

Elektronica

- § 1 Spanningsbronnen
- § 2 Weerstanden en diodes
- § 3 Spanningsdeler, IC, opamp
- § 4 Stroomsterkte en lading
- § 5 Condensator
- § 6 Een condensator op- en ontladen
- § 7 De 555 timer
- § 8 Het frequentieafhankelijke gedrag van een condensator
- § 9 Met een opamp een signaal versterken
- § 10 Zeer eenvoudige transistorschakelingen

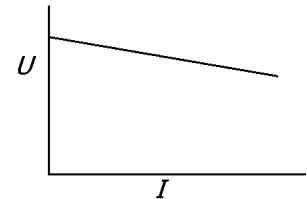
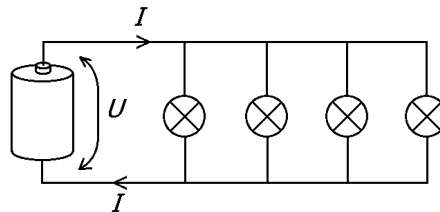
- Bijlage 1 Wet van Ohm
- Bijlage 2 Voorvoegsels van eenheden
- Bijlage 3 Multimeter
- Bijlage 4 Schakeling van een simpele audioversterker met een opamp

§ 1 Spanningsbronnen

Belasting van een batterij

Een batterij is een spanningsbron die een bepaalde spanning tussen de pluspool en minpool levert. De spanning is altijd op de batterij aangegeven, bijvoorbeeld 9 V. Ook als bijvoorbeeld een lamp of een bel of een ander apparaatje op de batterij wordt aangesloten, moet de spanning nog steeds min of meer de aangegeven waarde hebben. Zoals we hierna zullen zien, is dit helaas in de praktijk niet altijd het geval.

In de figuur hiernaast is een aantal lampjes op een batterij aangesloten. De door de batterij geleverde spanning is met U aangegeven en de door de batterij geleverde stroomsterkte met I . Als er



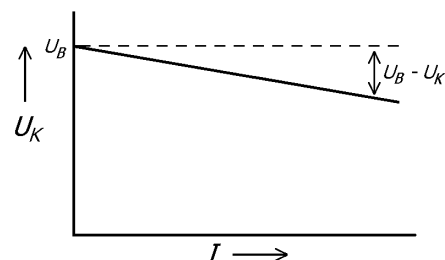
meer lampjes op de batterij worden aangesloten, neemt deze I toe. Gelijktijdig zie je dat de lampjes minder fel gaan branden. Dat wil zeggen dat de spanning kleiner wordt. Blijkbaar heeft een toename van I een afname van U tot gevolg. Dit is weergegeven in het diagram naast het schakelschema. We zien de afname van de spanning bij een steeds grotere stroom afgebeeld als een niet-horizontale rechte lijn.

De lampjes vormen de zogenoemde 'belasting' voor de batterij. Hoe groter de stroom I is, des te zwaarder de batterij wordt belast en des te moeilijker het voor batterij is om zijn spanning U op peil te houden.

Klemspanning, bronspanning en inwendige weerstand

In het voorgaande zagen we dat de door de batterij geleverde spanning afhankelijk is van de geleverde stroom. Dit geldt voor heel veel spanningsbronnen. We maken daarom onderscheid tussen twee soorten spanningen van een spanningsbron, namelijk de klemspanning en de bronspanning. De klemspanning U_K is de spanning tussen de twee polen van een spanningsbron waarbij met de klemmen de plus- en minpool wordt bedoeld. Als de batterij geen stroom levert, is de batterij onbelast en is klemspanning maximaal. We noemen die spanning de bronspanning U_B .

In de figuur hiernaast is de klemspanning tegen de stroomsterkte uitgezet. De horizontale stippellijn geeft de waarde van de bronspanning aan. De daling van de klemspanning is gelijk aan $U_B - U_K$ en is in de figuur aangegeven.



De inwendige weerstand van een spanningsbron definiëren we nu als volgt.

$$R_i = \frac{U_B - U_K}{I}$$

De inwendige weerstand geeft de mate aan waarin de klemspanning daalt bij toenemende stroom. De inwendige weerstand hangt van het type spanningsbron af. Bijvoorbeeld is de inwendige weerstand van een staafbatterij (zeker van de oudere types) groot en van een (opgeladen) autoaccu klein.

Getallenvoorbeeld

Een adapter heeft in onbelaste toestand (dus stroomsterkte = 0 A) een klemspanning van 9,0 V. Als er een lampje op wordt aangesloten, loopt er een stroom van 100 mA en bedraagt de klemspanning 8,8 V.

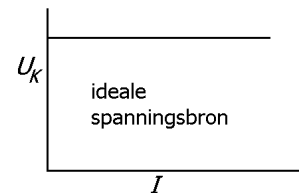
De bronspanning U_B van de adapter is dus 9,0 V.

Voor de inwendige weerstand geldt:

$$R_i = \frac{U_B - U_K}{I} = \frac{9,0 \text{ V} - 8,8 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 2,0 \Omega$$

Ideale spanningsbron

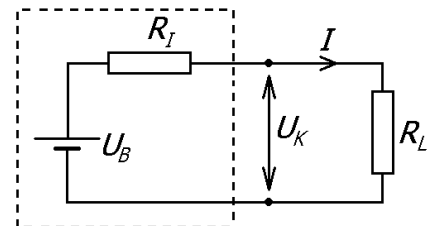
Een spanningsbron waarvan de geleverde stroomsterkte géén invloed op de klemspanning heeft, noemen we een ideale spanningsbron. Zie het diagram hiernaast. Een ideale spanningsbron heeft geen inwendige weerstand ($R_i = 0 \Omega$). In de praktijk bestaan er geen ideale spanningsbronnen, hooguit zogenoemde gestabiliseerde voedingen. Bij een gestabiliseerde voeding is de spanning onafhankelijk van de stroomsterkte zolang deze laatste niet te groot wordt. In de rest van deze paragraaf blijven gestabiliseerde voedingen echter buiten beschouwing.



Schematische weergave van een spanningsbron

In de figuur hiernaast is een echte spanningsbron schematisch weergegeven in de gestippelde rechthoek.

De spanningsbron U_B is ideaal en levert bij elke stroomsterkte I de bronspanning. De weerstand R_i stelt de inwendige weerstand voor. Van buitenaf bekeken heeft de schakeling binnen de gestippelde rechthoek dezelfde eigenschappen als die van een echte spanningsbron en wordt daarom wel het 'vervangingschema' van een spanningsbron genoemd. Aan de buitenkant meten we dus de klemspanning U_K die gelijk is aan de bronspanning U_B zolang er geen stroom loopt. Als er wel stroom loopt, is de klemspanning lager dan de bronspanning.

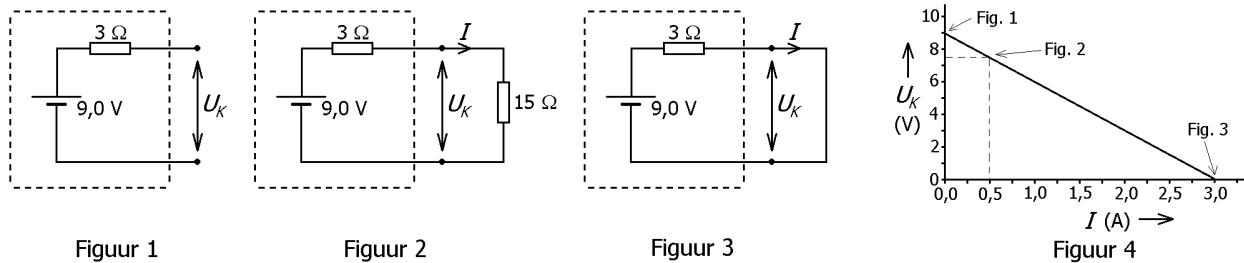


Weerstand R_L vormt de belasting voor de spanningsbron en wordt daarom de belastingsweerstand genoemd. De letter L is een afkorting van 'load' dat het Engelse woord voor belasting is.

Het vervangingschema van een spanningsbron (zoals de schakeling binnen de stippellijn) is vaak slechts een benadering van de werkelijke spanningsbron. De grafiek, die het verband tussen de klemspanning en de stroomsterkte weergeeft, is in veel gevallen namelijk geen rechte lijn. Zo verandert de inwendige weerstand van het oudere type adapter (apparaatje dat op het stopcontact aangesloten wordt en dan laagspanning levert van bijvoorbeeld 6 of 12 V) naarmate hij zwaarder belast wordt en bij een batterij neemt de inwendige weerstand toe en de bronspanning af naarmate hij leger raakt. Toch gebruiken we in de rest van deze paragraaf het vervangingschema om een spanningsbron te beschrijven.

Getallenvoorbeeld

In het volgende getallenvoorbeeld gaan we uit van een spanningsbron met een bronspanning van 9,0 V en een inwendige weerstand van 3 Ω. De spanningsbron is in de onderstaande figuren steeds als een gestippelde rechthoek weergegeven.



In figuur 1 is de spanningsbron helemaal niet belast. Er loopt geen stroom en de klemspanning is gelijk aan de bronspanning, namelijk 9,0 V.

In figuur 2 is een lampje met een weerstand van 15 Ω op de spanningsbron aangesloten. We kunnen de stroomsterkte I dan als volgt uitrekenen:

$$I = \frac{U_B}{R_i + R_L} = \frac{9,0}{3 + 15} = 0,50 \text{ A}$$

Voor de spanning over de inwendige weerstand geldt dan:

$$U = I \cdot R_i = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ V}$$

Voor de klemspanning geldt dan:

$$U_K = 9,0 - 1,5 = 7,5 \text{ V.}$$

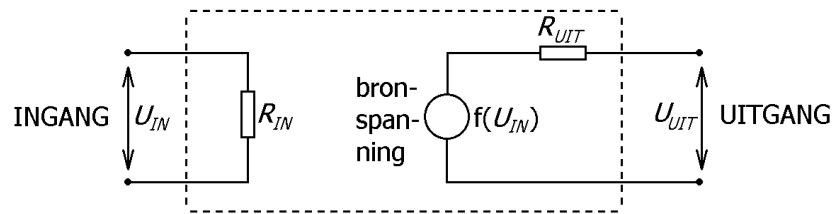
In figuur 3 is de spanningsbron kortgesloten. De klemspanning is dan nul. Voor de kortsluitstroom geldt:

$$I = \frac{U_B}{R_i} = \frac{9,0}{3} = 3,0 \text{ A}$$

In figuur 4 is het verband tussen de klemspanning U_K en de geleverde stroomsterkte I afgebeeld. De grafiek is een rechte lijn die de verticale as snijdt bij de bronspanning en de horizontale as bij de kortsluitstroom. In het diagram zijn de punten van de grafiek aangegeven die horen bij de situaties van de figuren 1, 2 en 3.

Ingangsweerstand en uitgangsweerstand

Nu kijken we naar spanningsbronnen waarvan de bronspanning geregeld kan worden door een stuurspanning. Denk hierbij aan kleine elektronische componenten (zoals IC's;



zie de volgende paragrafen) die onderdeel zijn van een grotere schakeling. In de figuur is zo'n component schematisch weergegeven. De stuurspanning wordt aangeboden aan de ingang van de component. De uitgang van de component kun je opvatten als spanningsbron.

De spanning tussen de twee ingangsaansluitingen wordt de ingangsspanning U_{IN} genoemd (of soms stuurspanning) en de spanning tussen de twee uitgangsaansluitingen de uitgangsspanning U_{UIT} . De uitgangsspanning hangt volgens een bepaald voorschrift af van de ingangsspanning. Je kan dit symbolisch weergegeven als $U_{UIT} = f(U_{IN})$ waarbij f het functievoorschrift is.

De ingangsspanning wordt bepaald door de sturende elektronica die zich in de bovenstaande figuur links van ingang bevindt (niet getekend). Ten gevolge van de ingangsspanning loopt er een zekere ingangsstroom door de ingang van onze elektronische component. Je zou het verband tussen de ingangsspanning en de ingangsstroom kunnen weergeven door middel van de zogenoemde ingangsweerstand R_{IN} . Zie de bovenstaande figuur. Veel componenten hebben een grote ingangsweerstand. De stroom door de ingangsaansluitingen blijft dan klein en de sturende elektronica wordt weinig belast.

Bij de meeste elektronische componenten daalt de uitgangsspanning als de uitgangsstroom groter wordt. In het bovenstaande vervangingsschema wordt deze spanningsdaling in rekening gebracht door middel van de uitgangsweerstand R_{UIT} . Deze is te vergelijken met de inwendige weerstand van een spanningsbron (zie hiervoor). Hoe groter de uitgangsweerstand is, des te sterker de uitgangsspanning daalt bij een gegeven uitgangsstroom. Het is daarom vaak wenselijk dat elektronische componenten een kleine uitgangsweerstand hebben.

Opgaven bij § 1

Opgave 1

Een lampje is aangesloten op een batterij. Het lampje brandt. Met een voltmeter meet je de spanning tussen de polen van de batterij. Welke bewering A of B is juist?

A. Je meet de klemspanning van de batterij. B. Je meet de bronspanning van de batterij.

Opgave 2

Wat bedoelen we als we zeggen dat een spanningsbron belast wordt?

Opgave 3

Leg uit wat we verstaan onder een ideale spanningsbron.

Opgave 4

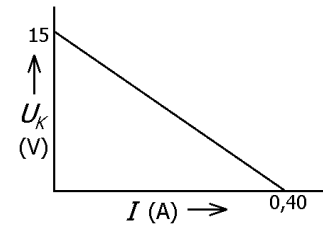
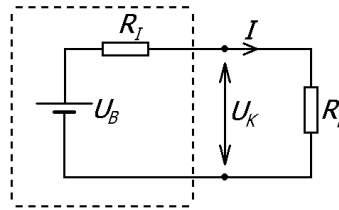
Deze opgave begint met een waar gebeurd verhaal. Een natuurkundeleraar uit Rijswijk had bij de behandeling van het onderwerp 'elektriciteit' de gewoonte om steeds meer 1,5 V batterijen in serie met elkaar te schakelen. De totale spanning sloot hij op de tong van vrijwilligers aan. Elk jaar ontstond er in de klas een wedstrijd welke leerling de hoogste spanning op zijn/haar tong kon verdragen. Ook liet de leraar bij gelegenheid de stroom wel eens door een beugel lopen. Het verliep allemaal probleemloos, zelfs bij tien of meer batterijen. In het jaar 2009 maakte hij echter een van de grootste fouten uit zijn carrière. De 1,5 V batterijen waren zoek geraakt. Er was echter wel een 12 V accu beschikbaar. In zijn onnozelheid sloot de leraar deze accu aan op de tong van Victor en daarna op zijn beugel. Bij de beugel ging het finaal mis: bij de aansluitpunten ontstonden er lichtflitsen en er liep kortstondig een gigantische stroom (ettelijke kiloampères) door de beugel. De volgende dag moest Victor naar de orthodontist.....

De grote vraag is nu waarom de 12 V accu wel zo'n grote stroom kon leveren en de serieschakeling van tien 1,5 V batterijen (die samen een bronspanning van 15 V hebben) niet? S.v.p. kort antwoorden.

Opgave 5

In de figuur hiernaast stelt de stippellijn een spanningsbron voor.

We vatten deze op als een combinatie van ideale spanningsbron U_B en inwendige weerstand R_I . De spanningsbron wordt belast met weerstand R_L . Het diagram naast de schakeling geeft het verband tussen de klemspanning en de stroom.



a.

Hoe groot is de bronspanning U_B van de spanningsbron?

b.

Hoe groot is de geleverde stroomsterkte als de polen van de spanningsbron direct met elkaar zijn verbonden zodat R_L gelijk is aan nul?

c.

Bereken de inwendige weerstand R_I van de spanningsbron.

Als een bepaalde weerstand R_L op de batterij is aangesloten, bedraagt de klemspanning 7,5 V. In dat geval wordt de bronspanning dus gelijk verdeeld over R_I en R_L .

d.

Hoe groot is in dat geval de weerstand van R_L ?

Opgave 6

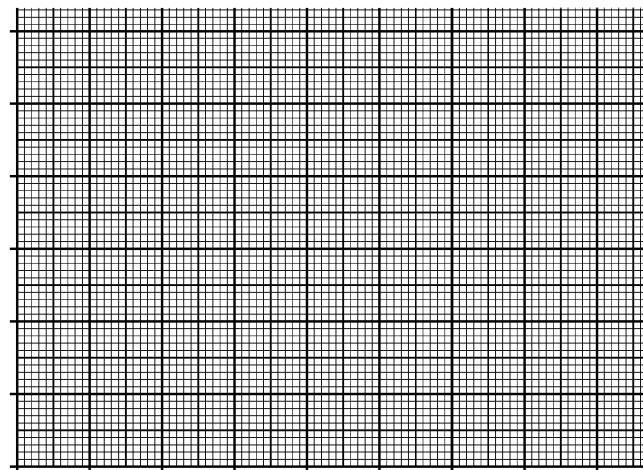
Een spanningsbron heeft een bronspanning van 12 V en een inwendige weerstand van 3,0 Ω .

a.

Teken hiernaast een grafiek die het verband tussen de klemspanning U_K in volt en de stroomsterkte I in ampère geeft.

b.

Teken in het diagram het verband tussen de spanning over en de stroom door een weerstand van 2,0 Ω .



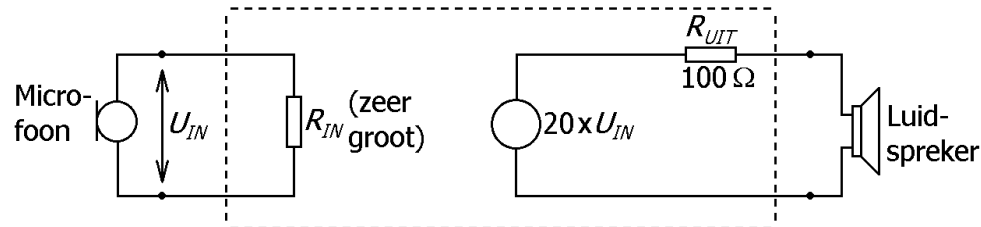
Stel dat de weerstand van 2,0 Ω op de spanningsbron is aangesloten.

c.

Lees in het diagram af hoe groot de klemspanning dan is.

Opgave 7

Johan heeft een schakeling gemaakt die een microfoonsignaal 20 keer versterkt. De microfoon moet op de ingang van de schakeling worden aangesloten; een luidspreker op de uitgang van de schakeling. In de volgende figuur is de schakeling van Johan schematisch weergegeven in de gestippelde rechthoek. De ingangsweerstand R_{IN} is zo groot, dat er praktisch geen stroom aan de ingangskant loopt. De uitgangsweerstand R_{UIT} bedraagt $100\ \Omega$.



