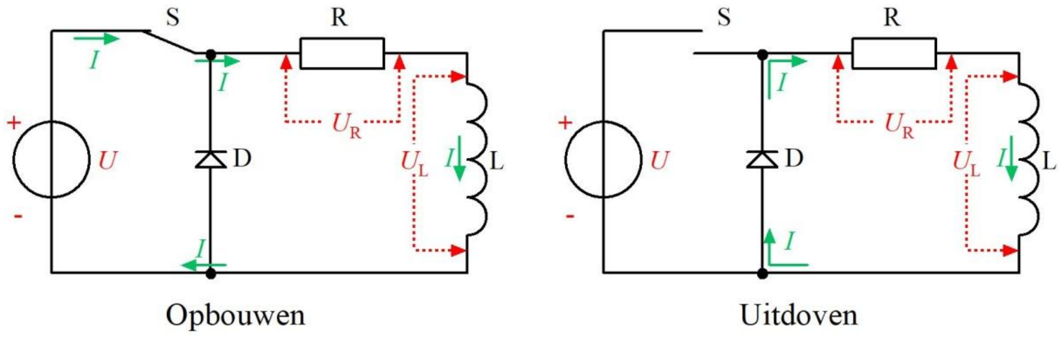


Figuur 4.5-2. Oplaad- en ontlaadgrafiek voor een RC-schakeling zoals die in Figuur 4.5-1. De verticale as staat in eenheden U_0, de spanning U_C die de condensator bij het opladen theoretisch na een oneindige tijd bereikt (links) en de beginspanning op de condensator bij het ontlaadproces (rechts). De tijd op de horizontale as is in eenheden tijdconstante (RC). Daarmee gelden beide grafieken voor alle waarden van R en C.

Beide grafieken zijn, net als op Foto 4.5-1, elkaars spiegelbeeld. Waarden voor de tijdstippen RC en $2RC$ (τ en 2τ) zijn ingetekend.

4.5.5 Weerstanden en spoelen (zelfinducties)

Zoals via een weerstand spanning op een condensator kan worden opgebouwd, kan dat op vergelijkbare manier met stroom in een spoel. In Figuur 4.5-3 zien we een deel ‘opbouwen’ en een deel ‘uitdoven’ in plaats van ‘opladen’ en ‘ontladen’ hiervoor. Termen met ‘laden’ erin worden nu eenmaal eerder in verband gebracht met condensatoren dan met spoelen.



Figuur 4.5-3. Opbouw en uitdoven van de stroom door een RL-schakeling.

De schakelingen tonen een weerstand R in serie met een spoel (zelfinductie) L, een schakelaar en een spanningsbron.

Het deel 'Opbouwen'

In de schakeling 'Opbouwen' komt na inschakelen met schakelaar S de stroom op gang onder invloed van de bronspanning U. Bij een zelfinductie begint de stroom op 0. Dat hebben we gezien in 4.4.3. Ook als de stroom behalve door een spoel ook door een weerstand loopt, is dat zo.

Bij het inschakelen is U_L gelijk aan U en zijn I en U_R gelijk aan 0. De vonkblusdiode doet niets, want de doorlaatrichting is de andere kant op (*de diode spert*, zeggen we dan).

Direct na inschakelen begint I op te lopen. U_R loopt dan ook op, want $U_R = IR$, zegt de wet van Ohm. Dan moet U_L kleiner worden, want U_R en U_L worden samen niet groter dan U. Als U_L kleiner wordt, vertraagt de toename van I. Daardoor vertragen ook de toename van U_R en de afname van U_L. En zo gaat dat door. I neemt daardoor steeds langzamer toe, U_R dus ook en U_L neemt steeds langzamer af. Opnieuw de slow-motionfilm zonder eind dus, maar nu met R en L in plaats van R en C en met I als hoofdrolspeler in plaats van U_C.

In de RC-schakeling groeide de spanning over C steeds langzamer, hier de stroom door L. En inderdaad, er is ook in dit geval een tijdconstante die opnieuw τ heet. Hoe groter de zelfinductie L, des te trager komt I op gang en hoe groter de weerstand, des te kleiner is de eindwaarde van I en des te minder hoeft er op gang te komen. Dus:

$$\tau = \frac{L}{R} \qquad (4.5\text{-}5)$$

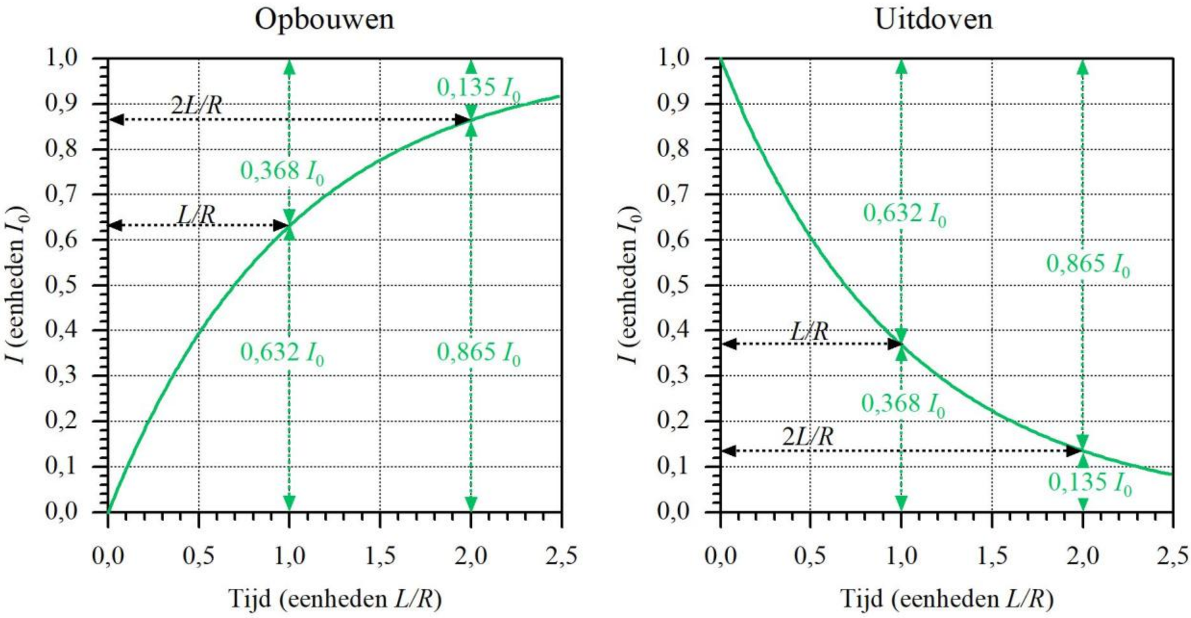
1 henry per ohm is dus 1 s.