Johan sluit een microfoon op de ingang aan en een luidspreker op de uitgang. Zie de figuur.

a.

Leg uit dat de microfoon niet of nauwelijks wordt belast door de schakeling in de gestippelde rechthoek. Bedenk daarbij dat de microfoon zelf ook een soort spanningsbron is met een eigen bronspanning (die wisselt in het tempo van het geluid) en een inwendige weerstand.

Johan kan kiezen uit een luidspreker van $8\ \Omega$ en een luidspreker van $600\ \Omega$.

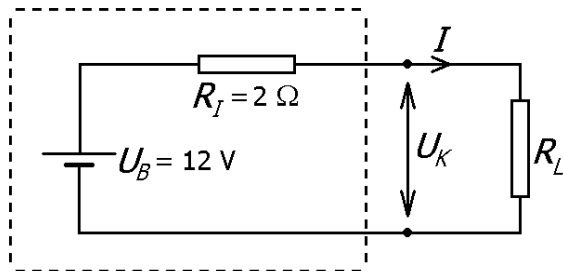
b.

Leg uit welke luidspreker Johan moet kiezen om de schakeling van Johan zo weinig mogelijk te belasten.

Opgave 8 (Deze opgave valt buiten de lesstof)

Deze opgave begint met een stukje extra theorie.

Stel je de volgende situatie voor. Zie ook de onderstaande schakeling maar nog zonder getallen. Je hebt een spanningsbron met een bepaalde (niet veranderende) bronspanning U_B en een bepaalde (niet veranderende) inwendige weerstand R_I . Je wilt een weerstand R_L op de spanningsbron aansluiten die een zo groot mogelijk elektrisch vermogen van de spanningsbron ontvangt. Hoe groot moet je deze belastingsweerstand dan kiezen? Het antwoord op deze vraag is dat R_L dan gelijk moet zijn aan R_I . Als R_I bijvoorbeeld 2Ω bedraagt, moet R_L ook 2Ω zijn om het vermogen maximaal te laten zijn.



R_L (Ω)	I (A)	U_K (V)	P_L (W)
0	6	0	0
1	4	4	16
2	3		
4			
10			
∞	0	12	

← Maximaal

We gaan de bovenstaande theorie controleren aan de hand van de getallen die in de schakeling staan (de bronspanning is 12 V en de inwendige weerstand is 2Ω). De spanningsbron wordt belast met een weerstand die begint met 0Ω (kortsluiting dus) en stapsgewijs toeneemt tot oneindig (symbool ∞). Zie de linker kolom in de tabel naast de schakeling.

De opdracht is nu om de open plekken binnen de tabel in te vullen. Het vermogen dat R_L ontvangt is steeds gelijk aan de klemspanning maal de stroomsterkte ($P_L = U_K \cdot I$).

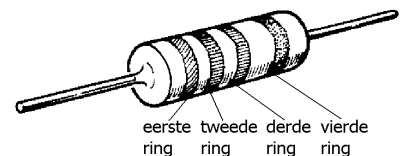
Ga na dat dit vermogen maximaal is bij een belastingsweerstand van 2Ω .

§ 2 Weerstanden en diodes

Weerstand als component in een schakeling

Elk apparaat (denk bijvoorbeeld aan een lamp of een strijkijzer) heeft in de praktijk een bepaalde elektrische weerstand. Dat is soms heel vervelend, maar we kunnen daar nou eenmaal niet omheen. Soms willen we echter in een elektrische schakeling juist ergens een bepaalde weerstand hebben. Daarom zijn er componenten leverbaar, die speciaal gemaakt zijn om een bepaalde gewenste weerstand te bezitten. Die componenten bezitten een bepaalde weerstand, maar worden (om het verwarrend te maken) zelf ook wel aangeduid met de term weerstand. Met een elektrische weerstand kunnen we dus in het Nederlands zowel een component in een schakeling bedoelen als de eigenschap om de stroom minder goed door te laten. In het Engels hebben we dat probleem niet want daar wordt de component een 'resistor' genoemd en de eigenschap aangeduid met 'resistance'.

In de figuur hiernaast is een weerstand als component getekend. Het zijn meestal kleine buisvormige componenten met aan beide kanten een aansluitdraad. Aan de buitenkant zijn een aantal gekleurde ringen zichtbaar. Deze kleurringen op de weerstand geven de waarde van de weerstand aan. De kleurcode begint bij één van de uiteinden en iedere kleur komt overeen met een getal. Zo komt zwart overeen met 0, bruin met 1, rood met 2 enzovoort. De positie van iedere ring geeft aan wat je met dat getal moet doen. Met behulp van de volgende tabel kun je de weerstandswaarde vinden.



Kleurcodes van weerstanden

Kleur	1e cijfer	2e cijfer	Vermenigvuldigingsfactor	Tolerantie
Zwart	0	0	x 1 = 10 ⁰	+/- 20%
Bruin	1	1	x 10 = 10 ¹	+/- 1%
Rood	2	2	x 100 = 10 ²	+/- 2%
Oranje	3	3	x 1000 = 10 ³	+/- 3%
Geel	4	4	x 10.000 = 10 ⁴	+/- 4%
Groen	5	5	x 100.000 = 10 ⁵	–
Blauw	6	6	x 1.000.000 = 10 ⁶	–
Violet	7	7	x 10.000.000 = 10 ⁷	–
Grijs	8	8	x 100.000.000 = 10 ⁸	–
Wit	9	9	–	–
Goud	–	–	x 0,1	+/- 5%
Zilver	–	–	x 0,01	+/- 10%

Laten we eerst weerstanden met vier ringen bekijken. Dit zijn weerstanden met een grote tolerantie (onnauwkeurigheid). De eerste ring geeft dan het eerste cijfer van de waarde aan en de tweede ring het tweede cijfer. De derde ring geeft de vermenigvuldigingsfactor aan, oftewel het aantal nullen dat je achter de twee voorgaande cijfers moet zetten. De vierde ring geeft de onnauwkeurigheid aan.

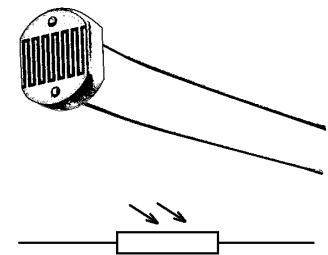
De eerste drie ringen zitten vlak bij elkaar, maar de vierde ring zit op enige afstand van de andere drie ringen (zie de figuur), zodat je op die manier goed kan zien wat de volgorde van de ringen is en dus vanaf welke kant je moet gaan tellen. Een weerstand met bijvoorbeeld de kleuren geel (4), violet (7), bruin (1) en goud (5%) heeft de waarde $47 \times 10^1 = 470 \Omega$. De tolerantie is 5%.

Precisiweerstanden hebben geen vier maar vijf ringen. Dan geven de eerste drie ringen de cijfers van de waarde aan en geeft de vierde ring de vermenigvuldigingsfactor. De laatste (vijfde) ring geeft de tolerantie aan. Neem de weerstand met kleurcode oranje (3), oranje (3), zwart (0), zwart (0), bruin (1). Deze heeft dan de weerstandswaarde $330 \times 10^0 = 330 \Omega$. De laatste ring, bruin, geeft aan dat de tolerantie 1% bedraagt.

Als je een bepaalde weerstand wilt bestellen, kun je niet zo gemakkelijk zomaar elke waarde krijgen, want weerstanden worden door de fabriek alleen in groten getale voor bepaalde waarden gemaakt. Verreweg het meest bekend is de zogenoemde E12 reeks, waarbij de in grootte opeenvolgende waarden steeds ongeveer 20% hoger zijn. Op die manier passen er steeds 12 opeenvolgende weerstandswaarden in het interval van 1 tot 10, van 10 tot 100, van 100 tot 1000 enzovoort. Zo kent men bijvoorbeeld op het interval van 100 tot 1000 de volgende reeks weerstanden: 100, 120, 150, 180, 220, 270, 330, 390, 470, 560, 680, 820, 1000.

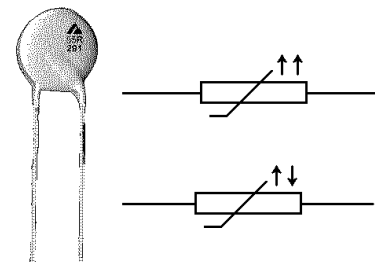
LDR

Een LDR is een lichtgevoelige weerstand. De letters LDR betekenen 'Light Dependent Resistor'. Zoals in de figuur hiernaast te zien is, heeft een LDR een lichtvenster. Als hier licht op valt, daalt de weerstand van de LDR. Hoe meer licht er op valt, hoe lager de weerstand wordt. In volslagen duisternis is de weerstandswaarde heel hoog. Hiernaast is ook het symbool voor de LDR getekend, zoals dat in een schakelschema gebruikt wordt. De twee schuine, invallende pijltjes stellen het opvallende licht voor.



PTC en NTC

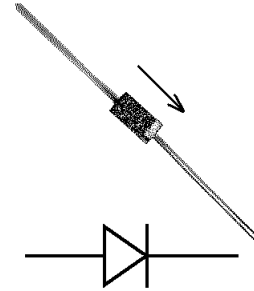
Hiernaast is links een praktische uitvoering van een PTC-weerstand afgebeeld. Zijn weerstand neemt toe bij toenemende temperatuur. PTC betekent dan ook 'Positieve Temperatuurs Coëfficiënt'. Naast PTC-weerstanden zijn er ook NTC-weerstanden. Hun weerstand neemt juist af bij toenemende temperatuur. NTC betekent dan ook 'Negatieve Temperatuurs Coëfficiënt'.



Ook zijn rechts in de figuur de symbolen voor de PTC-weerstand (boven) en NTC-weerstand (beneden) weergegeven. De kleine pijltjes bij het symbool voor een PTC-weerstand kun je als volgt begrijpen. Als de temperatuur stijgt (eerste pijltje wijst omhoog), stijgt ook de weerstand (tweede pijltje wijst omhoog). Bij het symbool voor de NTC-weerstand wijst het tweede pijltje naar beneden omdat de weerstand dan daalt bij toenemende temperatuur.

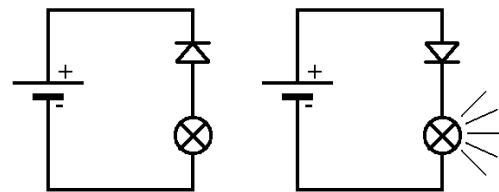
Diode

In de figuur hiernaast is een diode afgebeeld. Net als een weerstand ziet een diode er vaak uit als een klein buisje met twee metalen aansluitdraden. Aan één van de twee uiteinden is meestal een ring zichtbaar. Een diode laat de elektrische stroom wel in de ene richting door, maar niet in de andere. Je zou het enigszins kunnen vergelijken met een ventiel dat de lucht maar in één richting doorlaat. Het pijltje in de figuur geeft de richting van de stroom aan. Met een weerstand maakt het niet uit hoe je die met de twee draden aansluit, maar met een diode maakt het juist heel veel verschil.



Onder de diode is het symbool weergegeven zoals dat in een schakelschema wordt gebruikt. De stroom kan wel van links naar rechts lopen, maar niet van rechts naar links. In het symbool kun je een driehoekige naar rechts gerichte pijl herkennen die de richting aangeeft, waarin de diode de elektrische stroom geleidt.

In de twee schakelingen hiernaast is een lampje op een spanningsbron aangesloten. In serie met het lampje staat een diode. Ga na dat het lampje in de linker schakeling niet kan branden en in de rechter schakeling wel. We zeggen dat de diode in de linker schakeling in 'sperrichting' staat, en in de rechter schakeling in 'doorlaatrichting'.



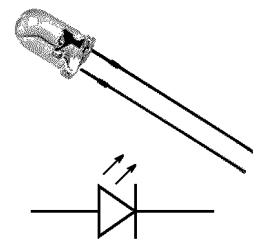
Het stroom-spanning-diagram van een diode

In sperrichting gedraagt een diode zich als een zeer hoge weerstand en kan dus min of meer als een isolator beschouwd worden. In doorlaatrichting gedraagt een diode zich bij kleine spanningen ook als een isolator. Echter, als de spanning groter wordt dan een bepaalde waarde, zeg 0,5 V, groeit de stroomsterkte heel snel aan. Zie de figuur hiernaast waarin het stroom-spanning-diagram van een diode (in doorlaatrichting) is weergegeven. Het diagram kan overigens van type tot type een beetje verschillen. In het diagram kun je goed zien dat de geleiding pas goed op gang komt als de spanning boven een bepaalde waarde, zeg 0,5 V, komt. Bij normaal gebruik ligt de spanning over de diode tussen 0,6 V en 0,7 V.

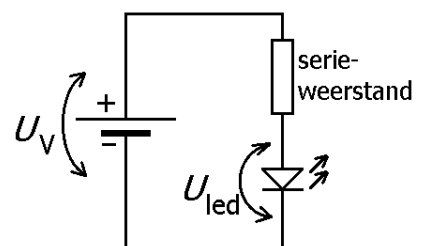


LED

Een speciaal soort diode is een led. Dit is een afkorting van 'Light Emitting Diode'. Zie de figuur hiernaast. Een led is een diode die licht uitzendt als er een stroom doorheen gaat. Dat gebeurt natuurlijk alleen als de diode in doorlaatrichting staat. De doorlaatspanning is bij een led wel hoger dan bij een gewone diode. Afhankelijk van de kleur ligt deze tussen 1,8 V (rood) en 4,6 V (blauw). Een voordeel van een led is dat hij heel zuinig met energie omgaat. Zo kan hij bij de omzetting van elektriciteit in licht wel een rendement van 50% halen, terwijl een gloeilamp niet verder dan 5% komt. Het symbool voor de led (zie de onderste figuur) heeft twee schuin omhoog gerichte pijltjes die aangeven dat de led licht uitstraalt. Merk op dat dit precies tegengesteld is aan de LDR, waar de pijltjes aangeven dat er licht op de LDR valt.



Als je een led op een spanningsbron aansluit, is het zeer verstandig om een weerstand in serie met de led aan te sluiten zoals in de figuur hiernaast is afgebeeld. Stel bijvoorbeeld dat de led rood licht uitstraalt en dus een spanning U_{led} nodig heeft van 1,8 V. Zonder serieweerstand mag de voedingsspanning U_V maar heel weinig groter zijn dan 1,8 V. Voorbij deze

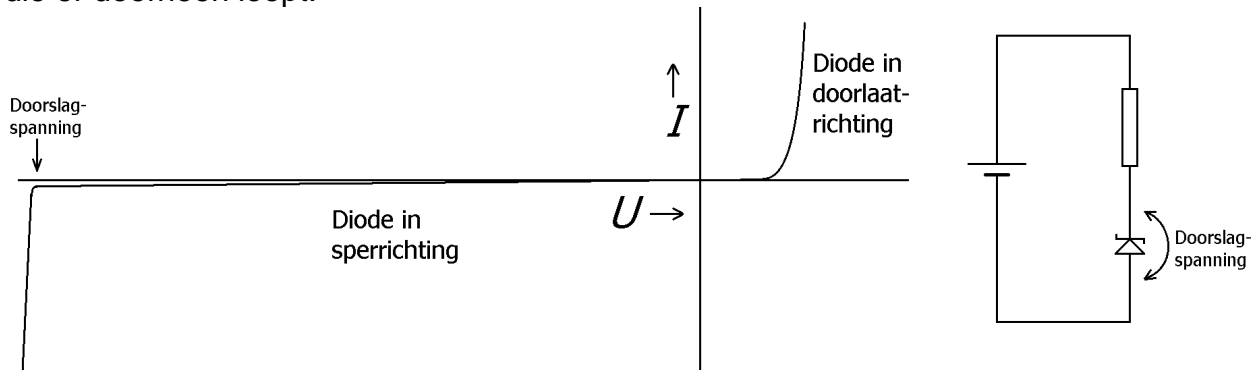


drempelspanning neemt de stroomsterkte door de led namelijk erg snel toe (net als bij een diode; zie het bovenstaande stroomsterkte-spanning-diagram) en neemt de kans op het doorbranden van de led ook snel toe. Bij gebruik van een serieweerstand is het gevaar veel kleiner. Als de stroomsterkte toeneemt, neemt de spanning over de serieweerstand immers ook toe waardoor de spanning over de led minder snel stijgt.

Zenerdiode

Hiervoor is gezegd dat een diode de stroom alleen geleidt in de doorlaatrichting en niet in de sperrichting. Toch is dit niet helemaal correct want een diode laat in sperrichting ook een heel klein beetje stroom door: de zogenoemde sperstroom. Bovendien is het zo dat als de spanning in de sperrichting groter en groter wordt, de sperstroom op een gegeven moment heel snel toeneemt. De spanning waarbij dat gebeurt heet de doorslagspanning. Gewone diodes gaan vaak kapot als er doorslag optreedt. Een bepaald type diodes, zenerdiodes genoemd, zijn echter zodanig gemaakt dat ze doorslag kunnen verdragen en dat de doorslagspanning een bepaalde gewenste waarde heeft. Zo bestaan er zenerdiodes met een doorslagspanning van bijvoorbeeld 10 volt, 15 volt en 20 volt.

In het onderstaande diagram is het verband tussen de spanning U over en de stroomsterkte I door een zenerdiode weergegeven. In het eerste kwadrant (U en I zijn beiden positief) is de doorlaatgrafiek getekend zoals we dat hiervoor tegenkwamen. Daar gedraagt een zenerdiode zich dus als een gewone diode. In het derde kwadrant (U en I zijn beiden negatief) is getekend hoe de sperstroom van de sperspanning afhangt. De grafiek loopt bij de doorslagspanning zo steil dat je in goede benadering mag zeggen dat daar de spanning over de diode vrijwel onafhankelijk is van de stroom die er doorheen loopt.



In de schakeling naast het diagram is een zenerdiode in serie met een weerstand op een spanningsbron (voeding) aangesloten. De zenerdiode is in sperrichting geschakeld. Als de voedingsspanning groter is dan de doorslagspanning, staat deze doorslagspanning over de zenerdiode en het verschil tussen voedings- en doorslagspanning over de weerstand.

Stel bijvoorbeeld dat de voedingsspanning 15 V en de doorslagspanning van de zenerdiode 10 V is. Er staat dan 10 V over de zenerdiode en 5 V over de weerstand. Op deze manier kun je begrijpen dat een kleine verhoging of een verlaging van de voedingsspanning niet leidt tot een variatie van de spanning over de zenerdiode, want die blijft steeds gelijk aan de doorslagspanning. Van deze eigenschap wordt vaak gebruik gemaakt om met een zenerdiode een hele stabiele gelijkspanning te maken.