Het deel 'Uitdoven'

Het uitdoven van de stroom I begint als de schakelaar S wordt omgezet en de verbinding met de spanningsbron wordt verbroken. De stroom wil onder invloed van het magnetisch veld van L doorlopen en vindt zijn weg door de vonkblusdiode D. Als D geleidt, staat de spanning U_R ook over L. De onderkant van L is nu immers geleidend verbonden met de pluskant van R. Er is daardoor een spanning U_L ontstaan die tegengesteld is aan de oorspronkelijke U_L in het deel 'Opbouwen'. Een tegengestelde U_L bouwt een aan I tegengestelde stroom op. Het netto-resultaat is dat I afneemt. Daardoor nemen U_R en dus ook U_L af; de 'tegen'stroom neemt langzamer toe en I neemt langzamer af. Dezelfde zich alsmaar vertragende slow-motion-film met de tijdconstante τ van vergelijking (4.5-5).

4.5.6 Opbouwen en uitdoven van stroom in een RL-schakeling grafisch weergegeven

Net als voor de RC-schakeling geven we de opbouw- en de uitdovingsgrafieken voor de RL-schakeling. In Figuur 4.5-4 is het verloop in de tijd van opladen en ontladen grafisch weergegeven. In plaats van τ wordt in de grafieken de uitdrukking L/R gebruikt. Beide betekenen hetzelfde, zoals we zagen in vergelijking (4.5-5).



Figuur 4.5-4. Opbouw- en uitdoof grafiek voor een RL-schakeling zoals die in Figuur 4.5-3. De verticale as staat in eenheden I_0, de stroom I die de schakeling bij de opbouw theoretisch na een oneindige tijd bereikt (links) en de beginstroom bij het proces van uitdoven (rechts). De tijd op de horizontale as is in eenheden tijdconstante (L/R). Daarmee gelden beide grafieken voor alle waarden van R en L.

De grafieken zien er net zo uit als die in Figuur 4.5-2. Het enige verschil is dat het in Figuur 4.5-2 om een spanning ging en in Figuur 4.5-4 om een stroom. Voor de rest zijn alle wetmatigheden dezelfde.

4.5.7 Een belangrijke gevolgtrekking

Bij een weerstand lopen spanning en stroom altijd gelijk op. Als er condensatoren of spoelen (capaciteiten en zelfinducties zeggen we meestal) aan te pas komen, is dat niet zo.

Voor RC: In Figuur 4.5-2 verandert bij het opladen de spanning U_C steeds minder. Dan neemt ook de lading van de condensator steeds langzamer toe. Stroom van/naar een condensator is verandering van lading. De laadstroom wordt dus steeds kleiner. De stroom is niet evenredig met de spanning zoals bij een weerstand, maar met de snelheid waarmee de spanning verandert. Bij het ontladen geldt hetzelfde, maar dan in spiegelbeeld. Het ontlaadproces begint met een snelle afname van U_C en een grote stroom I. Naarmate U_C langzamer afneemt, wordt I kleiner. Ook hier dus een I die evenredig is met de spanningsverandering, maar nu een afname. I loopt in omgekeerde richting, terwijl U niet van polariteit verandert.

Voor RL: Als in Figuur 4.5-4 de schakelaar S wordt omgezet, keert de spanning U_L om, maar I blijft in dezelfde richting lopen als toen S nog gesloten was. Bij het uitdoven begint I op niveau I_0. Beide naderen ze naar 0 zonder die eindwaarde te bereiken.

In hoofdstuk 5, waarin we ons met wisselstroom en –spanning zullen bezighouden, zal het niet gelijk op lopen van stroom en spanning in condensatoren en spoelen de basis blijken te zijn van veel schakelingen. We zullen er dan verder op in gaan.

4.6 Parallel- en serieschakeling van condensatoren en spoelen

4.6.1 Verschil tussen parallel- en serieschakeling

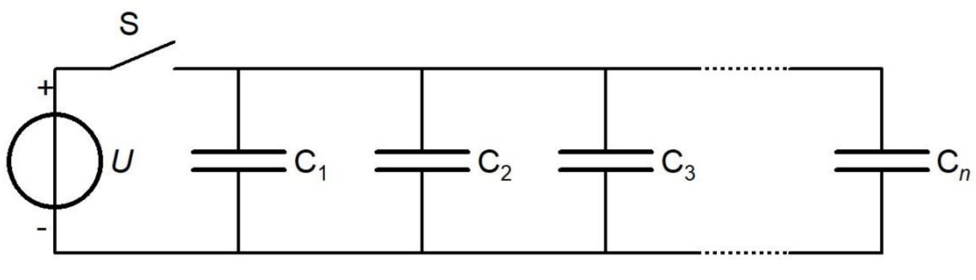
Bij parallel- en bij serieschakeling van weerstanden, van condensatoren en van spoelen kun je voor elke schakeling respectievelijk een vervangende weerstand, capaciteit of zelfinductie berekenen. Voor weerstanden is dat behandeld in Hoofdstuk 3. Voor capaciteiten en zelfinducties –de termen ‘condensatoren’ en ‘spoelen’ mogen ook- doen we dat in deze paragraaf. Er zijn twee eenvoudige uitgangspunten:

1. Bij parallelschakeling is de spanning over alle onderdelen dezelfde.
2. Bij serieschakeling is de stroom door alle onderdelen dezelfde.

Dit geldt voor alles wat je parallel of in serie schakelt.

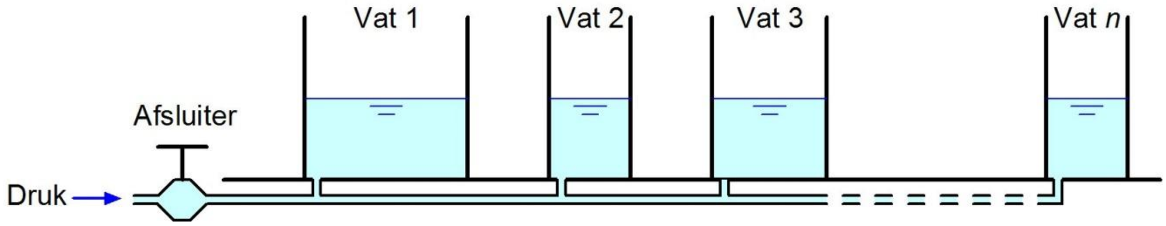
4.6.2 Parallelschakeling van condensatoren, vervangingscapaciteit

Bij parallelschakeling van condensatoren (Figuur 4.6-1) staat over elke condensator dezelfde spanning U. De spanning komt op de condensatoren te staan als schakelaar S wordt gesloten.



Figuur 4.6-1. Parallelschakeling van condensatoren.

De vraag is of we de parallel geschakelde condensatoren in Figuur 4.6-1 kunnen vervangen door één enkele condensator en hoe groot de capaciteit dan is. Vergelijk de condensatoren met communicerende vaten met bodems op gelijke hoogte (Figuur 4.6-2).



Figuur 4.6-2. De condensatoren van Figuur 4.6-1, voorgesteld als communicerende vaten. De afsluiter staat voor de schakelaar S en de druk voor de spanning U.