Opgaven bij § 2

Opgave 1

Bepaal de kleurcode van de vier ringen die hoort bij een weerstand (tolerantie 5%) van 68 k Ω .

Opgave 2

Bepaal de kleurcode van de vier ringen die hoort bij een weerstand (tolerantie 5%) van 390 Ω .

Opgave 3

Een weerstand heeft de volgende kleurcode: rood, rood, rood, goud.
Bepaal zijn weerstandswaarde en tolerantie.

Opgave 4

Een weerstand heeft de volgende kleurcode: geel, violet, bruin, goud.
Bepaal zijn weerstandswaarde en tolerantie.

Opgave 5

Een weerstand met kleurcode grijs, rood, oranje, goud, is aangesloten op een 1,5 volt batterij. Bereken de stroom die door de weerstand loopt.

Opgave 6

De weerstandswaarde 600 Ω zit niet in de E12 reeks. Als je twee weerstanden uit de E12 reeks met elkaar in serie plaatst, krijg je wel 600 Ω .
Welke twee weerstanden zijn dat?

Een weerstand van 600 Ω kun je ook krijgen door twee weerstanden parallel te schakelen. Welke twee weerstanden zou je daarvoor gebruiken?

Opgave 7

Welke afkorting moet er op de volgende open plekken staan?

Hoe meer licht er op een _____ valt, des te lager zijn weerstand is.

Hoe warmer een _____ is, des te hoger zijn weerstand is.

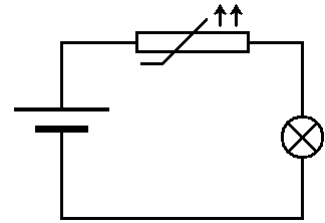
Hoe warmer een _____ is, des te lager zijn weerstand is.

Opgave 8

De schakeling hiernaast bevat een temperatuurgevoelige weerstand.

a.
Wat voor type weerstand is dit?

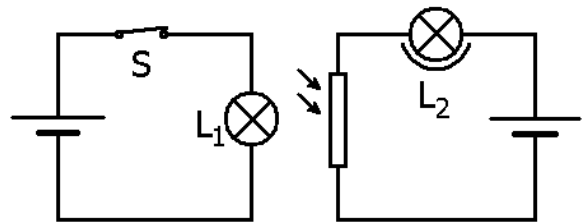
b.
Zal het lampje feller of minder fel gaan branden als de weerstand verwarmd wordt? Leg je antwoord uit.



Opgave 9

Hiernaast staat een schakeling afgebeeld. Het licht van lamp L_1 valt op de LDR, maar het licht van L_2 kan de LDR niet beschijnen. In de getekende situatie brandt zowel L_1 als L_2 .

Leg stapsgewijs uit waarom zowel lamp L_1 als lamp L_2 uitgaan als schakelaar S geopend wordt.



Opgave 10

Hoe groot moet de spanning over een diode in doorlaatrichting ongeveer zijn om geleidend te worden?

Opgave 11

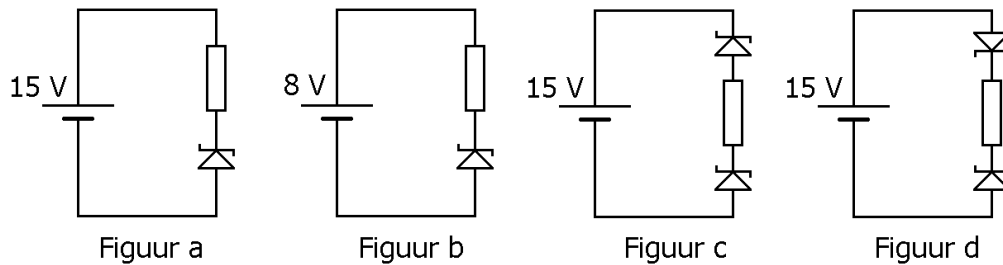
Vul op de volgende open plekken een woord in.

De spanning over een diode is zodanig, dat hij de stroom goed geleidt. We zeggen dan dat de diode in _____ staat.

De diode wordt nu in omgekeerde richting aangesloten. Hij kan dan geen stroom doorlaten. We zeggen dan dat de diode in _____ staat.

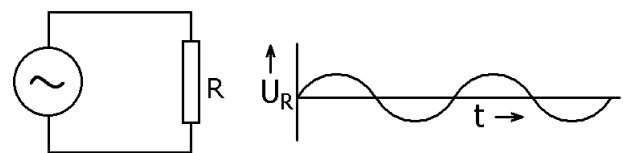
Opgave 12

In de onderstaande figuren zijn schakelingen met zenerdiodes getekend. De doorslagspanning van de zenerdiodes bedraagt steeds 12 V. Bepaal in elk van de figuren de spanning over de weerstand.

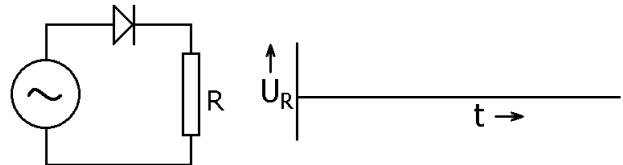


Opgave 13

In de figuur hiernaast is weerstand R rechtstreeks op een wisselspanningsbron aangesloten. De spanning U_R over R is in het bovenste diagram tegen de tijd uitgezet.



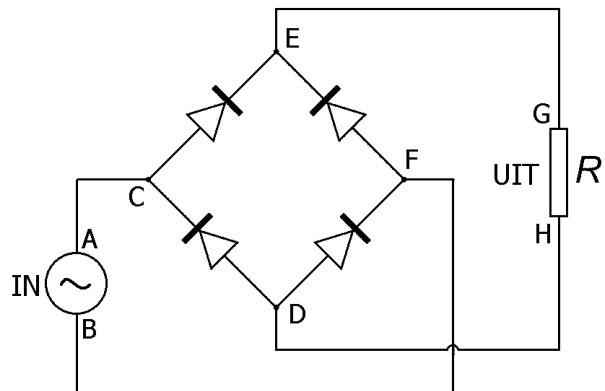
Nu wordt een diode in de schakeling gezet. Zie de onderste schakeling. Teken in het diagram het verloop van de spanning over R in de nieuwe situatie.



Met de doorlaatspanning van de diode (circa 0,7 V) hoeft geen rekening gehouden te worden.

Opgave 14

Hiernaast is de zogenaamde greatzschakeling getekend, die dient om een wisselspanning gelijk te richten. In de schakeling staat tussen A en B de wisselspanningsbron aangegeven en tussen G en H de belastingsweerstand R. De bedoeling van de schakeling is dat de stroom door R steeds in dezelfde richting loopt (onafhankelijk van de polariteit van de spanningsbron).



a.

Stel dat op een bepaald moment A de positieve pool van de spanningsbron is en B de negatieve pool. Geef dan met de letters A t/m H aan welke weg de elektrische stroom door het circuit neemt (via de diodes en R). Geef dus een reeks letters die begint met A en eindigt met B.

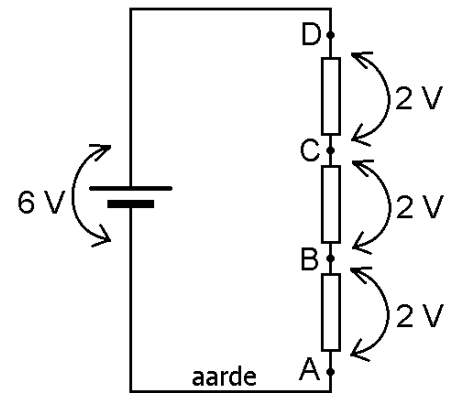
b.

Doe nu hetzelfde als bij vraag a) maar nu voor het geval dat B de positieve pool en A de negatieve pool is.

§ 3 Spanningsdeler, IC, opamp

Aarde, potentiaal

In de elektronica is spanning een belangrijk begrip. Naast spanning gebruikt men vaak het begrip 'potentiaal'. Hierbij speelt één punt van de schakeling een speciale rol en wordt aangeduid met 'aarde' (in het Engels 'ground'). In principe mag je zelf kiezen welk punt je als aarde neemt maar in veel gevallen wordt hiervoor de minpool van de voeding genomen. In de figuur hiernaast is dat ook het geval (zie de aanduiding 'aarde').

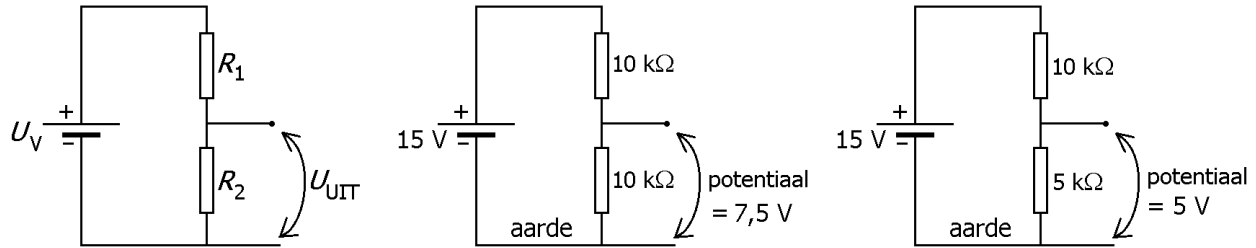


De potentiaal van een punt van de schakeling is de spanning tussen dat punt en aarde. De potentiaal wordt, net als spanning, in volt (V) uitgedrukt. Zo heeft elk punt van de schakeling zijn eigen potentiaal. Aarde heeft per definitie potentiaal nul. In de bovenstaande figuur zijn drie gelijke weerstanden op een spanningsbron van 6 V aangesloten. De spanning over elke weerstand bedraagt 2 V. De potentiaal van punt A is 0 V, van punt B 2 V, van punt C 4 V en van punt D 6 V.

De bovenstaande begrippen (aarde, spanning en potentiaal) kun je begrijpen aan de hand van een gebouw. De begane grond komt overeen met de aarde van de schakeling. Het hoogteverschil tussen twee verdiepingen (bijvoorbeeld tussen de derde en vierde verdieping) is te vergelijken met de spanning over een weerstand. De totale hoogte boven de begane grond is te vergelijken met potentiaal.

Spanningsdeler

Een spanningsdeler is een schakeling die een elektrische spanning in delen splitst. Het doel is om van een beschikbare spanningsbron een lagere spanning af te leiden. In de volgende figuren is de simpelste vorm van een spanningsdeler getekend. In de linker figuur verdeelt de (ingående) voedingsspanning U_V zich over de weerstanden R_1 en R_2 . De uitgaande spanning U_{UIT} is altijd kleiner dan de voedingsspanning. Als de spanningsdeler niet wordt belast, dus als er door de middenaftakking van de spanningsdeler geen stroom loopt, is de elektrische stroom door R_1 gelijk aan die door R_2 . De verhouding van de spanningen over R_1 en R_2 is dan gelijk aan de verhouding van de weerstanden R_1 en R_2 zelf. In de rest van deze paragraaf gaan we daar vanuit.

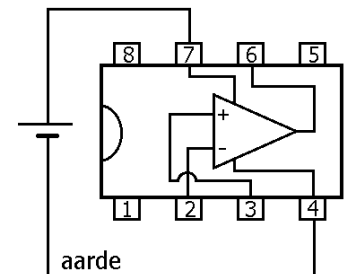
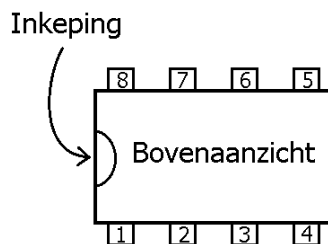
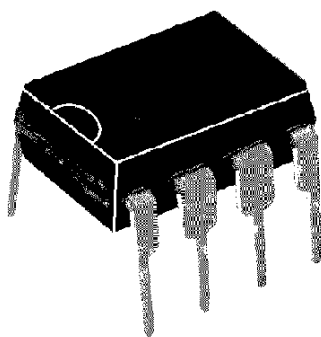


In de middelste en de rechter figuur staan getalenvoorbeelden van een spanningsdeler. De voeding levert 15 V. In de middelste figuur zijn beide weerstanden gelijk (10 kΩ) en wordt de voedingsspanning in twee gelijke delen van 7,5 V verdeeld. Als we de minpool van de spanningsbron weer als aarde nemen, kunnen we zeggen dat de potentiaal van de middenaftakking 7,5 V is. In de rechter figuur zijn de weerstanden van de spanningsdeler 10 kΩ en 5 kΩ. De potentiaal van de middenaftakking is dan 5 V.

Geïntegreerde schakelingen

De onderstaande linker figuur toont een IC. Dit is een afkorting van 'Integrated Circuit', dat 'geïntegreerde schakeling' betekent. Het is een schakeling met veel elektronische componenten (zoals diodes, transistors en weerstanden) die op een enkel stukje silicium is aangebracht. Het silicium bevindt zich in een plastic behuizing waar metalen pootjes uitsteken. Het aantal pootjes verschilt van IC tot IC. Het IC in de figuur bevat slechts 8 pootjes. Grote IC's kunnen wel 40 pootjes bevatten.

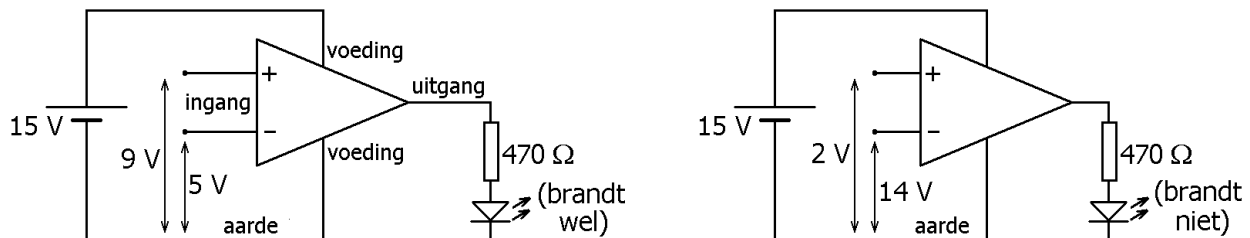
Er zijn veel verschillende soorten IC's verkrijgbaar. Elke soort heeft zijn eigen werking. Bijvoorbeeld kan een IC dienst doen als een zogeheten 'operationele versterker', in het Engels 'operational amplifier' of kortweg 'opamp' genoemd. De opamp staat in deze paragraaf centraal. Een ander voorbeeld van een IC is de '555-timer'. Deze komt in één van de volgende paragrafen aan bod.



De metalen pootjes van een IC zijn genummerd, zoals in de middelste figuur te zien is. In de figuur is het IC van boven getekend. De pootjes zijn tegen de klok in genummerd. De telling begint vanaf de inkeping. Bij de meeste IC's moeten twee pootjes met de polen van de voeding worden verbonden. Dit is nodig om de IC's van energie te voorzien zodat ze kunnen werken, net zoals een tv of computer op het stopcontact moet worden aangesloten. In de rechter figuur, waarin het IC als opamp werkt, zijn dit pootje 7 (naar de pluspool) en pootje 4 (naar de minpool).

De opamp

In de onderstaande figuren is een opamp op een voedingsspanning van 15 V aangesloten. De opamp is als driehoek getekend; de rechthoekige plastic behuizing van het IC is in de figuur weggelaten. In de figuur zijn vijf aansluitpootjes van het IC getekend; de overige drie spelen een ondergeschikte rol en worden daarom niet besproken.



Allereerst zijn er twee pootjes (7 en 4) bestemd voor de voeding. Deze zijn hiervoor al ter sprake gekomen. Daarnaast heeft de opamp twee pootjes (2 en 3) voor de ingang en één pootje (6) voor de uitgang. Pootje 3 wordt de plusingang (of niet-inverterende ingang) genoemd en pootje 2 de miningang (of inverterende ingang). Het is gebruikelijk om de plusingang met een plusteken te markeren en de miningang met een minteken (zie de figuur).

Simpel gezegd werkt de opamp als volgt. De opamp vergelijkt de potentiaal van de plusingang met de potentiaal van de miningang. Als de potentiaal van de plusingang het hoogst is, is de potentiaal van de uitgang 'hoog' en brandt de led. Dit is in de linker figuur het geval, want 9 V is groter dan 5 V. De potentiaal van de uitgang is dan gelijk of bijna gelijk aan de voedingsspanning. Als de potentiaal van de plusingang kleiner is dan de potentiaal van de miningang, is de potentiaal van de uitgang 'laag' (dat wil zeggen nul of net boven nul) en brandt de led niet. Dit is in de rechter schakeling het geval, want 2 V is kleiner dan 14 V. Overigens dient de weerstand van 470 Ω ter bescherming van de led als de uitgang hoog is.

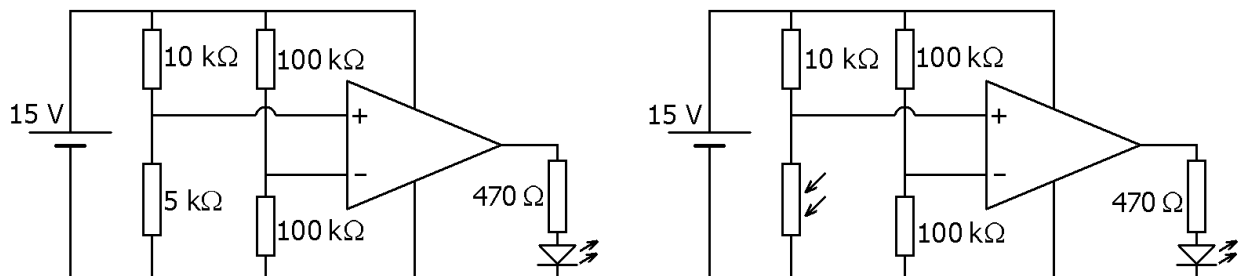
Als de potentialen van de plus- en miningang zéér dicht bij elkaar liggen, ligt de potentiaal van de uitgang in het overgangsgebied tussen laag en hoog. In deze paragraaf nemen we echter aan dat beide potentialen voldoende van elkaar verschillen, zodat de uitgangspotentiaal altijd óf heel hoog óf heel laag is.

De opamp is zo gemaakt, dat de stroomsterkte door de twee ingangspootjes zeer klein blijft. We zeggen dan dat de 'ingangsweerstand' hoog is. Omgekeerd heeft de opamp een lage uitgangsweerstand. Dat betekent dat de uitgangspotentiaal (van pootje 6 dus) binnen bepaalde grenzen onafhankelijk is van de stroom door de uitgang.

In de rest van deze paragraaf wordt de opamp gebruikt in combinatie met twee spanningsdelers. Deze spanningsdelers leveren de potentiaal van de plusingang en van de minusingang.

Voorbeelden van een opamp in combinatie met twee spanningsdelers

De onderstaande linker schakeling bevat twee spanningsdelers en een opamp. De spanningsdeler die bestaat uit twee keer $100\text{ k}\Omega$ splitst de voedingsspanning (15 V) op in twee keer $7,5\text{ V}$. De spanningsdeler die bestaat uit $10\text{ k}\Omega$ en $5\text{ k}\Omega$ splitst de voedingsspanning op in 10 V en 5 V . Omdat de potentiaal van de plusingang (5 V) kleiner is dan die van de minusingang ($7,5\text{ V}$), is de uitgangspotentiaal van de opamp laag en brandt de led niet.



In de rechter figuur is de weerstand van $5\text{ k}\Omega$ vervangen door een LDR. Als er licht op de LDR valt, is zijn weerstandswaarde lager dan $10\text{ k}\Omega$ en brandt de led niet (net als in de linker figuur). Als er geen licht op de LDR valt, is zijn weerstandswaarde echter hoger dan $10\text{ k}\Omega$ en brandt de led wel.

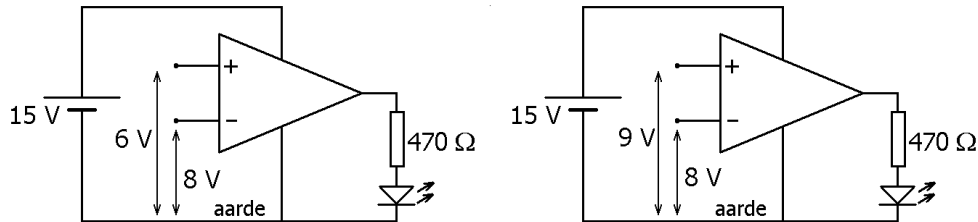
Opgaven bij § 3

Opgave 1

Wat verstaan we onder de potentiaal van een punt in een schakeling?

Opgave 2

In de onderstaande schakelingen is een opamp op een voedingsspanning van 15 V aangesloten. De potentialen van de plusingang en van de miningang zijn in de figuren gegeven.

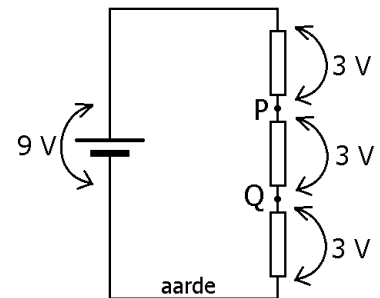


Brandt de led in de linker figuur? _____ Brandt de led in de rechter figuur? _____

Opgave 3

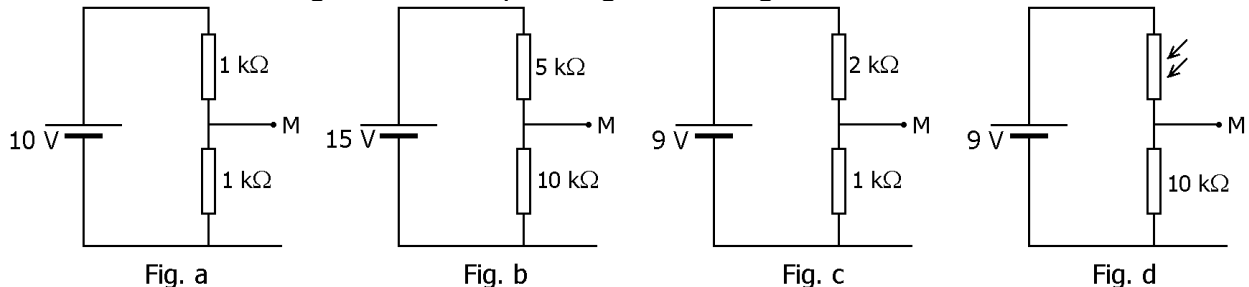
In de figuur hiernaast is een schakeling weergegeven. Verbeter de volgende zinnen door een woord te veranderen.

- 1) De spanning van punt P is 6 V.
- 2) De potentiaal tussen P en Q is 3 V.
- 3) De potentiaal van de spanningsbron is 9 V.
- 4) De spanning van de aarde is per definitie 0 V.



Opgave 4

In de onderstaande figuren staan spanningsdelers afgebeeld.



a.

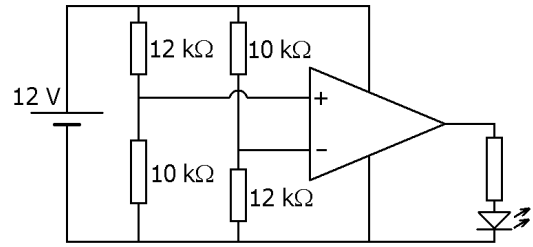
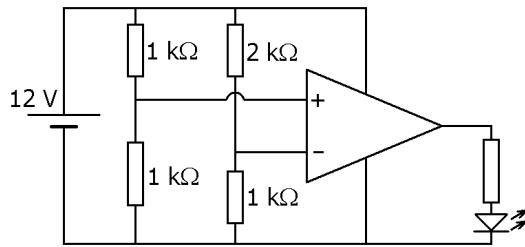
Bepaal de potentiaal van de middenaftakking M in de figuren a, b en c. Werk hierbij met verhoudingen; ingewikkelde berekeningen zijn niet nodig.

b.

In figuur d wordt de LDR eerst met veel licht beschenen (de LDR is dan een goede geleider) en daarna tegen licht afgeschermd (de LDR is dan een goede isolator). Hoe hoog is de potentiaal van punt M eerst en hoe hoog is hij daarna?

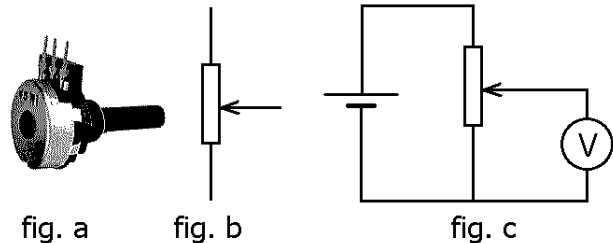
Opgave 5

Ga bij de volgende schakelingen na of de led brandt of niet.



Opgave 6

Deze opgave gaat over een potentiometer, ook wel potmeter genoemd. Hiernaast is in figuur a zo'n potmeter afgebeeld. Op zich is de benaming 'potmeter' wat misleidend, want het betreft hier geen meetinstrument. In figuur b is het bijbehorende symbool afgebeeld. Een potmeter is een weerstand met aan de buitenkant drie aansluitingen. Twee daarvan zijn in de potmeter verbonden met de uiteinden van een weerstand. De derde aansluiting, de zogenoemde 'loper', is een verschuifbare aftakking van de weerstand. In figuur c is een potmeter als variabele spanningsdeler gebruikt.

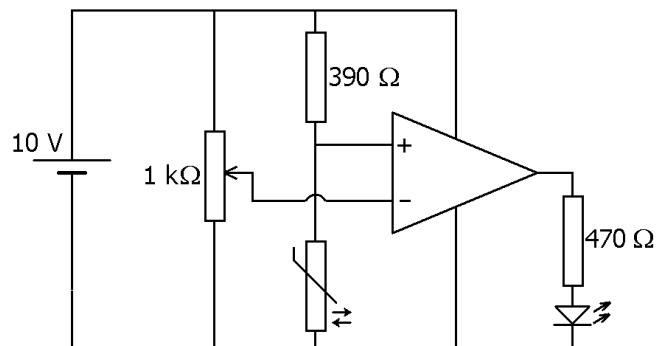


Nu volgt eindelijk de vraag. Vul op de volgende open plekken 'nul' of 'de voedingsspanning' in. Als in figuur c de loper helemaal naar boven geschoven is, wijst de voltmeter _____ aan.
Als in figuur c de loper helemaal naar beneden geschoven is, wijst de voltmeter _____ aan.

Opgave 7

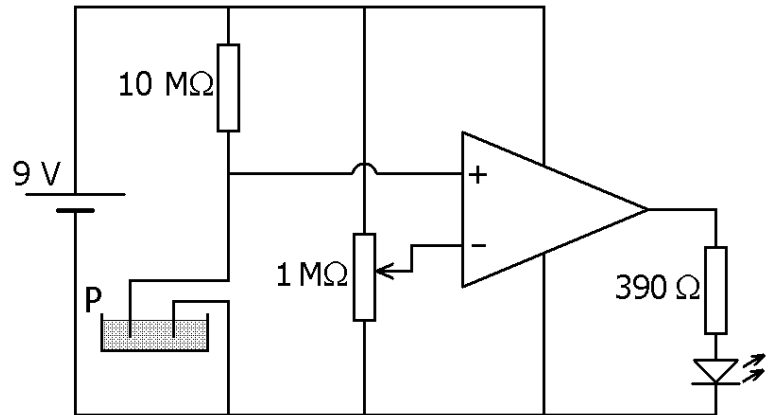
In de schakeling hiernaast wordt de loper van de potmeter zo ingesteld, dat de led net niet brandt. Daarna verandert de temperatuur. Dit heeft tot gevolg dat de led gaat branden.

- Is de weerstand van de NTC daarbij groter of kleiner geworden?
- Is de temperatuur dus gestegen of gedaald?
- Moet de loper van de potmeter naar boven of naar beneden geschoven worden om de led weer uit te laten gaan?



Opgave 8

De schakeling hiernaast controleert of een plantenbak (aangegeven met P) vochtig genoeg is. In de plantenbak zijn twee metalen draadjes gestoken. De elektrische weerstand tussen deze draadjes hangt van de vochtigheid in de plantenbak af. Naarmate de plantenbak droger wordt, is de weerstand tussen de draadjes groter. Bij een heel droge plantenbak gaat de led branden. Daarmee signaleert deze schakeling dus dat er met een gieter water bijgevuld moet worden. De looper van de potmeter staat precies in het midden.



a.

Hoe groot is de potentiaal van de miningang van de opamp?

Stel dat de weerstand tussen de twee metalen draadjes in de plantenbak $5 \text{ M}\Omega$ bedraagt. De (vaste) weerstand van $10 \text{ M}\Omega$ en de weerstand van de plantenbak verdelen de voedingsspanning dan in de verhouding 2 staat tot 1.

b.

Bereken in dat geval de potentiaal van de plusingang van de opamp. Zal de led in dit geval branden of niet?

c.

Leg stapsgewijs uit dat de led gaat branden bij een heel droge plantenbak.

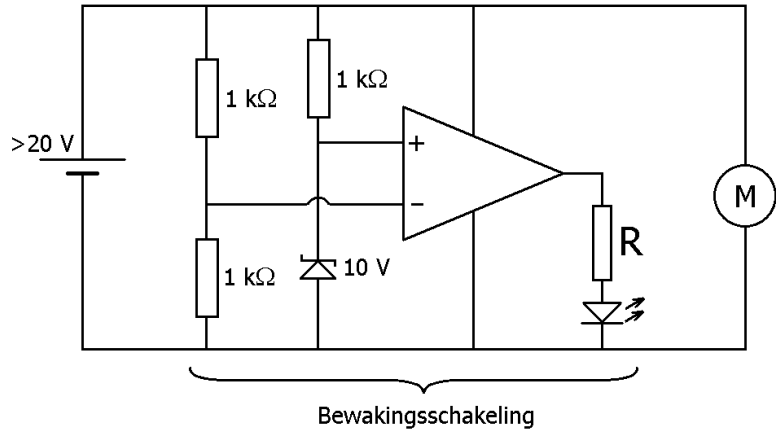
Stel dat je de led bij een iets hoger vochtgehalte in de plantenbak wilt laten branden.

d.

Moet de looper van de potmeter dan naar boven of naar beneden geschoven worden? Leg je antwoord uit.

Opgave 9

In de schakeling hiernaast wordt de spanningsbron (links) belast door motor M (rechts). Als de motor veel vermogen moet leveren, trekt hij veel stroom en zakt de klemspanning van de bron in. De klemspanning mag echter niet lager dan 20 V worden. Als dit toch het geval is, laat de 'bewakingsschakeling' de led branden.



De doorslagspanning van de zenerdiode bedraagt 10 V. Op een bepaald moment bedraagt de klemspanning van de spanningsbron 22 V.

- Hoe groot is de potentiaal van de miningang van de opamp?
- Hoe groot is de potentiaal van de plusingang van de opamp?
- Leg uit dat de led niet brandt.

De klemspanning van de spanningsbron daalt naar 18 V.

- Leg uit dat de led nu wel brandt.
- Bereken de waarde van de benodigde beschermingsweerstand R voor de led. Ga daarbij uit van een klemspanning van 20 V, een doorlaatspanning van de led van 1,8 V en een stroomsterkte van de led van 20 mA.

§ 4 Stroomsterkte en lading

Overzicht van de grootheden en eenheden in deze paragraaf

In de tabel hiernaast staan de grootheden en eenheden die in deze paragraaf van belang zijn. Nieuw is de grootheden 'lading' met de bijbehorende eenheid 'coulomb'.

Grootheden	Eenheden
I = stroomsterkte	A = ampère
Δt = tijdsduur	s = seconde
ΔQ = lading	C = coulomb

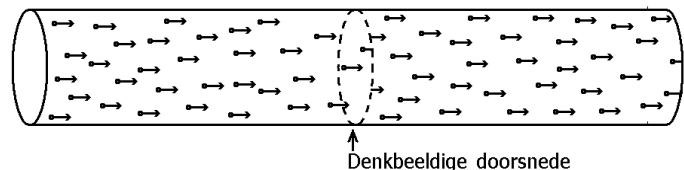
Lading en stroomsterkte

In een koperdraad bevinden zich zowel positief geladen deeltjes als negatief geladen deeltjes. De positief geladen deeltjes heten protonen en de negatief geladen deeltjes heten elektronen. De koperdraad als geheel is elektrisch neutraal. Dat wil zeggen dat de totale positieve lading (van de protonen) gelijk is aan de totale negatieve lading (van de elektronen).

Protonen zitten vast aan de koperatomen en kunnen zich dus niet in de koperdraad verplaatsen, elektronen echter wel. Deze bewegen kriskras door het koper, maar ze blijven wel overal in de koperdraad goed verspreid. Anders zou er op de ene plaats in het koper een netto positieve lading ontstaan en op de andere plaats een netto negatieve lading.

Als er een elektrische stroom door de koperdraad loopt, bewegen de (miljarden) elektronen naast hun chaotische verplaatsingen nu gemiddeld wel in één richting. Als je een doorsnede van de draad in gedachten zou nemen, zouden elektronen door deze doorsnede gaan. Zie de onderstaande figuur waarin de elektronen van links naar rechts bewegen. De protonen zijn niet getekend.

In een bepaalde tijdsduur Δt passeert een (groot) aantal elektronen de doorsnede. Deze elektronen hebben een gezamenlijke lading ΔQ . Lading is voor ons een nieuw begrip en wordt uitgedrukt in de eenheid coulomb, afgekort C. Onder de stroomsterkte I verstaan we nu de lading die per eenheid van tijd de doorsnede passeert. In formulevorm wordt dit:



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

De twee andere vormen van deze formule zijn:

$$\Delta Q = I \cdot \Delta t \quad \text{en} \quad \Delta t = \frac{\Delta Q}{I}$$

In principe bereken je met de bovenstaande formule de gemiddelde stroomsterkte. Voor de stroomsterkte op één tijdstip moet tijdsduur Δt heel klein genomen worden. Uiteraard wordt de bijbehorende ΔQ dan ook heel klein. In het limietgeval gaan Δt en ΔQ naar nul.

Bij een stroomsterkte van één ampère passeren er maar liefst $6,2 \times 10^{18}$ elektronen de denkbeeldige doorsnede per seconde. Dit enorme aantal elektronen heeft een gezamenlijke lading van min 1 coulomb. De stroomsterkte is dus eigenlijk min 1 ampère. Het minteken wil alleen maar zeggen dat de richting van de elektrische stroom tegengesteld is aan de bewegingsrichting van de elektronen. In het vervolg wordt het minteken buiten beschouwing gelaten.

Getallenvoorbeelden

Voorbeeld 1

Stel dat in 2 seconde een gezamenlijke lading van 6 coulomb door een denkbeeldige doorsnede van een geleidende draad stroomt. Voor de stroomsterkte door de draad geldt dan:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{6 \text{ C}}{2 \text{ s}} = 3 \text{ A}$$

We zien dus dat de eenheid ampère gelijk is aan coulomb per seconde.

Voorbeeld 2

Door een koperdraad loopt gedurende 20 s een stroom van 0,4 A. Voor de hoeveelheid lading, die een denkbeeldige doorsnede van de draad passeert, geldt dan:
 $\Delta Q = I \cdot \Delta t = 0,4 \text{ A} \cdot 20 \text{ s} = 8 \text{ C}$

Voorbeeld 3

Door een ijzerdraad loopt in een bepaalde tijdsduur een stroom van 0,66 A. Daarbij passeert 2,2 C een denkbeeldige doorsnede. Voor de tijdsduur geldt:

$$\Delta t = \frac{\Delta Q}{I} = \frac{2,2 \text{ C}}{0,66 \text{ A}} = 3,3 \text{ s}$$

Opgaven bij § 4

Opgave 1

Welke, in de tekst behandelde, formule geeft het verband tussen de stroomsterkte, de tijdsduur waarin de stroom loopt en de verplaatste lading?

Opgave 2

In de natuurkunde heeft de eenheid 'coulomb per seconde' een eigen naam. Welke is dat?

Opgave 3

In een stroomdraad loopt een elektrische stroom. In een tijdsduur van 3 seconde passeert een totale lading van 12 coulomb een willekeurige dwarsdoorsnede van de draad. Bereken de stroomsterkte door de draad.

Opgave 4

In een ijzerdraad loopt een elektrische stroom van 0,4 ampère. Bereken de tijd die nodig is om door een denkbeeldige doorsnede een lading van 10 coulomb te laten passeren.

Opgave 5

In een koperdraad loopt een stroom van 9,0 mA. Bereken hoeveel lading door een denkbeeldige doorsnede van de draad gaat gedurende 1,0 minuut.

§ 5 Condensator

Overzicht van de grootheden en eenheden in deze paragraaf

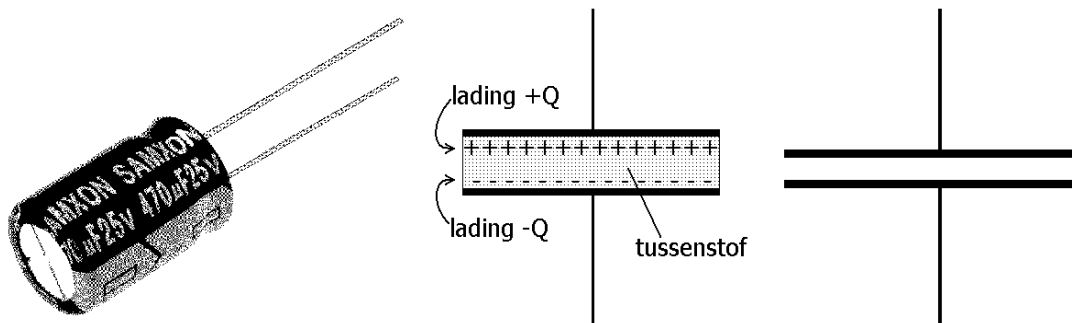
In de tabel hiernaast staan de grootheden en eenheden die in deze paragraaf van belang zijn. Nieuw is de grootheid 'capaciteit' met de bijbehorende eenheid 'farad'. De capaciteit is een eigenschap van een condensator die een zeer belangrijke component in de elektronica is.