De hoogte van de waterspiegels in Figuur 4.6-2 wordt bepaald door de druk in de leiding. Die staat voor U die in Figuur 4.6-1 de spanning over de condensatoren bepaalt. De horizontale doorsnede van elk vat staat voor capaciteit C. De hoeveelheid water in elk vat staat voor de lading Q van elke condensator. De totale hoeveelheid water in de vaten is de som van de hoeveelheden per vat. Dat geldt ook voor de totale lading van de condensatoren. Dan is de totale capaciteit de som van de capaciteiten per condensator. De gelijkenis gaat pas mank als vaten overlopen of condensatoren doorslaan.

We krijgen zo op een gemakkelijke manier de vergelijking voor de vervangingscapaciteit C_{tot} van parallel geschakelde condensatoren te pakken:

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \qquad (4.6\text{-}1)$$

Wie graag een net wiskundig bewijs ziet, vindt dat in het kadertje hieronder.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!
Het kan ook op een wiskundig nettere, maar voor sommigen misschien wat lastiger manier. In 4.3 zagen we dat

$$U = \frac{Q}{C} \text{ en dus } Q = UC \tag{4.6-2}$$

De ladingen Q_1 t/m Q_n zijn dus evenredig met de capaciteiten C_1 t/m C_n met U als evenredigheidsconstante. De totale lading Q_{tot} is de som van de ladingen Q_1 tot en met Q_n, dus:

$$Q_{tot} = UC_1 + UC_2 + UC_3 + \cdots + UC_n \tag{4.6-3}$$

En dat is hetzelfde als

$$Q_{tot} = U(C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n) \tag{4.6-4}$$

Nu is

$$Q_{tot} = UC_{tot} \tag{4.6-5}$$

Dan is dus

$$UC_{tot} = U(C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n) \tag{4.6-6}$$

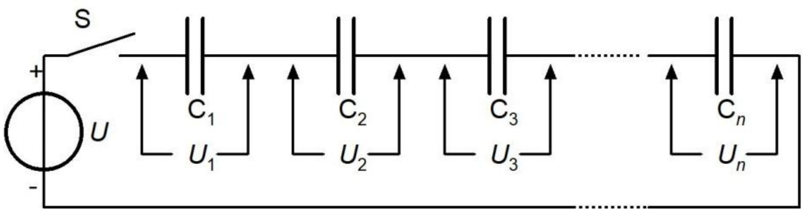
Aan beide kanten van het = teken delen door U levert nu vergelijking (4.6-1)

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \tag{4.6-1}$$

Bij parallelle C's tel je dus de capaciteiten op. Dat gaat anders dan bij weerstanden. Daar moeten bij parallelschakeling alle $^1/_R$ worden opgeteld om $^1/_{R_{tot}}$ te vinden.

4.6.3 Serieschakeling van condensatoren

Bij serieschakeling is de stroom door alle condensatoren dezelfde. Kan een stroom dan door een diëlektricum lopen? Het antwoord is nog steeds nee. Wat gebeurt er dan wel?



Figuur 4.6-3. Serieschakeling van condensatoren.

We bekijken Figuur 4.6-3. Als schakelaar S wordt gesloten, vloeit er lading naar de linkerplaat van C_1. In het diëlektricum van C_1 ontstaat een elektrisch veld. Door dat veld wordt evenveel lading uit de rechterplaat van C_1 ge'duwd' als er op de linkerplaat in is gekomen. Die lading komt op de linkerplaat van C_2 terecht. Er wordt dan evenveel lading uit de rechterplaat van C_2 geduwd als er links is binnengekomen. Zo gaat dat door tot en met C_n. De lading die uit C_n wordt geduwd, vloeit terug naar de spanningsbron.

De stroom duurt maar heel kort, zagen we in Figuur 4.3-2. In elke C loopt dezelfde stroom gedurende dezelfde tijd. In vergelijking (4.3-2) in paragraaf 4.3.2 zagen we dat lading gelijk is aan stroom maal tijd, mits de stroom gedurende die tijd dezelfde blijft.

Als I en t voor elke condensator gelijk zijn, dan hebben alle condensatoren in het rijtje van Figuur 4.6-3 dezelfde lading Q gekregen. Die Q is ook dezelfde voor de totale rij. Het verschil tussen de afzonderlijke condensatoren zit in de spanning. Over de kleinste condensator staat de grootste spanning, want $Q=U_xC_x$. Als C_x de kleinste is, moet U_x de grootste zijn om op dezelfde Q te komen. Voor de grootste C geldt het omgekeerde.

Een vergelijking met watervaten is hier niet aan de orde. Maar we kunnen wel vermoeden hoe het met de vervangingscapaciteit C_{tot} zit. Voor parallel geschakelde condensatoren moesten we de capaciteiten optellen om de vervangingscapaciteit te vinden. Voor parallel geschakelde weerstanden moeten we de omgekeerde waarden optellen om de omgekeerde waarde van de vervangingsweerstand te vinden (hoofdstuk 3). De veronderstelling dat we bij in serie geschakelde condensatoren net zo moeten rekenen als bij parallel geschakelde weerstanden ligt dan ook voor de hand. En zo zit het ook. Dus:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots \frac{1}{C_n} \qquad (4.6\text{-}7)$$

Wie wil, kan de wiskundige afleiding in het kadertje hieronder vinden.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!
Voor de totale spanning U over de schakeling geldt dat

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n \qquad (4.6\text{-}8)$$

U wordt opgedeeld in stukjes $U_1 \dots U_n$ die samen U zijn. Dat gaat dus net zo als bij serieschakeling van cellen tot een batterij (hoofdstuk 3). Uit vergelijking (4.3-4) in paragraaf 4.3.3 weten we dat voor een geladen condensator geldt:

$$U = \frac{Q}{C} \qquad (4.3\text{-}4)$$

En dus kunnen we in plaats van elke U de bijbehorende Q/C opschrijven. We weten al dat de lading Q voor elke condensator dezelfde is. Alleen de capaciteiten mogen per condensator verschillen. Als C_{tot} de vervangingscapaciteit voor de serieschakeling is met ook daarin dezelfde lading Q, dan kunnen we schrijven

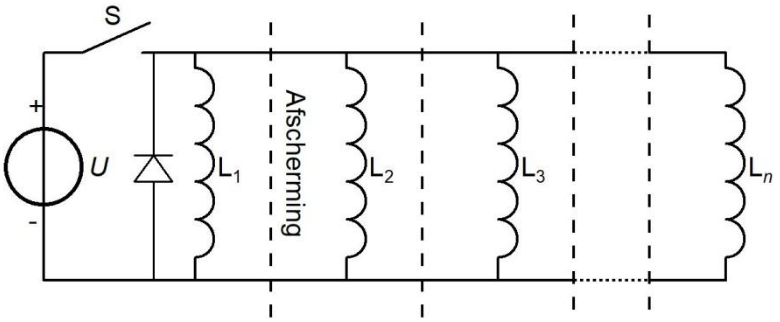
$$\frac{Q}{C_{tot}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \cdots \frac{Q}{C_n} \qquad (4.6\text{-}9)$$

Delen door Q aan beide kanten van het = teken laat de gelijkheid in stand en geeft de vergelijking voor de berekening van C_{tot} zoals we al vermoedden dat die zou zijn:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots \frac{1}{C_n} \qquad (4.6\text{-}7)$$

4.6.4 Parallelschakeling van spoelen

We zien de schakeling in Figuur 4.6-4.