Grootheden	Eenheden
Q = lading	C = coulomb
U = spanning	V = volt
C = capaciteit	F = farad

De grootheid lading en zijn eenheid coulomb worden respectievelijk met de hoofdletters Q en C aangegeven. De grootheid capaciteit en zijn eenheid farad worden met de hoofdletters C en F aangegeven. Met het zinnetje "Quick Cats Catch Flies." kunnen deze letters onthouden worden. Merk op dat C twee betekenissen kan hebben namelijk de eenheid van lading en de grootheid capaciteit. Dat is eigenlijk een ongelukkig gebruik, maar in de praktijk ontstaat er gelukkig weinig verwarring.

Condensator

Een onderdeel dat in de elektronica veel gebruikt wordt, is een condensator. In de volgende figuur is links zo'n condensator afgebeeld. Schematisch kun je een condensator voorstellen als twee metaalplaten (plaatjes) waar een bepaalde isolerende stof (bijvoorbeeld mica of polystyreen) tussen zit. Zie het middelste plaatje. In werkelijkheid zijn beide oppervlakken in verhouding tot hun onderlinge afstand veel groter. Het symbool voor een condensator, zoals dat in een schakelschema gebruikt wordt, is in de rechter figuur afgebeeld.



De platen van een condensator kunnen door een spanningsbron elektrisch geladen worden, zoals in de middelste figuur hierboven is weergegeven. De lading op de ene plaat is altijd even groot maar tegengesteld aan de lading op de andere plaat. Als de ene plaat een lading plus Q heeft, heeft de andere plaat dus een lading min Q . Gemakshalve zeggen we dat de condensator dan opgeladen is, maar als je de condensator als één geheel ziet, is hij natuurlijk elektrisch neutraal.

De naam condensator is afgeleid van het Latijnse woord 'condensare', wat samenpersen betekent. Een condensator is dus een samenperser, wat betrekking heeft op de ladingen die samengeperst worden bij de polen (platen) van de condensator.

De meeste condensatoren zijn, net als weerstanden, volkomen symmetrisch opgebouwd. Je mag de aansluitdraden dan rustig omwisselen zonder de goede werking van de condensator te verliezen. Een uitzondering hierop vormen elektrolytische condensatoren (kortweg elco's genoemd). Als je deze verkeerd aansluit, kunnen ze kapot gaan en zelfs exploderen! Het voordeel van elco's is dat ze een hoge capaciteit (dit begrip wordt hierna behandeld) hebben bij relatief kleine afmetingen.

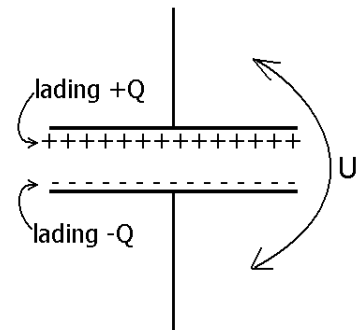
Capaciteit van een condensator

Als de condensator opgeladen is, heerst er een spanning U tussen de aansluitpunten. Zie de figuur hiernaast. De lading Q en de spanning U zijn evenredig met elkaar. Dat wil zeggen dat als de spanning twee keer zo groot wordt, de lading op de platen ook twee keer zo groot wordt. De evenredigheidsconstante heet de capaciteit C van de condensator. De capaciteit C kan worden uitgerekend door de lading Q te delen door de spanning U . In formulevorm wordt dit:

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

De twee andere vormen van deze formule zijn:

$$Q = C \cdot U \quad \text{en} \quad U = \frac{Q}{C}$$



Merk op dat we in deze formule alleen de grootte van de lading Q gebruiken, maar we moeten blijven beseffen dat er in feite in een condensator een lading Q op de ene plaat en een lading $-Q$ op de andere plaat zit.

Hoe groter de capaciteit is, des te meer lading de condensatorplaten hebben bij een bepaalde spanning. De capaciteit wordt in farad (F) uitgedrukt. Een farad is kennelijk (zie bovenstaande formule) gelijk aan een coulomb per volt. De condensatoren die in de elektronica gebruikt worden, hebben een capaciteit die veel kleiner is dan 1 F. Dit houdt verband met het feit dat 1 coulomb een enorm grote lading is. De meeste condensatoren hebben een capaciteit die tussen 1 nF ($n = \text{nano} = 1/10^9$) en 1 mF ligt.

Getallenvoorbeelden

Voorbeeld 1

Een condensator wordt opgeladen tot 10 V. De ladingen op de condensatorplaten bedragen 47 μC en -47 μC . De capaciteit C van de condensator wordt als volgt berekend:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{47 \mu\text{C}}{10 \text{ V}} = 4,7 \mu\text{F} \quad (\text{spreek uit microfarad, dit is een miljoenste farad})$$

Voorbeeld 2

Een condensator met een capaciteit van 1 μF wordt opgeladen tot een spanning van 25 V. De lading op de condensatorplaten kan als volgt worden berekend:

$$Q = C \cdot U = 1 \mu\text{F} \cdot 25 \text{ V} = 25 \mu\text{C} \quad (\text{spreek uit microcoulomb}).$$

Dat wil dus zeggen dat er 25 μC op de ene plaat zit en -25 μC op de andere plaat.

Voorbeeld 3

Een condensator met een capaciteit van 5 μF wordt zodanig opgeladen, dat de lading op zijn condensatorplaten +80 μC en -80 μC is. De spanning over de condensator kan dan als volgt berekend worden:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{80 \mu\text{C}}{5 \mu\text{F}} = 16 \text{ V}$$

Opgaven bij § 5

Opgave 1

Welke formule geeft aan hoe de capaciteit van een condensator uitgedrukt kan worden in de lading op zijn platen en de spanning tussen zijn platen?

Opgave 2

In de natuurkunde heeft de eenheid 'coulomb per volt' een eigen naam. Welke is dat?

Opgave 3

Een electronicus kan zeggen dat een condensator opgeladen is, terwijl de condensator als geheel toch elektrisch neutraal is. Wat bedoelt hij dan?

Opgave 4

Een condensator met een capaciteit van $10 \mu\text{F}$ wordt opgeladen tot een spanning van $9,0 \text{ V}$. Bereken de grootte Q van de lading op de condensatorplaten.

Opgave 5

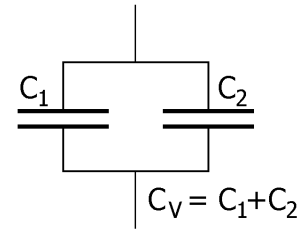
De spanning over een condensator bedraagt 250 V . De lading op de platen bedraagt $22 \mu\text{C}$. Bereken de capaciteit van de condensator.

Opgave 6

Een condensator heeft een capaciteit van 100 nF . De condensator wordt zodanig opgeladen, dat de lading op de platen $20 \mu\text{C}$ bedraagt. Bereken de spanning over de condensator.

Opgave 7

Als je twee condensatoren C_1 en C_2 parallel schakelt zoals in de figuur hiernaast is afgebeeld, is de uiteindelijke capaciteit C_V gelijk aan de optelsom van de twee capaciteiten van C_1 en C_2 .



a.

Stel dat je een condensator van $15 \mu\text{F}$ parallel schakelt aan een condensator van $33 \mu\text{F}$. Hoe groot is dan de capaciteit van de combinatie van deze twee condensatoren?

Net als bij weerstanden geldt ook voor condensatoren dat ze eigenlijk alleen in groten getale gemaakt worden volgens de E12 reeks. Zo hebben we tussen 1 nF en 10 nF de volgende mogelijke waarden beschikbaar: $1,0 \text{ nF}$, $1,2 \text{ nF}$, $1,5 \text{ nF}$, $1,8 \text{ nF}$, $2,2 \text{ nF}$, $2,7 \text{ nF}$, $3,3 \text{ nF}$, $3,9 \text{ nF}$, $4,7 \text{ nF}$, $5,6 \text{ nF}$, $6,8 \text{ nF}$, $8,2 \text{ nF}$ en 10 nF . Op dezelfde manier zijn bijvoorbeeld binnen het gebied van $10 \mu\text{F}$ tot $100 \mu\text{F}$ de volgende waarden beschikbaar: $10 \mu\text{F}$, $12 \mu\text{F}$, $15 \mu\text{F}$, $18 \mu\text{F}$, $22 \mu\text{F}$, $27 \mu\text{F}$, $33 \mu\text{F}$, $39 \mu\text{F}$, $47 \mu\text{F}$, $56 \mu\text{F}$, $68 \mu\text{F}$, $82 \mu\text{F}$ en $100 \mu\text{F}$.

b.

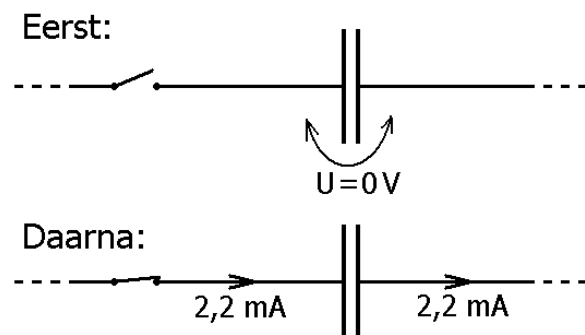
Welke twee condensatoren uit de E12 reeks kun je parallel schakelen om op een capaciteit van $40 \mu\text{F}$ uit te komen?

Opgave 8

In de bovenste figuur hiernaast is de condensator, die een capaciteit van $0,5 \text{ mF}$ heeft, nog niet opgeladen. De spanning over de condensator is dan dus 0 V .

Op een bepaald moment wordt de schakelaar gesloten en loopt er gedurende enige tijd door de draad een constante stroomsterkte van $2,2 \text{ mA}$. Zie de onderste figuur hiernaast.

Bereken de spanning over de condensator nadat de stroom $3,0$ seconde gelopen heeft.



§ 6 Een condensator op- en ontladen

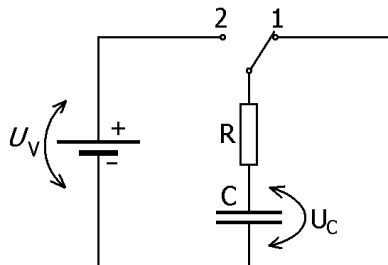
Overzicht van de grootheden en eenheden in deze paragraaf

In deze paragraaf staat het opladen en ontladen van een condensator centraal. In de tabel hiernaast staan de belangrijkste grootheden en eenheden van de paragraaf.

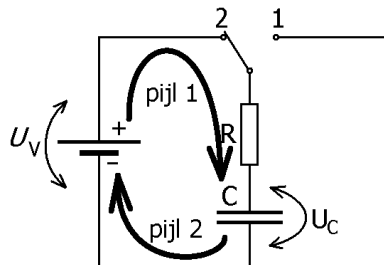
Grootheden	Eenheden
R = weerstand	Ω = ohm
C = capaciteit	F = farad
t = tijdsduur	S = seconde
Speciaal in deze paragraaf: RC-tijd	

Een condensator opladen en ontladen via een weerstand

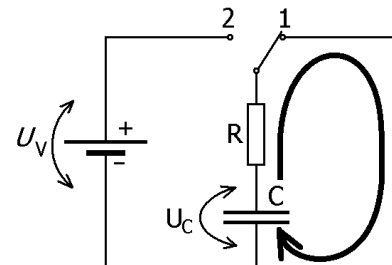
In de onderstaande schakelingen staat condensator C in serie met weerstand R . In de linker figuur heeft de schakelaar al geruime tijd in stand 1 gestaan. Daardoor is de condensator via weerstand R volledig ontladen. De spanning U_C over de condensator is nul.



Beginsituatie: de condensator is geheel ongeladen.



Nadat de schakelaar in stand 2 is gezet, wordt de condensator opgeladen.



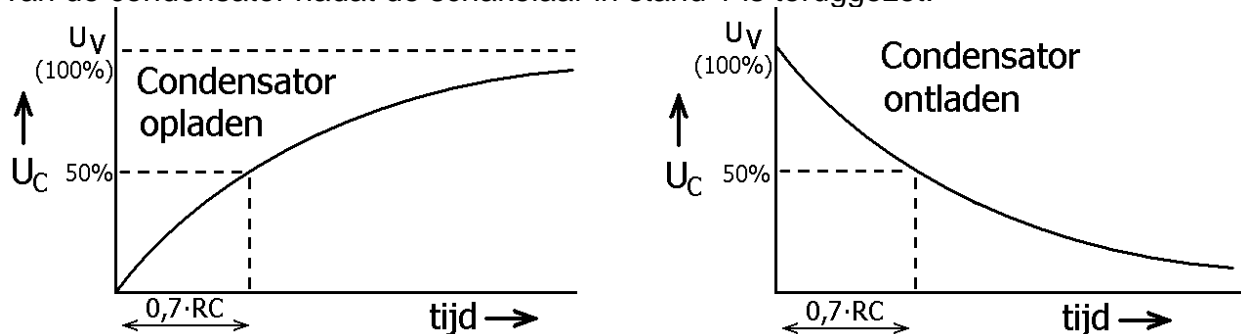
Nadat de schakelaar terug is gezet naar stand 1, wordt de condensator weer ontladen.

De middelste figuur geeft de schakeling weer, nadat de schakelaar in stand 2 is gezet. Er loopt een elektrische stroom in de linker stroomkring, zoals door de pijlen 1 en 2 is weergegeven. De spanningsbron zuigt elektronen van de bovenste condensatorplaat weg waardoor deze steeds meer positief geladen wordt (zie pijl 1; bedenk hierbij dat de elektronenstroom en de elektrische stroom tegengesteld gericht zijn). Op dezelfde manier stuurt de spanningsbron elektronen naar de onderste condensatorplaat waardoor deze steeds meer negatief geladen wordt (zie pijl 2). Uiteindelijk wordt de spanning over de condensator U_C gelijk aan de voedingsspanning U_V . Het opladen duurt enige tijd omdat de weerstand R ervoor zorgt dat er geen grote stroom kan lopen.

De rechter figuur geeft de schakeling weer, nadat de schakelaar weer terug is gezet naar stand 1. De condensator wordt dan ontladen via de rechter stroomkring (de pijl geeft de elektrische stroom weer). De overtollige elektronen op de onderste plaat bewegen via weerstand R naar de bovenste plaat, waar een elektronentekort heerst. Op dezelfde manier als bij het opladen, zorgt de weerstand ervoor dat het ontladen van de condensator enige tijd duurt.

De condensatorspanning als functie van de tijd

In de onderstaande diagrammen is de spanning U_C over de condensator tegen de tijd uitgezet. Het linker diagram heeft betrekking op het opladen van de condensator nadat de schakelaar in stand 2 is gezet. Het rechter diagram heeft betrekking op het ontladen van de condensator nadat de schakelaar in stand 1 is teruggezet.



Uit de diagrammen blijkt duidelijk dat het tempo van opladen en het tempo van ontladen steeds kleiner wordt. Naarmate de condensatorspanning namelijk dichterbij zijn eindwaarde komt, wordt de spanning over de weerstand lager en daalt de stroomsterkte en daarmee ook het tempo van opladen en/of ontladen. Eigenlijk duurt het proces van opladen en ontladen oneindig lang, maar in de praktijk mogen we op een gegeven moment wel zeggen dat de condensator volledig is opgeladen of ontladen.

De tijd die nodig is voor het opladen en ontladen; het begrip RC-tijd

Het proces van opladen en ontladen van de condensator duurt langer als:

- 1) de condensator een grotere capaciteit heeft;
- 2) de weerstand een grotere weerstandswaarde heeft.

Dit is eenvoudig te begrijpen. Als de capaciteit bijvoorbeeld twee keer zo groot zou zijn, moet er twee keer zoveel lading naar en van de platen gaan, wat bij dezelfde weerstand twee keer zo lang duurt. Als de weerstand twee keer zo groot zou zijn, is de elektrische stroom twee keer zo klein, waardoor het opladen bij dezelfde condensator ook twee keer zo lang duurt.

Om een idee te krijgen hoelang het opladen of ontladen duurt, kun je de zogenoemde 'RC-tijd' berekenen. De RC-tijd is het product van de weerstand R en de capaciteit C en heeft de eenheid seconde. Voor ons zijn de volgende vuistregels van belang.

1)

Als een ongeladen condensator C via een serieweerstand R op een gelijkspanningsbron wordt aangesloten, zal na een tijdsduur van $0,7 \cdot R \cdot C$ de condensatorspanning de helft van de spanning van de bron bedragen.

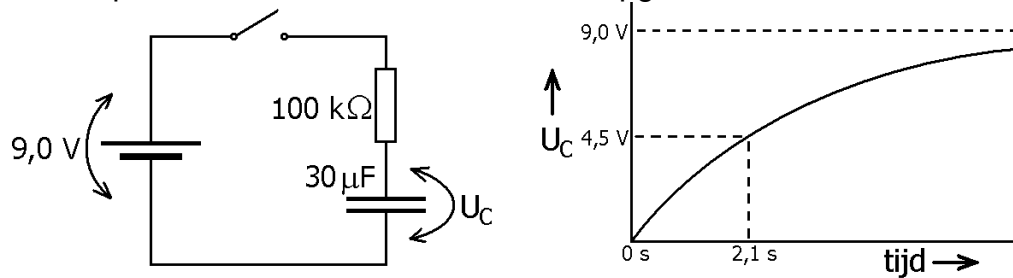
2)

Als een opgeladen condensator C via een serieweerstand R ontladen wordt, zal na een tijdsduur van $0,7 \cdot R \cdot C$ de condensatorspanning de helft van de oorspronkelijke condensatorspanning bedragen.

Ga in de twee voorgaande diagrammen na dat na $0,7 \cdot RC$ de spanning inderdaad op de helft van de eind- of beginwaarde zit (zie de stippellijntjes).

Voorbeeld van het opladen van een condensator

In de onderstaande schakeling wordt, na het sluiten van de schakelaar, de condensator van $30 \mu\text{F}$ via een weerstand van $100 \text{ k}\Omega$ opgeladen tot $9,0 \text{ V}$.