Figuur 4.6-4. Parallel geschakelde spoelen met vonkblusdiode en onderlinge afscherming.

De functie van de vonkblusdiode in Figuur 4.6-4 is besproken in 4.4.3. In de figuur zijn de spoelen onderling afgeschermd, zodat ze elkaar niet beïnvloeden. Een afscherming kan bijvoorbeeld bestaan uit *mu-metaal* (4.2.2). Opsluiten in ferriet kan ook.

Bij sluiten van schakelaar S staat over alle spoelen dezelfde spanning U. De stroom loopt daarna voor elke spoel evenredig met de tijd op volgens vergelijking (4.4-1). De stromen verhouden zich dus op ieder tijdstip na sluiten van S volgens de omgekeerde waarde van de zelfinductie L van de bijbehorende spoel. De totale stroom door de schakeling is de som van al die afzonderlijke stromen, net als bij parallel geschakelde weerstanden. De wet van Kirchhoff uit hoofdstuk 3 dus. Daar was de stroom omgekeerd evenredig met de weerstand R. Dan ligt de gelijkenis met weerstanden voor de hand:

$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \frac{1}{L_n} \qquad (4.6\text{-}10)$$

De liefhebbers kunnen in het kadertje zien of het klopt.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!

Als we de vervangingswaarde van de spoelen L_{tot} noemen, geldt

$$I_{tot} = \frac{Ut}{L_{tot}} \qquad (4.6\text{-}11)$$

Eigenlijk is dit vergelijking (4.4-1). De totale stroom I_{tot} op tijdstip t is de som van de stromen door de afzonderlijke spoelen op datzelfde tijdstip:

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n \qquad (4.6\text{-}12)$$

Als we vergelijkingen (4.6-11) en (4.6-12) samenvoegen, krijgen we

$$\frac{Ut}{L_{tot}} = I_{tot} = \frac{Ut}{L_1} + \frac{Ut}{L_2} + \frac{Ut}{L_3} + \cdots + \frac{Ut}{L_n} \qquad (4.6\text{-}13)$$

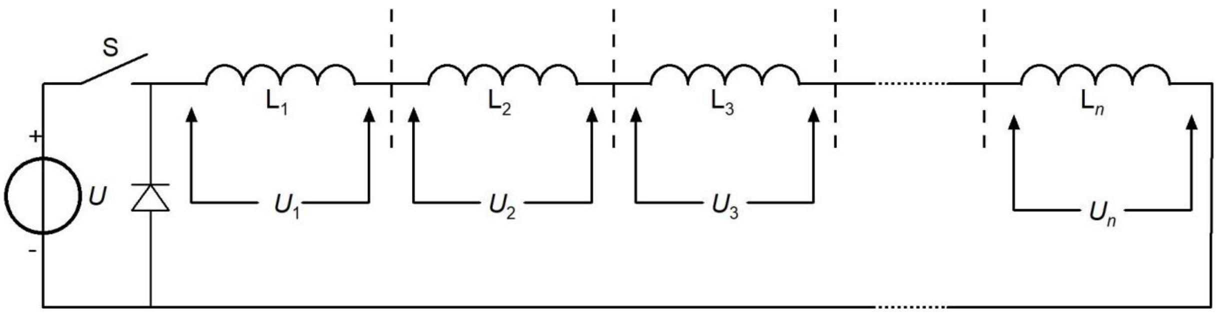
We delen aan weerskanten van het = teken door U en door t en houden inderdaad over

$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \frac{1}{L_n} \qquad (4.6\text{-}10)$$

Vergelijking (4.6-10) voor de vervangingswaarde L_{tot} van parallel geschakelde spoelen is dezelfde als die voor parallel geschakelde weerstanden en in serie geschakelde condensatoren (vergelijking (4.6-7) in 4.6.3). Er resteert nog één schakeling. Dat is de

4.6.5 Serieschakeling van spoelen

Figuur 4.6-5 toont een aantal in serie geschakelde spoelen met bijbehorende afscherming.



Figuur 4.6-5. Serieschakeling van spoelen met vonkblusdiode en onderlinge afscherming.

In 4.6.4 bleek de berekening van de vervangingsweerstand bij parallel geschakelde spoelen gelijk aan die bij parallel geschakelde weerstanden. Met in serie geschakelde spoelen zou dat dus ook wel eens net zo kunnen zijn. Dus

$$L_{tot} = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n \quad (4.6\text{-}14)$$

De liefhebbers kunnen in het kadertje bekijken of het allemaal wiskundig in orde is.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!
Na inschakelen van de spanning door het sluiten van schakelaar S groeit er een stroom I. Die is in alle spoelen dezelfde. De totale spanning U is de som van de spanningen over de spoelen, dus U_1 tot en met U_n. Op elk tijdstip t, gerekend vanaf het ogenblik van inschakelen, geldt voor de stroom I weer

$$I = \frac{Ut}{L_{tot}} \text{ en dus ook } U = \frac{IL_{tot}}{t} \quad (4.6\text{-}15)$$

Voor alle afzonderlijke spoelen geldt hetzelfde, dus

$$U_1 = \frac{IL_1}{t}, \qquad U_2 = \frac{IL_2}{t}, \qquad U_3 = \frac{IL_3}{t}, \qquad U_n = \frac{IL_n}{t} \quad (4.6\text{-}16)$$

De som van alle spanningen over de afzonderlijke spoelen is U, dus

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n \quad (4.6\text{-}17)$$

In plaats van vergelijking (4.6-17) mogen we ook schrijven

$$\frac{IL_{tot}}{t} = \frac{IL_1}{t} + \frac{IL_2}{t} + \frac{IL_3}{t}, + \cdots + \frac{IL_n}{t} \quad (4.6\text{-}18)$$

Door alles te delen door I en te vermenigvuldigen met t houden we de gelijkheid in stand en hier rolt inderdaad vergelijking (4.6-14) uit, dus

$$L_{tot} = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n \quad (4.6\text{-}14)$$

De zelfinducties van in serie geschakelde spoelen moet je dus optellen om de vervangende waarde te vinden, net als bij weerstanden.

4.6.6 Samenvattend overzicht

Het overzicht is weergegeven in Tabel 4.6-1.

Tabel 4.6-1 Overzicht van vergelijkingen voor de vervangingswaarde bij parallel- en serieschakeling van weerstanden, condensatoren en spoelen. De stof voor weerstanden is behandeld in Hoofdstuk 3.