Naast de schakeling staat het diagram waarin de condensatorspanning tegen de tijd is uitgezet. In het begin is de spanning $0,0 \text{ V}$ omdat de condensator nog ongeladen is. Na $2,1 \text{ s}$ is de spanning gestegen tot de helft van de voedingsspanning, namelijk $4,5 \text{ V}$. Dit kunnen we als volgt controleren.

Voor de RC-tijd geldt: $RC = 100 \text{ k}\Omega \cdot 30 \mu\text{F} = 3,0 \text{ s}$.

De halve voedingsspanning wordt bereikt na: $0,7 \cdot RC = 0,7 \cdot 3,0 \text{ s} = 2,1 \text{ s}$.

Opgaven bij § 6

Opgave 1

Een condensator van 330 nF ontladst zich via een weerstand van 120 k Ω .

a.

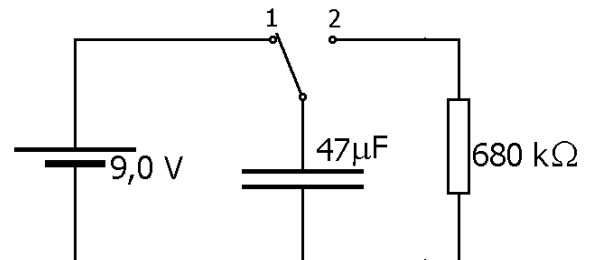
Bereken de RC-tijd (je moet dus gewoon R met C vermenigvuldigen).

b.

Bereken na hoeveel tijd de spanning over de condensator is gehalveerd (je hoeft de bij vraag a gevonden RC-tijd dan alleen maar met 0,7 te vermenigvuldigen).

Opgave 2

In de schakeling hiernaast staat de schakelaar in stand 1 en is de condensator opgeladen. Op een bepaald moment wordt de schakelaar omgezet naar stand 2. De condensator ontladst zich vervolgens over de weerstand.



a.

Bereken de RC-tijd.

b.

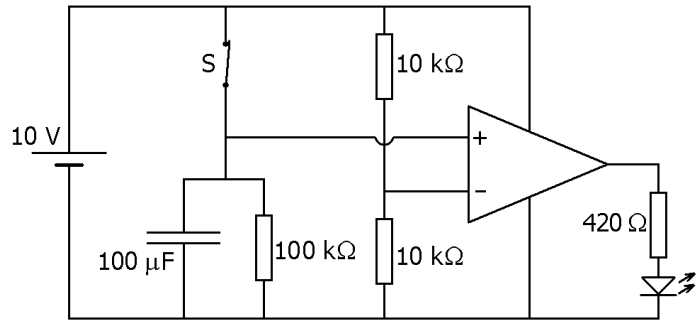
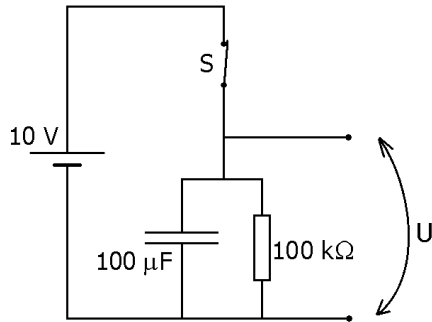
Bereken na hoeveel tijd de spanning over de condensator is gehalveerd.

c.

Schets hieronder het diagram waarin de spanning over de condensator is uitgezet tegen de tijd. Verwerk in het diagram de bij b. gevonden waarde.

Opgave 3

In de onderstaande linker schakeling is schakelaar S gesloten. De condensator ($100 \mu\text{F}$) is dan opgeladen tot 10 V . Nadat S geopend wordt, ontladde de condensator zich over de weerstand ($100 \text{ k}\Omega$).



a.

Bereken hoe lang het na het openen van S duurt voordat spanning U gehalveerd is.

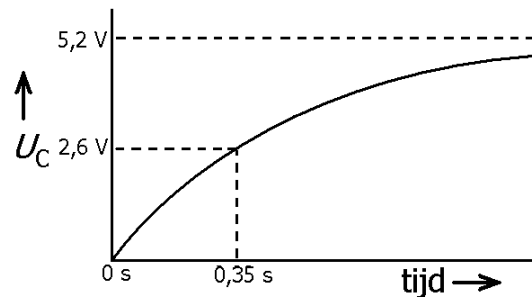
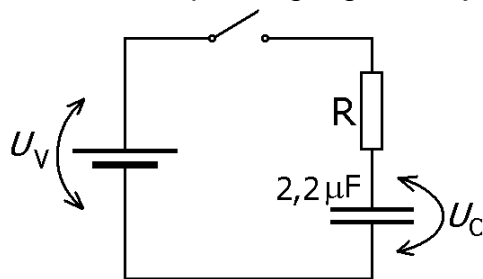
In de bovenstaande rechter schakeling kun je aan de led zien wanneer de spanning over de condensator gehalveerd is.

b.

Leg dat kort uit.

Opgave 4

In de onderstaande schakeling wordt een condensator opgeladen nadat de schakelaar gesloten wordt. Rechts naast de schakeling staat het diagram waarin de condensatorspanning tegen de tijd uitgezet is.



a.

Hoe groot is de spanning U_V die de spanningsbron levert?

b.

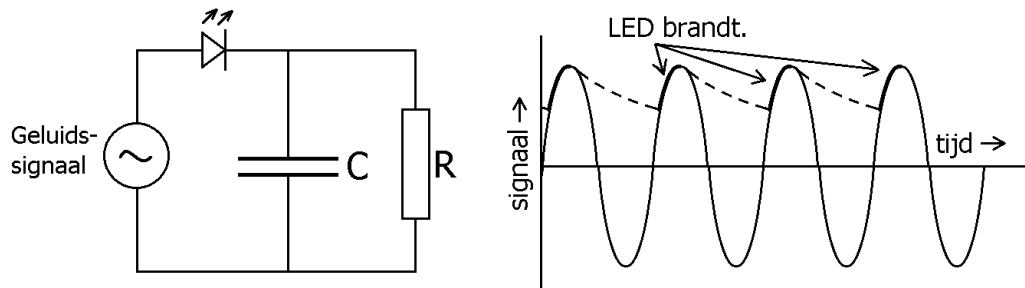
Bepaal uit het diagram de grootte van de RC-tijd.

c.

Bepaal de grootte van de weerstand R.

Opgave 5

De onderstaande schakeling is een eenvoudige 'topdetector' afgebeeld. Bij een topdetector brandt een led alleen bij de positieve pieken van een signaal. Kort voor het bereiken van de positieve top komt de led in doorlaat (en geeft licht!) en laadt dan heel snel condensator C op. Dit is in de rechter figuur aangegeven. Zodra de spanning na de top gaat dalen, komt de led in sperrichting te staan en gaat de condensator zich langzaam ontladen via weerstand R. Deze ontleding is met een stippellijn weergegeven. Bij de volgende positieve piek van het signaal komt de diode weer in doorlaat. Enzovoort.



Stel dat de led zo lang mogelijk moet branden bij elke piek.

a.

Moet je bij een gegeven condensator de waarde van R dan groot of juist klein kiezen? Leg je keuze uit.

Stel dat de led bij de spanningspieken feller moet branden.

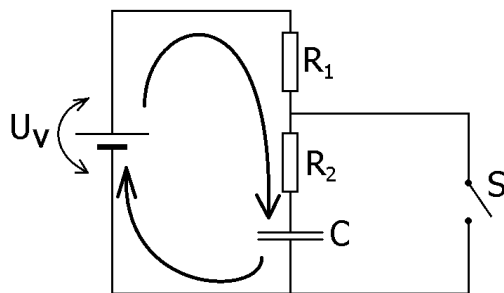
b.

Hoe zou de waarde van C dan moeten veranderen? Bedenk daarbij dat de stroom door de led hoofdzakelijk naar de condensator gaat.

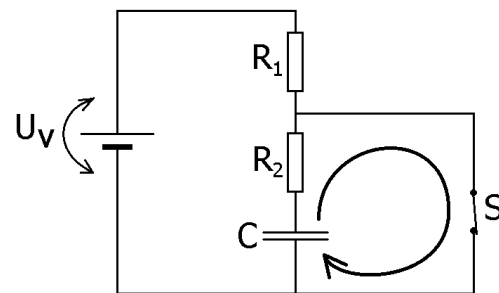
§ 7 De 555 timer

Met een schakelaar een condensator afwisselend laten opladen en ontladen

In de onderstaande figuren staat een schakeling waarin de stand van de schakelaar S bepaalt of condensator C wordt opgeladen of ontladen. In de linker figuur staat S open en wordt de condensator via de serieschakeling van de weerstanden R_1 en R_2 opgeladen tot de voedingsspanning U_V . In de rechter figuur is S gesloten en ontlaat de condensator zich via weerstand R_2 tot een spanning van nul volt. In de figuren zijn de oplaad- en ontladstroom van de condensator met pijlen aangegeven.

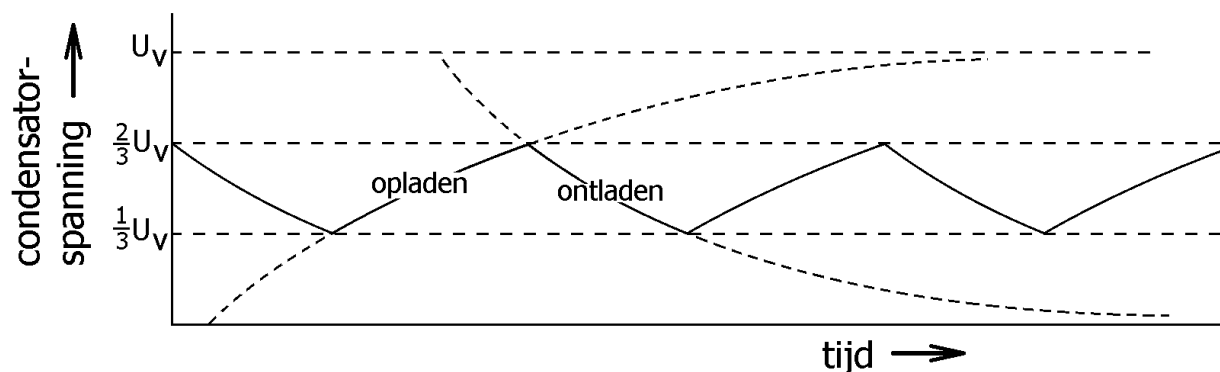


Condensator C opladen



Condensator C ontladen

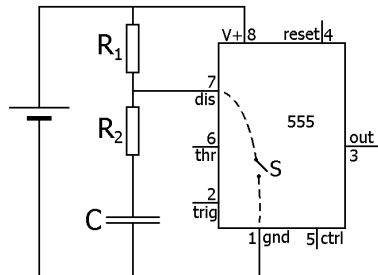
In de rest van deze paragraaf laten we de spanning van de condensator schommelen tussen een derde en twee derde van de voedingsspanning. Als de condensator zich aan het opladen is (S is open), wordt de schakelaar gesloten op het moment dat de condensatorspanning twee derde van de voedingsspanning wordt. Als de condensator zich aan het ontladen is (S gesloten), wordt de schakelaar geopend op het moment dat de condensatorspanning een derde van de voedingsspanning wordt. Het onderstaande diagram toont het verloop van de condensatorspanning als functie van de tijd.



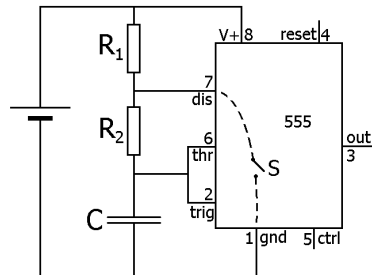
De tijdsduur dat de condensator zich aan het opladen is, bedraagt $0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C$.
De tijdsduur dat de condensator zich aan het ontladen is, bedraagt $0,7 \cdot R_2 \cdot C$.

Automatisch schakelen met behulp van de 555 timer

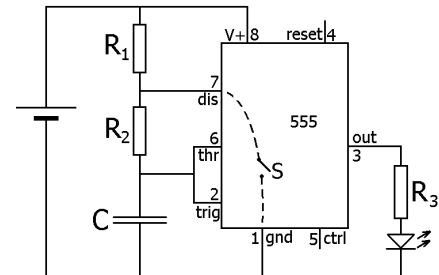
In deze paragraaf gaan we schakelaar S niet handmatig omzetten, maar gebruiken we hier een zeer bekend IC met acht pootjes (pins) voor, namelijk de zogenoemde '555 timer' of kortweg '555'. Zie de onderstaande figuren waarin de schakeling stapsgewijs wordt opgebouwd en uitgelegd.



Figuur 1



Figuur 2



Figuur 3

In figuur 1 zien we dat pin 7 de rol van schakelaar vervult. In het inwendige van de 555 wordt pin 7 namelijk al dan niet doorverbonden met pin 1. In de figuur is dit symbolisch weergegeven als schakelaar S. Pin 7 wordt de dischargepin genoemd (afgekort dis). Discharge betekent ontladen, wat hier natuurlijk op het ontladen van de condensator slaat. Pin 1 wordt de 'ground' (afgekort gnd) genoemd, wat 'aarde' betekent. Pin 1 is rechtstreeks met de minpool van de spanningsbron verbonden. Tenslotte is in figuur 1 pin 8 (V+) van de 555 met de pluspool van de spanningsbron verbonden. Dit is nodig om de 555 van energie te voorzien, zodat hij kan werken (net als een computer op het stopcontact moet worden aangesloten).

In figuur 2 is de bovenste plaat van de condensator met pin 6 en pin 2 verbonden. Pin 6 heet de thresholdpin (threshold = drempel) en sluit de denkbeeldige schakelaar S als zijn potentiaal (dus zijn spanning ten opzichte van aarde) boven twee derde van de voedingsspanning komt. Pin 2 heet de triggerpin en opent S als zijn potentiaal onder een derde van de voedingsspanning komt. De stromen door pin 6 en door pin 2 zijn zeer klein, zodat ze de oplaad- en ontlaadtijd van de condensator niet beïnvloeden. Pin 6 en 2 hebben dus een heel hoge ingangswaerstand.

In figuur 3 is een led, samen met serieweerstand R_3 , op pin 3 aangesloten. Pin 3 is de uitgang (output) van de 555. Zijn spanning ten opzichte van aarde (korter gezegd: zijn potentiaal) kan slechts twee waarden hebben, namelijk nul of de voedingsspanning. Als de denkbeeldige schakelaar S gesloten is, is de uitgangsspanning nul en brandt de led niet. Als de denkbeeldige schakelaar open is, is de uitgangsspanning hoog en brandt de led juist wel.

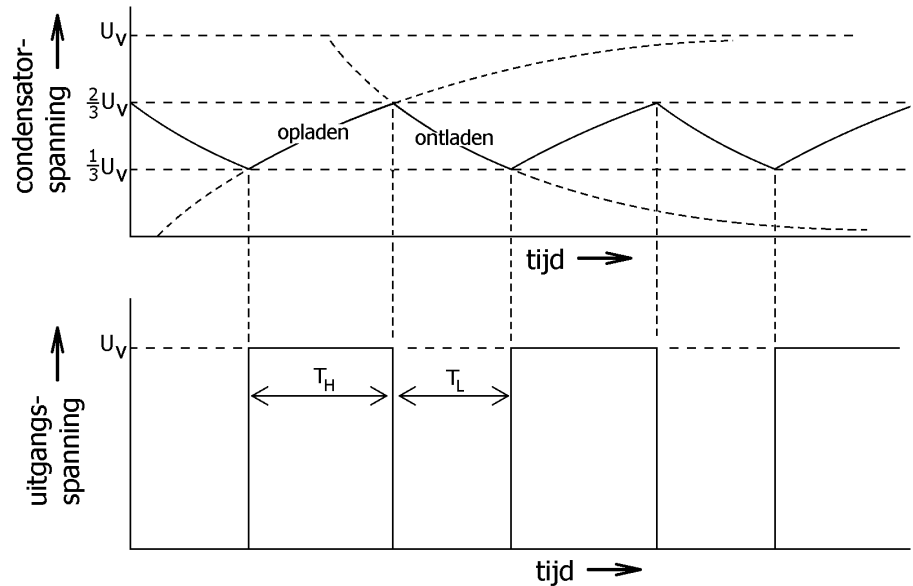
In de volgende diagrammen zijn de condensatorspanning en de uitgangsspanning als functie van de tijd weergegeven. Ga na dat de uitgang hoog is als de condensator zich aan het opladen is en dat de uitgang laag is als de condensator zich aan het ontladen is.

Voor T_H geldt:
$$T_H = 0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C$$

Voor T_L geldt:
$$T_L = 0,7 \cdot R_2 \cdot C$$

Merk op dat de uitgangsspanning niet symmetrisch is, want tijdsduur T_H is ongelijk aan tijdsduur T_L . De 'periode' is de tijd dat de uitgangsspanning een complete cyclus doorlopen heeft. Voor deze periode T geldt:

$$T = T_H + T_L.$$



Voorbeeld

De schakeling hiernaast produceert een blokspanning aan de uitgang (pin 3). Voor de tijd T_H dat de uitgang hoog is, geldt:

$$T_H = 0,7 \cdot (1\text{ k}\Omega + 1\text{ k}\Omega) \cdot 1\text{ }\mu\text{F} = 1,4\text{ ms}$$

Voor de tijd T_L dat de uitgang laag is, geldt:

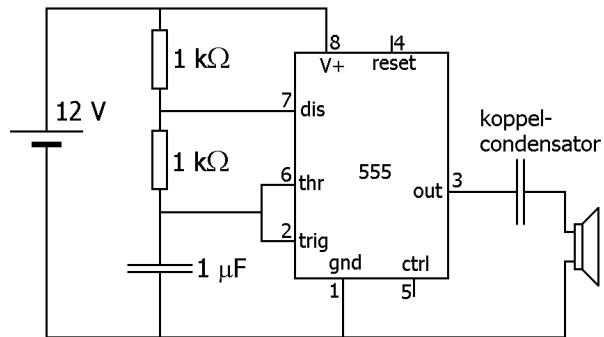
$$T_L = 0,7 \cdot 1\text{ k}\Omega \cdot 1\text{ }\mu\text{F} = 0,7\text{ ms}$$

Voor de periode van het uitgangssignaal geldt:

$$T = 1,4\text{ ms} + 0,7\text{ ms} = 2,1\text{ ms}.$$

Voor de frequentie van het signaal geldt:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,1\text{ ms}} = 476\text{ Hz}$$



Het signaal wordt hoorbaar gemaakt met een luidspreker. Tussen de uitgang van de 555 en de luidspreker is een koppelcondensator geplaatst. Deze heeft tot taak om het signaal (de wisselspanning) aan de luidspreker door te geven zonder de gelijkspanning mee te nemen. In deze schakeling betekent dit dat de luidspreker een spanning krijgt die ligt tussen -6 V en +6 V in plaats van een spanning die ligt tussen 0 V en +12 V.

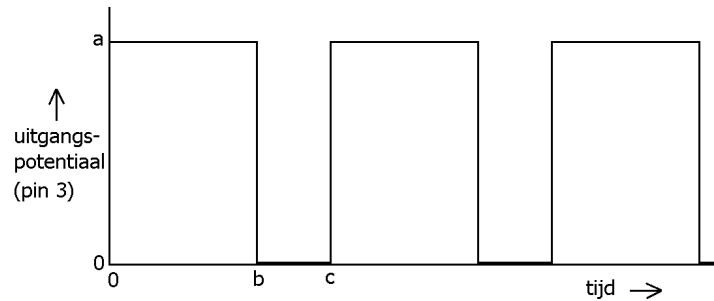
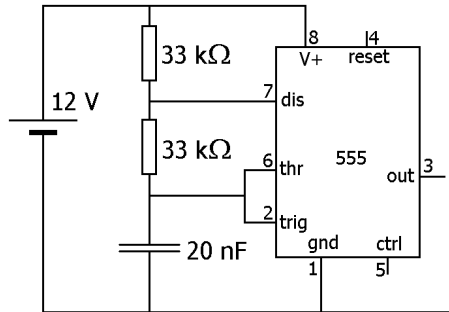
Opmerking

De 555 heeft een lage uitgangsweerstand. De uitgangsspanning (de spanning tussen pin 3 en aarde) wordt dus maar weinig beïnvloed door de uitgangsstroom. Toch mag de 555 niet te zwaar belast worden. De stroom, die de 555 aan de uitgang kan leveren, is beperkt (voor de NE555, een gangbare uitvoering, is deze maximaal 200 mA). Daarom mag de luidspreker in de schakeling geen kleinere weerstand dan zeg 70 Ω hebben. Veel huidige luidsprekers hebben een weerstand van slechts 8 Ω (of zelfs 4 Ω). Zulke luidsprekers kunnen dan alleen in combinatie met een serieweerstand, of een transformator of via een tussenversterker gebruikt worden.

Opgaven bij § 7

Opgave 1

In de onderstaande schakeling levert de uitgang (pin 3 dus) van de 555 een blokspanning.



a.
Bereken de tijdsduur waarin de uitgang hoog is.

b.
Bereken de tijdsduur waarin de uitgang laag is.

In het diagram naast de schakeling is de uitgangspotential (uitgangsspanning) van de 555 getekend.

c.
Welke waarde langs de verticale as staat op plaats a?

Welke waarde langs de horizontale as staat op plaats b?

Welke waarde langs de horizontale as staat op plaats c?

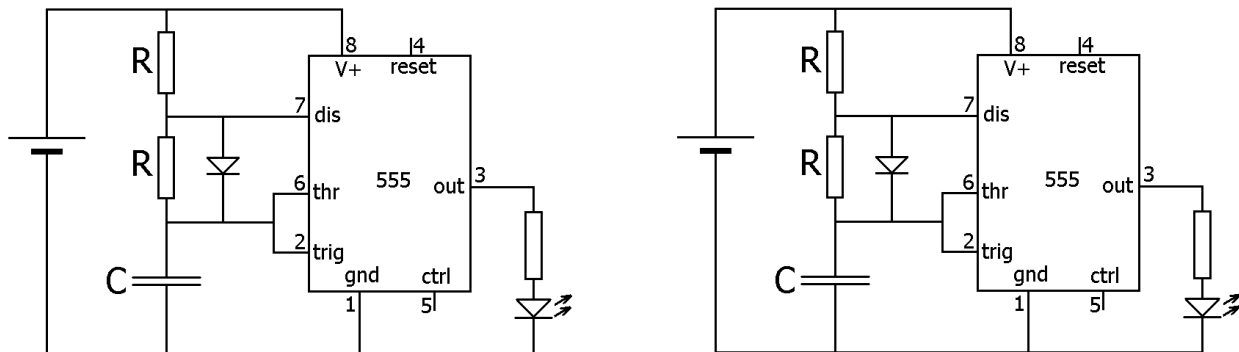
d.
Bereken de frequentie van de blokspanning.

Stel dat je het uitgangssignaal hoorbaar wilt maken met een luidspreker.

e.
Teken dan in de schakeling de extra componenten.

Opgave 2

In de onderstaande figuren is twee maal dezelfde schakeling getekend. In de schakeling zijn de twee weerstanden R even groot. Parallel aan de onderste R staat een diode.



a.

In de linker figuur is de uitgang van de 555 hoog. Teken in deze figuur de weg die de elektrische stroom volgt van de pluspool (van de voeding) naar de condensator C.

b.

In de rechter figuur is de uitgang van de 555 laag. Teken in deze figuur de weg die de elektrische stroom volgt van de condensator naar pin 7 van de 555.

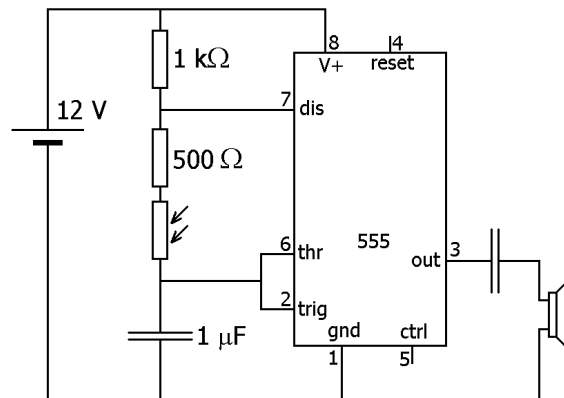
De uitgang van de 555 levert (bij benadering) een symmetrische blokspanning. Dat wil zeggen dat de tijd dat de uitgang hoog is, even lang is als de tijd dat de uitgang laag is.

c.

Geef een uitdrukking (formule) voor de periode (= de tijd die een complete cyclus duurt) van de blokspanning.

Opgave 3

In de schakeling hiernaast is een LDR opgenomen. Leg uit of de geproduceerde toonhoogte toeneemt of afneemt als er meer licht op de LDR valt.



Opgave 4

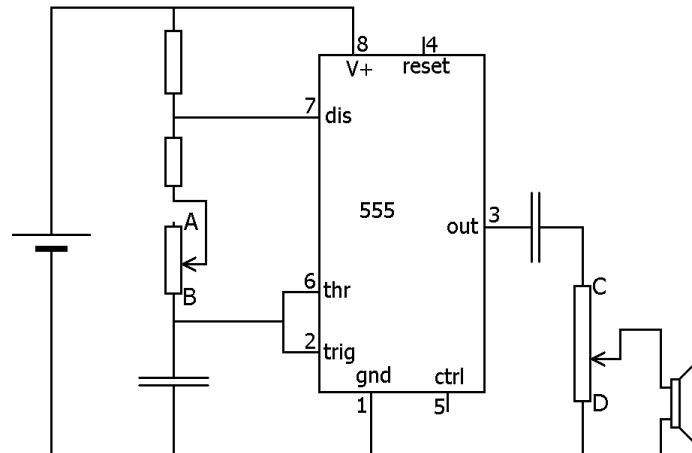
In de schakeling hiernaast zitten twee potentiometers.

Vul de volgende zinnen aan. Kies daarbij uit 'hoger', 'lager', 'harder' of 'zachter'.

Als de looper van de linker potmeter in de richting van A wordt geschoven, wordt het geluid uit de luidspreker

_____.

Als de looper van de rechter potmeter in de richting van D wordt geschoven, wordt het geluid uit de luidspreker _____.



§ 8 Het frequentieafhankelijke gedrag van een condensator

Overzicht van de grootheden en eenheden in deze paragraaf

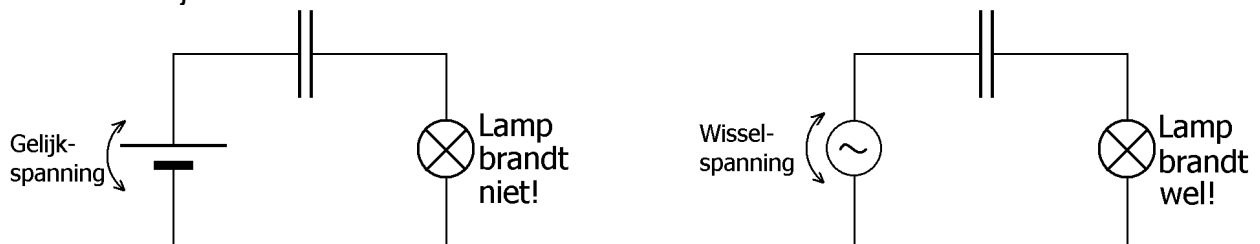
In deze paragraaf staat het frequentieafhankelijke gedrag van een condensator centraal. In de tabel hiernaast staan de belangrijkste grootheden en eenheden van de paragraaf. Nieuw is de kantelfrequentie.

Grootheden	Eenheden
R = weerstand	Ω = ohm
C = capaciteit	F = farad
f = frequentie	Hz = hertz
Speciaal in deze paragraaf: f_K = kantelfrequentie	

Een condensator laat alleen wisselstroom door

Eén van de redenen waarom een condensator in de elektronica gebruikt wordt, is dat hij geen gelijkstroom maar wel wisselstroom doorlaat. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de onderstaande schakelingen. Hierin is een lamp, in serie met een condensator, op een spanningsbron aangesloten.

In de linker schakeling levert de bron gelijkspanning. Zoals we in het voorgaande hebben gezien, laadt de condensator zich eenmalig op en zien we de lamp even branden. Daarna loopt er geen stroom meer in de stroomkring en brandt de lamp niet meer. Als we de spanning van de bron daarna zouden omkeren naar een even grote, maar negatieve gelijkspanning (nog steeds in de linker schakeling), loopt er in het begin weer een stroom, maar nu de andere kant op. Na het ompolen brandt de lamp dus weer korte tijd.



Het bovenstaande komt er op neer dat als we de spanning niet constant houden maar steeds veranderen, de condensator zich steeds moet aanpassen aan de gewijzigde spanning en er wel stroom door de stroomkring loopt. Dit is het geval in de rechter schakeling. Hierin levert de spanningsbron een wisselspanning waardoor er in de stroomkring een wisselstroom gaat lopen. Voorwaarde voor het branden van de lamp is wel, dat de frequentie van de wisselspanning hoog genoeg is. Als de pluspool en minpool van de spanningsbron namelijk in hoog tempo omwisselen, kan de condensator zich nauwelijks opladen omdat daar simpelweg geen tijd voor is. Het gevolg is dat de spanning over de condensator heel klein blijft en de wisselspanning van de bron bijna helemaal over de lamp komt te staan.

Bij lage frequenties van de wisselspanning brandt de lamp niet of nauwelijks. Het duurt dan in verhouding lange tijd voordat de polen omkeren (dus dat de pluspool minpool wordt en omgekeerd). De condensator heeft dan steeds voldoende tijd om zich op te laden respectievelijk te ontladen tot de (langzaam veranderende) voedingsspanning en daardoor is de spanning over de lamp slechts klein.

Het voorgaande kunnen we nu als volgt samenvatten.

Voor gelijkspanning gedraagt een condensator zich als een isolator. Voor wisselspanning gedraagt een condensator zich als een geleider. De frequentie van de wisselspanning mag dan echter niet te klein zijn.

Het kan verwarrend overkomen dat een condensator zich bij wisselspanning als een geleider gedraagt terwijl er toch nooit een elektrische stroom tussen beide condensatorplaten loopt. De elektrische stroom, die door de stroomkring loopt, stopt inderdaad bij de condensatorplaten. Hij veroorzaakt daar een ladingopbouw (of afbouw). Bij hoge frequenties is de tijdsduur waarin de stroom één kant opgaat echter maar kort; de stroom keert daarna van richting om. Van een grote ladingopbouw en van een grote spanning tussen de condensatorplaten kan dan dus geen sprake zijn.

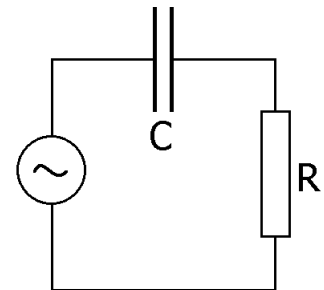
Kantelfrequentie

Hierboven werd een lamp in serie met een condensator op een bron van (sinusvormige) wisselspanning aangesloten. In de figuur hiernaast is deze schakeling nogmaals getekend, alleen is de lamp nu vervangen door weerstand R. Voor frequenties lager dan de zogenoemde 'kantelfrequentie' f_K gedraagt de condensator zich als isolator en voor frequenties hoger dan f_K gedraagt de condensator zich als geleider. De kantelfrequentie is geen scherpe grens; rond de kantelfrequentie is er een geleidelijke overgang van isolator naar geleider.

Voor de kantelfrequentie geldt:

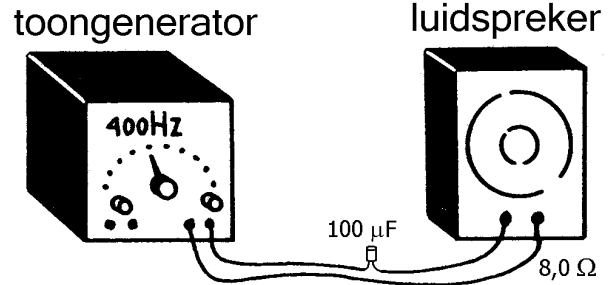
$$f_K = \frac{1}{2\pi RC}$$

In deze formule is R de weerstand en C de capaciteit van de condensator. Het feit dat RC in de noemer staat, is logisch want de RC-tijd is een maat voor de oplaadtijd (en onlaadtijd) van de condensator. Hoe kleiner RC is, des te sneller de condensatorspanning kan veranderen en des te hoger de kantelfrequentie komt te liggen.



Voorbeeld

In de schakeling hiernaast is een luidspreker (met een weerstandswaarde van $8,0 \Omega$) op een toongenerator aangesloten. Op de toongenerator zit een knop waarmee de frequentie van het opgewekte (sinusvormige) signaal kan worden gevarieerd. In serie met de luidspreker staat een condensator van $100 \mu\text{F}$.



Door toedoen van deze condensator worden lage frequenties (lage tonen) niet goed doorgegeven. Voor de kantelfrequentie geldt:

$$f_k = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 8,0 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \approx 200 \text{ Hz}$$

Het resultaat is dus dat de hogere tonen allemaal prima uit de luidspreker komen, maar dat de lagere bastonen er niet of heel zwak uit komen.

Opgaven bij § 8

Opgave 1

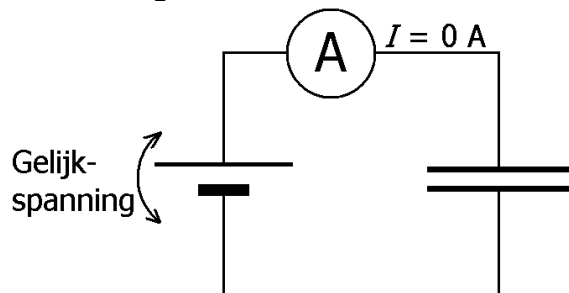
Kies in de volgende zinnen het juiste woord.

Een condensator gedraagt zich bij gelijkspanning als een ____isolator / geleider____.

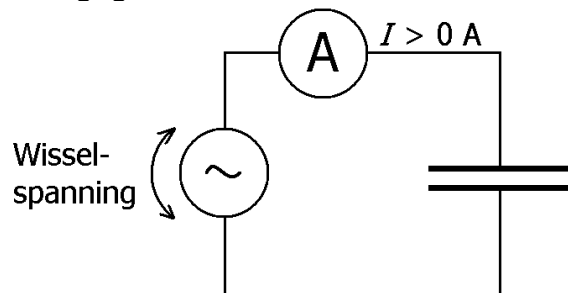
Een condensator gedraagt zich bij wisselspanning als een ____isolator / geleider____.

Opgave 2

Als een condensator op een gelijkspanningsbron wordt aangesloten, loopt er geen stroom (gelijkstroom) door de stroomkring. Als een condensator op een wisselspanningsbron wordt aangesloten, loopt er wel stroom (wisselstroom) door de stroomkring. Dit is in de onderstaande figuren weergegeven.



Er loopt GEEN gelijkstroom.



Er loopt WEL een wisselstroom.

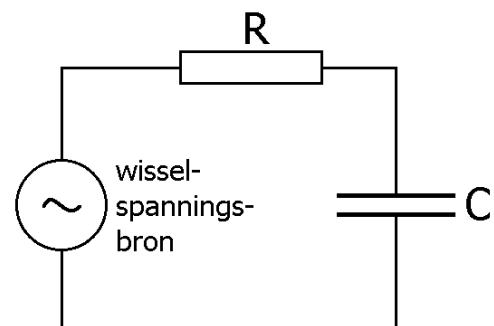
Leg kort uit waarom er in het tweede geval wel stroom loopt.

Opgave 3

In de schakeling hiernaast is weerstand R in serie met condensator C op een wisselspanningsbron aangesloten.

a.

Bereken de kantelfrequentie bij $R = 1,0 \text{ k}\Omega$ en $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$.



b.