Soort schakeling	Weerstand R	Capaciteit C	Zelfinductie L
Serie	$R_{tot} = R_1 + \cdots + R_n$	$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \cdots + \frac{1}{C_n}$	$L_{tot} = L_1 + \cdots + L_n$
Parallel	$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \cdots + \frac{1}{R_n}$	$C_{tot} = C_1 + \cdots + C_n$	$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \cdots + \frac{1}{L_n}$

4.7 Opgaven

4.7.1 Hoe werkt dit?

Deze paragraaf bevat meerkeuzevragen volgens examenmodel over de in dit hoofdstuk behandelde stof. Om van een opgave naar de bijbehorende uitwerking te komen, klik je op de pijl die er zo uitziet:

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

Bij de uitwerking is het juiste antwoord vet gedrukt, maar veel belangrijker is meestal de uitwerking zelf. Na de uitwerking vind je een pijl die je terugbrengt naar de opgave. Die ziet er zo uit:

Terug naar de opgave

Wil je met de volgende opgave aan de slag, dan klik je op deze pijl:

Naar de volgende opgave

Bij de uitwerking van de laatste opgave ontbreekt deze laatste pijl en is er alleen de rode pijl die je terugbrengt naar de opgave. Veel meer opgaven vind je in de examentraining bij dit hoofdstuk op de cursussite.

4.7.2 Opgave 4-1

De spanning over een luchtcondensator bedraagt 20 V. De polen (platen) hebben een onderlinge afstand van 0,5 mm. De veldsterkte E tussen de polen bedraagt

A. 10 V/m
B. 10 kV/m
C. 40 kV/m
D. 40 V/m

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.3 Opgave 4-2

Een condensator wordt opgeladen met 0,1 A. Op het begintijdstip van het opladen bedraagt de spanning over de condensator 0 V. Na 1 seconde is de spanning opgelopen tot 100 V.

De capaciteit van de condensator bedraagt

A. 10 F
B. 0,1 F
C. 100 mF
D. 1000 μF

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.4 Opgave 4-3

Een spoel wordt aangesloten op een spanningsbron van 1 V die 20 A kan leveren. Na 10 seconden is de stroom door de spoel opgelopen tot 10 A.

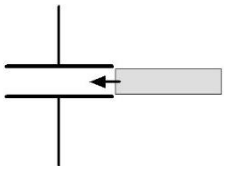
De zelfinductie van de spoel bedraagt

A. 1 H
B. 10 H
C. 100H
D. 0,1 H

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.5 Opgave 4-4

Tussen de platen van een luchtcondensator wordt een precies passende plaat geschoven met een diëlektrische constante van 5.



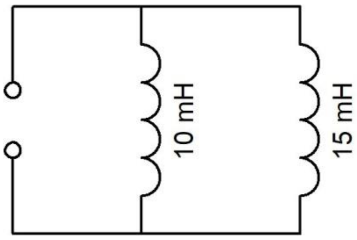
De capaciteit zal daardoor

A. 5x zo klein worden
B. Gelijk blijven
C. 5x zo groot worden
D. 25x zo groot worden

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.6 Opgave 4-5

De spoelen in de figuur hieronder zijn geleidend verbonden zoals aangegeven. Verder zijn ze niet gekoppeld.



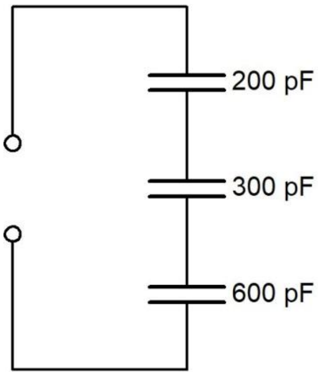
De vervangingswaarde van de twee zelfinducties is ongeveer

A. 6 mH
B. 7,5 mH
C. 12,5 mH
D. 25 mH

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.7 Opgave 4-6

Drie condensatoren van 200, 300 en 600 pF worden in serie geschakeld.



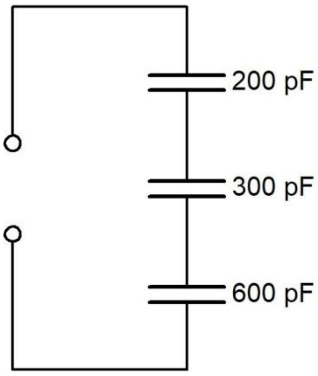
De vervangingscapaciteit is:

A. 1100 pF
B. 100 pF
C. 367 pF
D. 120 pF

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.8 Opgave 4-7

Op de klemmen van de schakeling wordt een spanningsbron aangesloten.



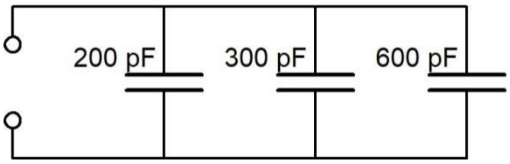
Over welke condensator is de spanning het hoogst?

A. Dat is niet te zeggen, want een condensator geleidt niet
B. Over alle condensatoren even hoog
C. De condensator van 200 pF
D. De condensator van 600 pF

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.9 Opgave 4-8

Drie condensatoren van 200, 300 en 600 pF worden parallel geschakeld.



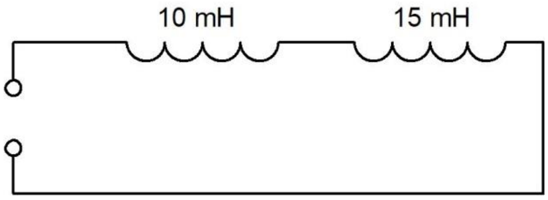
De vervangingscapaciteit is:

A. 1100 pF
B. 100 pF
C. 367 pF
D. 120 pF

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.10 Opgave 4-9

De spoelen in de figuur hieronder zijn geleidend verbonden zoals aangegeven. Verder zijn ze niet gekoppeld.



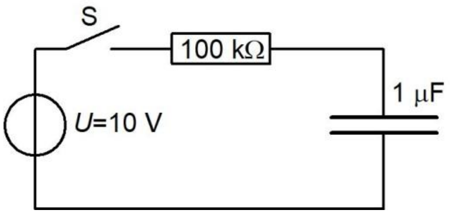
De vervangingswaarde van de twee zelfinducties is ongeveer

A. 6 mH
B. 7,5 mH
C. 12,5 mH
D. 25 mH

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.11 Opgave 4-10

De spanning over de condensator is vóór het sluiten van schakelaar S 0 V.



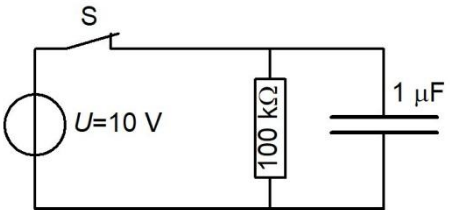
0,1 seconde na het sluiten van S bedraagt de spanning over de condensator

A. Ongeveer 6,3 V
B. 10 V
C. 0 V
D. Ongeveer 3,7 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.12 Opgave 4-11

De schakelaar S is gesloten, zodat de condensator is verbonden met de spanningsbron.

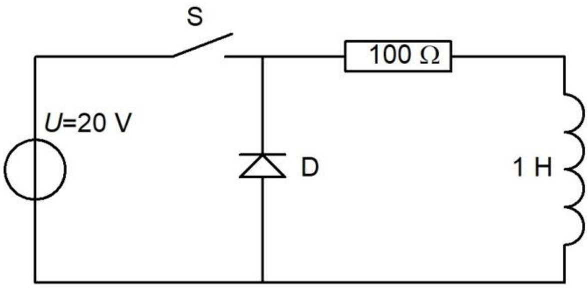


0,1 seconde na openen van S (getekend als verbreekcontact) bedraagt de spanning over de condensator

A. Ongeveer 6,3 V
B. 10 V
C. 0 V
D. Ongeveer 3,7 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.13 Opgave 4-12
Als de schakelaar S wordt gesloten, loopt er nog geen stroom door de spoel. De vonkblusdiode D is ideaal verondersteld.



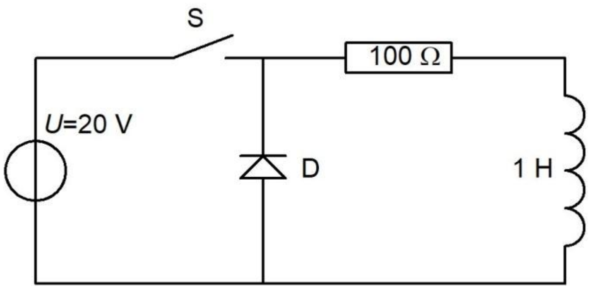
10 ms na sluiten van schakelaar S loopt er een stroom door de spoel en de weerstand van ongeveer

A. 200 mA
B. 126 mA
C. 74 mA
D. 2 A

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.14 Opgave 4-13

10 minuten na sluiten wordt schakelaar S in de figuur weer geopend.



10 ms na openen bedraagt de stroom door spoel en weerstand ongeveer

A. 126 mA
B. 0 mA
C. 74 mA
D. 0,64 A

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.7.15 Opgave 4-14

Een in een enkele laag gewikkelde spoel wordt vervangen door een exemplaar met een 2x zo grote diameter. Het aantal windingen, de bewikkelde lengte en het kernmateriaal blijven onveranderd.

De zelfinductie wordt daardoor

A. 2x zo groot
B. Half zo groot
C. 4x zo groot
D. Niet veranderd

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

4.8 Uitwerkingen

4.8.1 Uitwerking van Opgave 4-1

De spanning over een luchtcondensator bedraagt 20 V. De polen (platen) hebben een onderlinge afstand van 0,5 mm. De veldsterkte E tussen de polen bedraagt

A. 10 V/m
B. 10 kV/m
C. 40 kV/m
D. 40 V/m

Uitwerking

De elektrische veldsterkte E tussen twee condensatorplaten met onderlinge afstand d en een spanning U over de condensatorplaten bereken je met vergelijking (4.3-1):

$$E = \frac{U}{d}$$

Het is dan een kwestie van invullen van U = 20 V en d = 0,5 mm = $0{,}5.10^{-3}$ m. De berekening:

$$E = \frac{20}{0{,}5.10^{-3}}\,\mathrm{V/m} = 40.10^{3}\ \mathrm{V/m} = 40\ \mathrm{kV/m}$$

Antwoord C dus.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.2 Uitwerking van Opgave 4-2

Een condensator wordt opgeladen met 0,1 A. Op het begintijdstip van het opladen bedraagt de spanning over de condensator 0 V. Na 1 seconde is de spanning opgelopen tot 100 V.

De capaciteit van de condensator bedraagt

A. 10 F
B. 0,1 F
C. 100 mF
D. 1000 μF

Uitwerking

Uit lading en spanning is de capaciteit van een condensator te berekenen. Daarvoor hebben we de vergelijking

$$U = \frac{Q}{C}$$

Daaruit volgt

$$C = \frac{Q}{U}$$

U hebben we, de lading moeten we berekenen uit de stroom en zijn tijdsduur. 1 A is 1 C per seconde (1C/s). De laadtijd is 1 seconde, de laadstroom 0,1 A = 0,1 C/s.. Daaruit volgt dat de lading 0,1 C moet bedragen. En dus:

$$C = \frac{0{,}1}{100}\,\mathrm{F} = 1\ \mathrm{mF} = 1000\mu\mathrm{F}$$

Dat wordt antwoord D.

Opmerking

Verwar niet de rechtopstaande C van coulomb, de eenheid van lading, met de cursieve *C* voor capaciteit. De eerste is een eenheid en hoort rechtop, de tweede een grootheid en die hoort cursief. Bij het zendexamen houdt men zich overigens niet aan deze internationale standaard, maar uit de tekst van de opgave blijkt doorgaans wel, wat wat is.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.3 Uitwerking van Opgave 4-3

Een spoel wordt aangesloten op een spanningsbron van 1 V die 20 A kan leveren. Na 10 seconden is de stroom door de spoel opgelopen tot 10 A.

De zelfinductie van de spoel bedraagt

A. 1 H
B. 10 H
C. 100H
D. 0,1 H

Uitwerking

De toename van de stroom is 10 A in 10 s. Dat speelt zich af bij een spanning over de spoel van 1 V. Daarmee valt de zelfinductie te berekenen uit

$$I = \frac{Ut}{L}$$

Dat is hetzelfde als

$$L = \frac{Ut}{I}$$

Invullen:

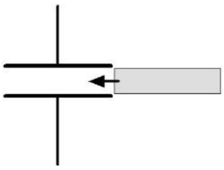
$$L = \frac{1.10}{10}\ \mathrm{H} = 1\ \mathrm{H}$$

Antwoord A.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.4 Uitwerking van Opgave 4-4

Tussen de platen van een luchtcondensator wordt een precies passende plaat geschoven met een diëlektrische constante van 5.



De capaciteit zal daardoor

A. 5x zo klein worden
B. Gelijk blijven
C. 5x zo groot worden
D. 25x zo groot worden

Uitwerking

De capaciteit C van een condensator is evenredig met de diëlektrische constante ε_r volgens

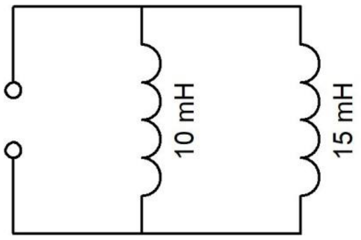
$$C = 0{,}0885\varepsilon_r \frac{A}{d}$$

De diëlektrische constante van lucht is praktisch 1. Als die constante door tussenschuiven van een ander diëlektricum 5x zo groot wordt, wordt C dat ook: antwoord C.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.5 Uitwerking van Opgave 4-5

De spoelen in de figuur hieronder zijn geleidend verbonden zoals aangegeven. Verder zijn ze niet gekoppeld.



De vervangingswaarde van de twee zelfinducties is ongeveer

A. 6 mH
B. 7,5 mH
C. 12,5 mH
D. 25 mH

Uitwerking

De vervangingswaarde L_{tot} van twee parallel geschakelde spoelen L_1 en L_2 is kleiner dan de kleinste. Dat sluit de antwoorden C en D uit. De waarde van L_{tot} volgt uit

$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

Met twee spoelen kan het ook zo (net als bij twee parallelle weerstanden):

$$L_{tot} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

zodat

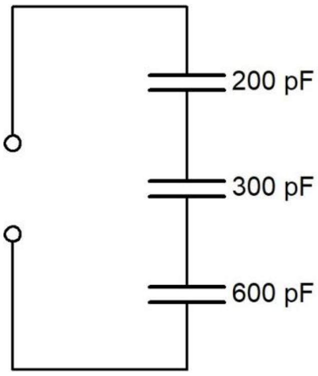
$$L_{tot} = \frac{10.15}{10 + 15}\,\text{mH} = \frac{150}{25}\,\text{mH} = 6\ \text{mH}$$

Antwoord A is daarom het goede antwoord.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.6 Uitwerking van Opgave 4-6

Drie condensatoren van 200, 300 en 600 pF worden in serie geschakeld.



De vervangingscapaciteit is:

A. 1100 pF
B. 100 pF
C. 367 pF
D. 120 pF

Uitwerking

De vervangingswaarde van in serie geschakelde condensatoren wordt net zo berekend als die van parallel geschakelde weerstanden of spoelen. De uitkomst, C_{tot}, moet kleiner zijn dan de kleinste van de in serie geschakelde condensatoren. De antwoorden A en C kunnen we op grond hiervan al meteen afschrijven, zodat B en D als finalisten overblijven. Nu de winnaar nog. Daar gaat-ie:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{200\ \text{pF}} + \frac{1}{300\ \text{pF}} + \frac{1}{600\ \text{pF}} = \frac{3}{600\ \text{pF}} + \frac{2}{600\ \text{pF}} + \frac{1}{600\ \text{pF}} = \frac{6}{600\ \text{pF}}$$

Dat levert:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{6}{600\ \text{pF}} = \frac{1}{100\ \text{pF}}$$

Zodat C_{tot} = 100 pF. Antwoord B.

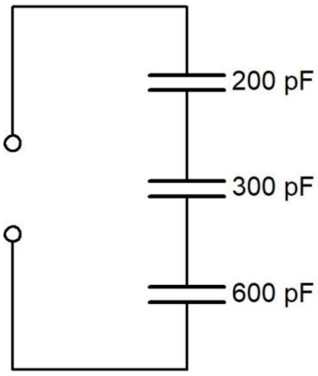
Opmerking

De uitkomst bij een opgave als deze is altijd kleiner dan de kleinste capaciteit in de schakeling. In dit geval voldoen de uitkomsten B en D daaraan. Dus er moet hoe dan ook gerekend worden. Maar als je geluk hebt, is maar één antwoord kleiner dan de kleinste capaciteit. Dan kan alleen dat antwoord het juiste zijn en is rekenwerk overbodig.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.7 Uitwerking van Opgave 4-7

Op de klemmen van de schakeling wordt een spanningsbron aangesloten.



Over welke condensator is de spanning het hoogst?

A. Dat is niet te zeggen, want een condensator geleidt niet
B. Over alle condensatoren even hoog
C. De condensator van 200 pF
D. De condensator van 600 pF

Uitwerking

Als zich lading naar de bovenste condensator verplaatst, verplaatst zich evenveel lading van de bovenste naar de middelste condensator en van daaruit naar de onderste. Dat sluit antwoord A uit.

Het verband tussen capaciteit, lading en spanning is

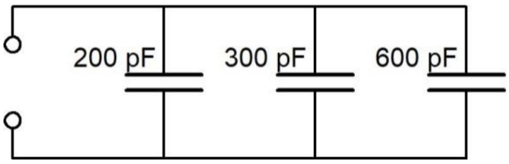
$$Q = UC$$

Eigenlijk laat dit het antwoord al zien, want als Q in alle condensatoren even groot is, moet de hoogste spanning U over de kleinste C staan. Dat betekent dat antwoord C het juiste antwoord is.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.8 Uitwerking van Opgave 4-8

Drie condensatoren van 200, 300 en 600 pF worden parallel geschakeld.



De vervangingscapaciteit is:

A. 1100 pF
B. 100 pF
C. 367 pF
D. 120 pF

Bij parallel geschakelde condensatoren worden de capaciteiten bij elkaar opgeteld om de vervangingswaarde te vinden. De optelling levert 1100 pF. Antwoord A.

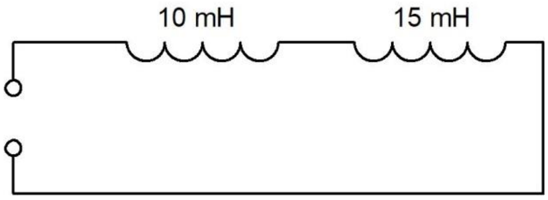
Opmerking

Hoewel de berekening eenvoudiger is dan bij in serie geschakelde condensatoren, kan het soms nog eenvoudiger: als er, zoals hier, maar één antwoord een capaciteit is die groter is dan de grootste waarde in het schema, dan is dat het goede antwoord. Zijn het er meer dan één, dan moet er toch worden gerekend.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.9 Uitwerking van Opgave 4-9

De spoelen in de figuur hieronder zijn geleidend verbonden zoals aangegeven. Verder zijn ze niet gekoppeld.



De vervangingswaarde van de twee zelfinducties is ongeveer

A. 6 mH
B. 7,5 mH
C. 12,5 mH
D. 25 mH

Uitwerking

In serie geschakelde spoelen worden opgeteld om de vervangingswaarde te vinden, net als in serie geschakelde weerstanden en parallel geschakelde condensatoren (mits de spoelen niet op een andere manier zijn gekoppeld, maar dat komt in volgende hoofdstukken).

10 + 15 = 25. Dat moet antwoord D zijn.

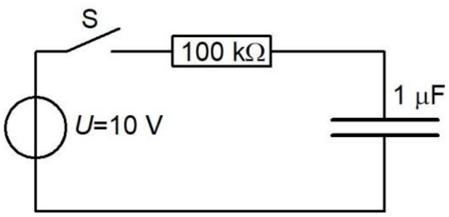
Opmerking

Kijk bij serieschakeling van spoelen eerst of er soms maar één antwoord groter is dan de zelfinductie van de grootste spoel in de schakeling. Dat is dan het juiste antwoord. Vooral bij opgaven met meer dan twee spoelen kan dit wat kostbare examentijd schelen.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.10 Uitwerking van Opgave 4-10

De spanning over de condensator is vóór het sluiten van schakelaar S 0 V.



0,1 seconde na het sluiten van S bedraagt de spanning over de condensator

A. **Ongeveer 6,3 V**
B. 10 V
C. 0 V
D. Ongeveer 3,7 V

Uitwerking

Bij zo'n RC-schakeling hoor je meteen aan de tijdconstante *RC* te denken. Die moesten we dus maar eens uitrekenen.

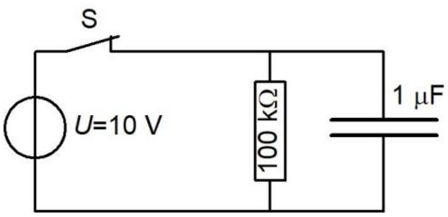
100 kΩ = 10^5 Ω en 1 μF = 10^{-6} F. Vermenigvuldigd is dat 10^{-1} s = 0,1 s. De tijdconstante van dit geheel is dus 0,1 s, net zo lang als de schakelaar gesloten was.

Het oorspronkelijke verschil tussen de spanning van de bron en die over de condensator is 10 V -0 V is 10 V. Na 1 tijdconstante $\tau = RC$ = 0,1 seconde is de spanning over de condensator opgelopen naar ongeveer 63% van 10 V is 6,3 V. Antwoord A.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.11 Uitwerking van Opgave 4-11

De schakelaar S is gesloten, zodat de condensator is verbonden met de spanningsbron.



0,1 seconde na openen van S (getekend als verbreekcontact) bedraagt de spanning over de condensator

A. Ongeveer 6,3 V
B. 10 V
C. 0 V
D. Ongeveer 3,7 V

Uitwerking

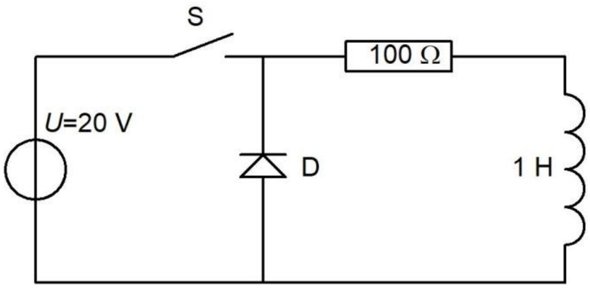
Net als in Opgave 4-10 is sprake van een tijdconstante, al staan weerstand en condensator nu parallel en niet in serie. De condensator laadt zich bij het sluiten van de schakelaar praktisch volledig op, maar bij het openen van de schakelaar ontlaadt de condensator zich via de weerstand van 100 kΩ. De tijdconstante is 10^5 Ω maal 10^{-6} F is 10^{-1} s, ofwel 0,1 s. Als de schakelaar opengaat is de spanning over de condensator 10 V. Na 0,1 s is daarvan ongeveer 63% verdwenen en dus is er nog ongeveer 37 % is ongeveer 3,7 V over.

Dat is antwoord D.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.12 Uitwerking van Opgave 4-12

Als de schakelaar S wordt gesloten, loopt er nog geen stroom door de spoel. De vonkblusdiode D is ideaal verondersteld.



10 ms na sluiten van schakelaar S loopt er een stroom door de spoel en de weerstand van ongeveer

A. 200 mA
B. 126 mA
C. 74 mA
D. 2 A

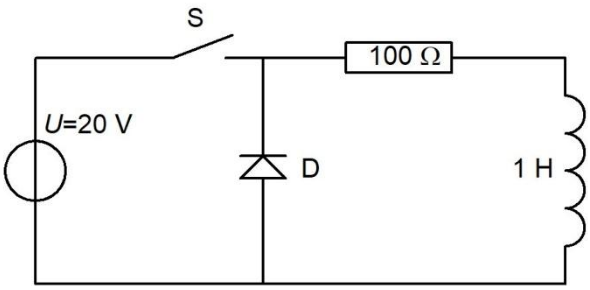
Uitwerking

De tijdconstante $\tau = {}^{L}/_{R}$. Dat komt neer op ${}^{1}/_{100}$ seconde is 0,01 s is 10 ms. Na het sluiten van de schakelaar zal de stroom uiteindelijk ${}^{20\ \mathrm{V}}/_{100\ \Omega}$ is 200 mA bereiken. Na een tijdsbestek van 1 tijdconstante, dus 10 ms, na het openen van de schakelaar is daarvan ongeveer 63% gerealiseerd, dat is ongeveer 126 mA. Antwoord B

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.13 Uitwerking van Opgave 4-13

10 minuten na sluiten wordt schakelaar S in de figuur weer geopend.



10 ms na openen bedraagt de stroom door spoel en weerstand ongeveer

A. 126 mA
B. 0 mA
C. 74 mA
D. 0,64 A

Uitwerking

De tijdconstante τ is $\tau = {}^{L}/_{R}$. Dat komt neer op ${}^{1}/_{100}$ seconde is 0,01 s is 10 ms. Dan mag je ervan uitgaan dat na 10 minuten de stroom door de schakeling zijn maximum praktisch gesproken heeft bereikt. Dat maximum is ${}^{20\ \mathrm{V}}/_{100\ \Omega}$ is 200 mA.

Als de schakelaar weer opengaat, dooft de stroom uit. Er moet 200 mA worden afgebouwd. Na 1 tijdconstante is van die afbouw ongeveer 63% gerealiseerd, zodat er van de oorspronkelijke stroom van 200 mA nog ongeveer 37% over is, dat is 0,37 maal 200 mA is 74 mA. Antwoord C is daarom het goede antwoord.

Terug naar de opgave Naar de volgende opgave

4.8.14 Uitwerking van Opgave 4-14

Een in een enkele laag gewikkelde spoel wordt vervangen door een exemplaar met een 2x zo grote diameter. Het aantal windingen, de bewikkelde lengte en het kernmateriaal blijven onveranderd.

De zelfinductie wordt daardoor

A. 2x zo groot
B. Half zo groot
C. 4x zo groot
D. Niet veranderd

Uitwerking

De (coëfficiënt van) zelfinductie van een enkellaags spoel wordt benaderd met

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r n^2 A}{l}$$

Daarin is $\mu_0\mu_r$ de permeabiliteit, n het aantal windingen, A de doorsnede (niet te verwarren met de diameter!) en l de lengte van de spoel.

Als de diameter 2x zo groot wordt, wordt de doorsnede A 4x zo groot. Volgens de vergelijking wordt L dan ook 4x zo groot als er verder niets verandert. Antwoord C is daarom het juiste antwoord.

Opmerking

Dit is een opgave uit een werkelijk examen. Wat hier ontbreekt, is informatie over de spoel. De gebruikte vergelijking geldt alleen voor een spoel die veel langer is dan dik. Zie de kanttekeningen in subparagraaf 4.4.5. In werkelijkheid zal de nieuwe zelfinductie, afhankelijk van de afmetingen van de spoel, 3-4 keer zo groot woerden.

Mocht je op een examen een opgave als deze zonder informatie over de spoel tegenkomen: doen of je gek bent en de vergelijking in de uitwerking consequent uitvoeren.

Terug naar de opgave

Meer opgaven vind je in de examentraining bij dit hoofdstuk