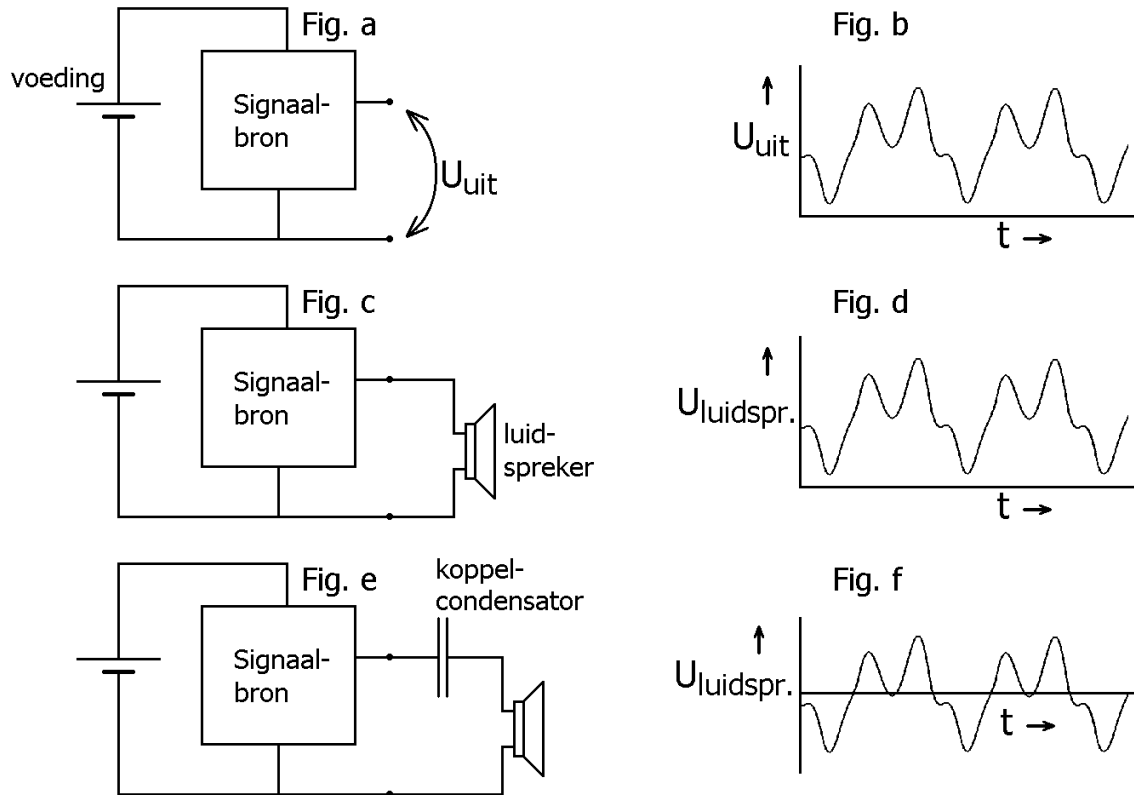
Bereken de waarde van R bij $C = 22 \text{ }\mu\text{F}$ en een kantelfrequentie van 250 Hz.

c.

Bereken de waarde van C bij $R = 8 \text{ }\Omega$ en een kantelfrequentie van 30 Hz.

Opgave 4

In de onderstaande figuur a is een signaalbron op een voedingsspanning aangesloten. De signaalbron kan bijvoorbeeld een IC zijn met wat aanvullende elektronische componenten. In figuur b is de uitgangsspanning U_{UIT} van het IC als functie van de tijd t afgebeeld. Deze uitgangsspanning varieert tussen nul en de voedingsspanning en zijn gemiddelde waarde ligt ter hoogte van de halve voedingsspanning.



In figuur c wordt een (slechte!) poging gedaan om het uitgangssignaal met een luidspreker hoorbaar te maken. De spanning over de luidspreker is in figuur d afgebeeld. Het probleem hierbij is dat de ene aansluiting van de luidspreker steeds positief is ten opzichte van de andere aansluiting. De conus van de luidspreker wordt dan steeds in één richting getrokken en dat is niet zo goed voor de luidspreker. Daarom is in figuur e een condensator, een zogenoemde koppelcondensator, in serie met de luidspreker gezet. De koppelcondensator laadt zich op tot de halve voedingsspanning. Hij kan de veranderingen van de uitgangsspanning echter niet bijbenen. Deze veranderingen komen dan over de luidspreker te staan. Zie figuur f. Nu eindelijk de vragen!

a.

Leg uit dat zeer lage tonen minder goed hoorbaar zijn dan de hogere tonen.

b.

Leg uit dat een koppelcondensator beter een grote dan een kleine capaciteit kan hebben.

Opgave 5

In de onderstaande schakeling A is een luidspreker op een wisselspanningsbron aangesloten. De bron geeft een muzieksignaal. Schakelingen B tot en met E bevatten een extra weerstand en/of een condensator. Hierdoor verandert het geluid uit de luidspreker. In deze opgave wordt gevraagd welke verandering dat is (steeds uitgaande van schakeling A). Gekozen kan worden uit de volgende mogelijkheden.

Mog. 1: Alleen de hoge tonen worden verzwakt.

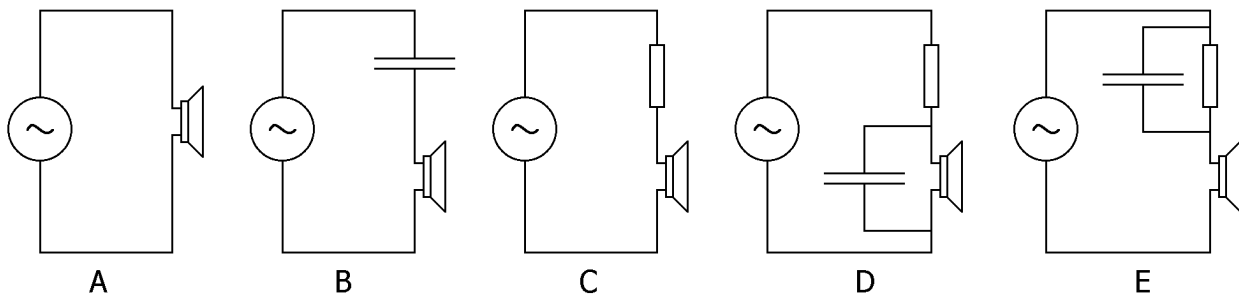
Mog. 2: Alleen de lage tonen worden verzwakt.

Mog. 3: Alle tonen worden verzwakt.

Mog. 4: Alle tonen worden verzwakt maar hoge tonen veel meer dan lage tonen.

Mog. 5: Alle tonen worden verzwakt maar lage tonen veel meer dan hoge tonen.

Ga er bij het maken van een keuze vanuit dat het kantelpunt ongeveer bij 800 Hz ligt (halverwege tussen lage en hoge tonen).



Bij schakeling B:

Bij schakeling C:

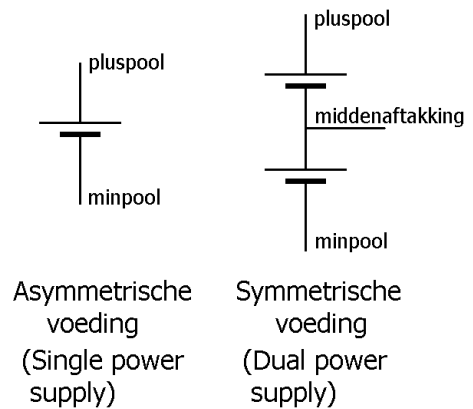
Bij schakeling D:

Bij schakeling E:

§ 9 Met een opamp een signaal versterken

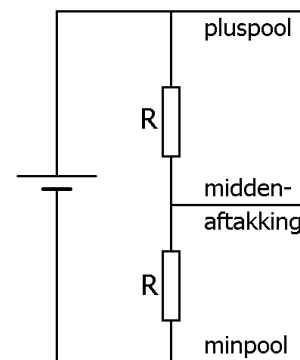
Symmetrische voeding

In de vorige paragrafen bevatte de voeding alleen een pluspool en een minpool en werd de minpool als aarde genomen. In het Engels wordt zo'n voeding aangeduid met 'single power supply'. Zie de linker figuur hiernaast. In de huidige paragraaf gebruiken we een voeding die naast de plus- en minpool ook nog een middenaftakking bezit. Zo'n voeding heet een symmetrische voeding en wordt in het Engels met 'dual power supply' aangeduid. Zie de rechter figuur hiernaast. De spanning tussen de pluspool en de middenaftakking is even groot als de spanning tussen de middenaftakking en de minpool. De middenaftakking wordt nu als aarde genomen. Dat betekent dat de potentiaal ook negatief kan worden.



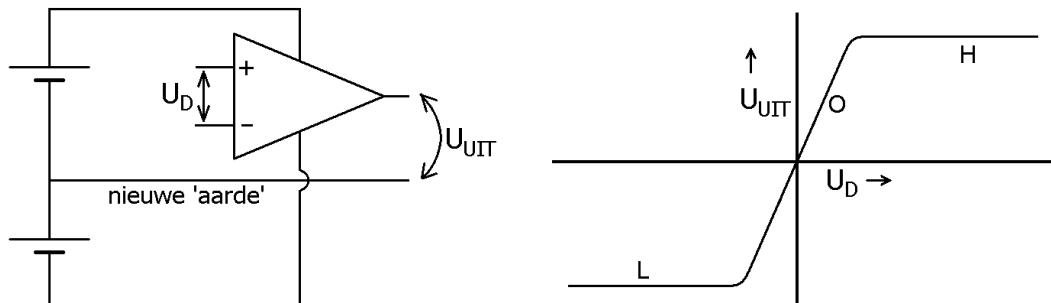
Een simpele batterij van 9 V kan bijvoorbeeld dienst doen als asymmetrische voeding. Een symmetrische voeding kan met twee 9 V-batterijen gemaakt worden door de pluspool van de ene batterij te verbinden met de minpool van de andere batterij (zie de rechter figuur hierboven). De met elkaar verbonden polen zijn dan de middenaftakking.

Als je een symmetrische voeding nodig hebt terwijl je alleen een simpele voeding tot je beschikking hebt, kun je met een spanningsdeler, die uit twee gelijke weerstanden bestaat, een middenaftakking maken. Zie de figuur hiernaast. Deze oplossing is echter verre van ideaal. Eén van de opgaven betreft verbeteringen die hierbij kunnen worden aangebracht.



Een signaal versterken met een opamp

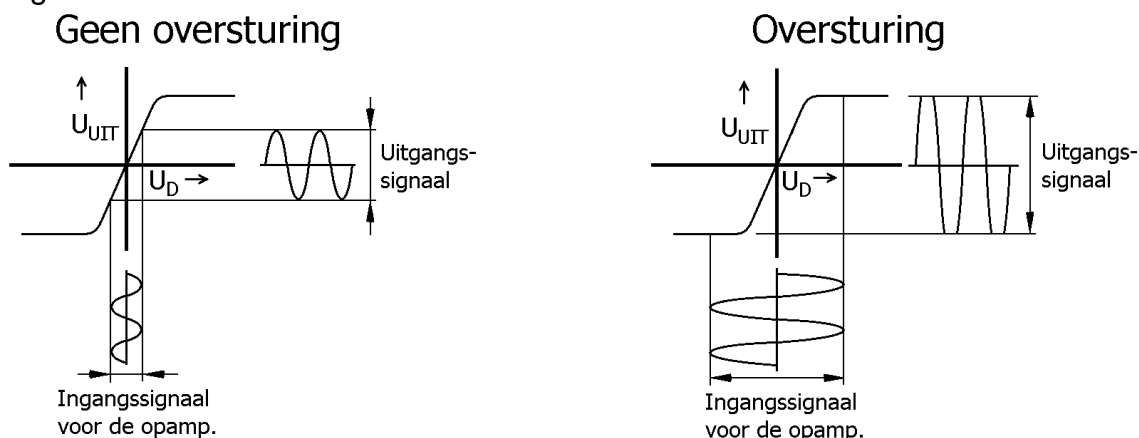
In de onderstaande schakeling is een opamp op een symmetrische voeding aangesloten. De middenaftakking van de voeding wordt als aarde genomen. Een opamp is zo gemaakt, dat zijn uitgangspotentiaal U_{UIT} (gerekend ten opzichte van de middenaftakking dus) in principe alleen van de spanning U_D tussen zijn plusingang en minusingang afhangt. In deze cursus wordt U_D de verschilspanning genoemd (de letter D staat voor 'differentie', wat verschil betekent). In het diagram naast de schakeling is het verband tussen U_{UIT} en U_D schematisch weergegeven.



Ruwweg bestaat de grafiek uit de drie gebieden L, H en O. In gebied L bereikt de potentiaal van de uitgang zijn ondergrens en ligt vlakbij de potentiaal van de minpool. In gebied H bereikt de potentiaal van de uitgang zijn bovengrens en ligt vlakbij de potentiaal van de pluspool. Gebied O vormt de overgang tussen de gebieden L en H. In werkelijkheid is gebied O erg smal en loopt bijvoorbeeld van $U_D = -0,1 \text{ mV}$ tot $U_D = +0,1 \text{ mV}$. Het getekende diagram is dus in horizontale richting erg uitgerekt.

In de huidige paragraaf gebruiken we de opamp als versterker van geluidssignalen of andere elektrische signalen. Gebied O is dan het werkgebied van de opamp. In eerdere paragrafen 'sprongen' we van gebied L naar gebied H en andersom zonder ons om het overgangsggebied te bekommeren.

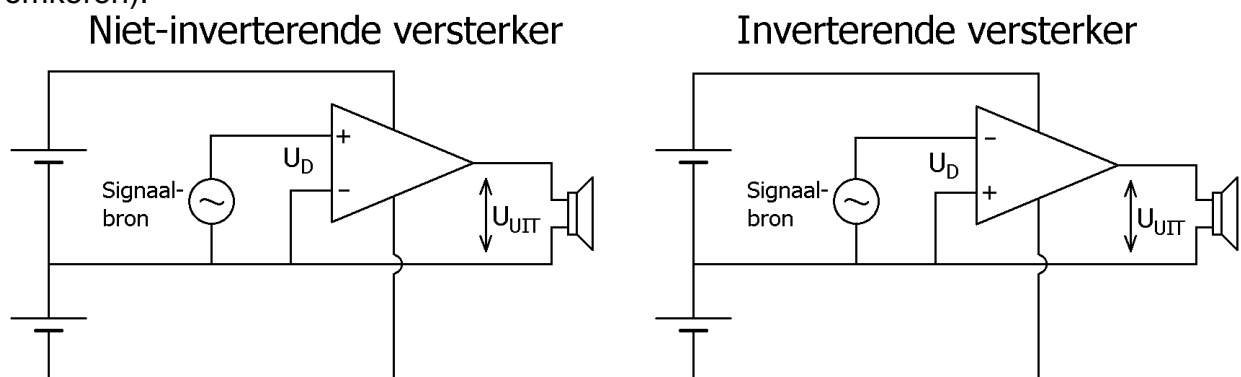
De onderstaande linker figuur laat het principe van de signaalversterking met een opamp zien. Het signaal dat aan de uitgang van de opamp verschijnt (uitgangssignaal) is veel groter dan het signaal dat aan de ingang van de opamp wordt aangeboden (ingangssignaal). Bedenk hierbij dat de diagrammen in horizontale richting sterk zijn uitgerekt.



In de rechter figuur komt hetingangssignaal voor de opamp buiten de grenzen van overgangsg gebied. Hierdoor vallen de pieken in het uitgangssignaal weg. Ga dat na. We spreken in dat geval van oversturing. Aangezien het overgangsg gebied zeer smal is (U_D loopt bijvoorbeeld van $-0,1$ mV tot $+0,1$ mV), is de kans hierop zeer groot. Zoals we verderop in deze paragraaf zullen zien, wordt dit probleem opgelost door de opamp 'tegen te koppelen'.

Versterker met een opamp zonder tegenkoppeling

In de onderstaande schakelingen wordt het signaal van een signaalbron door een opamp versterkt en met een (hoogohmige) luidspreker wordt het uitgangssignaal hoorbaar gemaakt. In de linker schakeling wordt de signaalbron op de plusingang van de opamp aangesloten en ligt de minusingang aan aarde. In de rechter schakeling wordt de signaalbron op de minusingang aangesloten en ligt de plusingang aan aarde. Links veroorzaakt een toename van de ingangspotentiaal ook een toename van de uitgangspotentiaal (zolang de verschilspanning U_D binnen het overgangsg gebied O blijft). Rechts veroorzaakt een toename van de ingangspotentiaal juist een afname van de uitgangspotentiaal. Daarom wordt de linker schakeling een niet-inverterende versterker genoemd en de rechter schakeling een inverterende versterker (inverteren betekent omkeren).



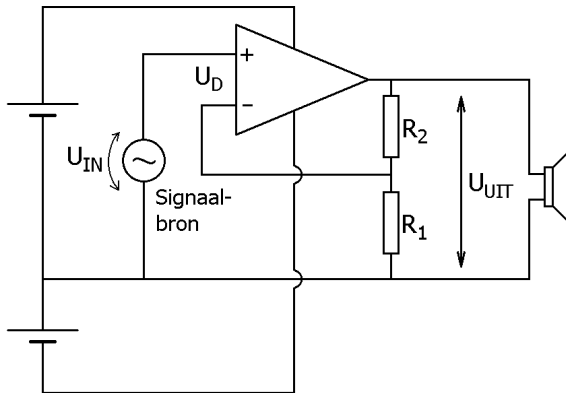
Zoals hiervoor reeds is gezegd, is de kans op oversturing bij deze schakelingen zéér groot. In de praktijk worden deze schakelingen daarom uitgebreid met (minstens) twee weerstanden.

Versterker met een opamp met tegenkoppeling

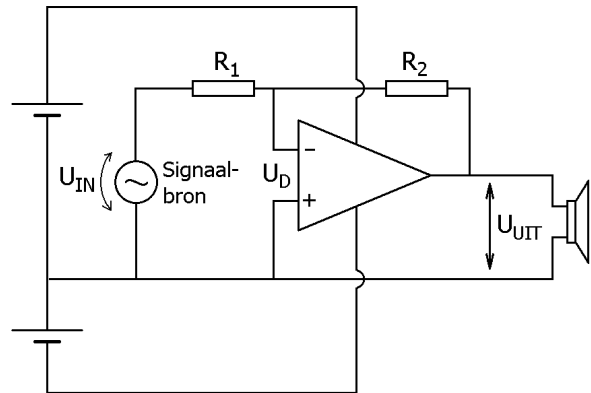
Bij het versterken van signalen met een opamp past men vrijwel altijd 'tegenkoppeling' toe. Dit is het terugvoeren van een deel van het uitgangssignaal naar de ingang van de opamp waarbij de verschilspanning U_D sterk verkleind wordt. De versterking van hetingangssignaal wordt dan veel kleiner, maar dat is zelden een probleem.

Tegenkoppeling wordt meestal gedaan met behulp van twee weerstanden R_1 en R_2 . De signaalversterking wordt dan bepaald door deze twee weerstanden en niet meer door de opamp zelf. Daarnaast heeft tegenkoppeling andere voordelen, die hier echter buiten beschouwing blijven. De manier van tegenkoppeling is bij een niet-inverterende versterker anders dan bij de inverterende versterker. De volgende twee schakelingen laten zien hoe de weerstanden geschakeld worden.

Niet-inverterende versterker



Inverterende versterker



Bij de niet-inverterende versterker werkt de tegenkoppeling als volgt. Als de potentiaal van de plusingang van de opamp stijgt, stijgt ook de uitgangspotentiaal. Een deel van deze uitgangspotentiaal wordt via de weerstanden R_1 en R_2 teruggevoerd naar de miningang van de opamp. Je kunt de combinatie van R_1 en R_2 hierbij als spanningsdeler opvatten. Daardoor wordt de verschilspanning U_D kleiner gemaakt. Bij de inverterende versterker werkt de tegenkoppeling als volgt. Als de potentiaal van de miningang van de opamp stijgt, daalt de uitgangspotentiaal. Er gaat dan door weerstand R_2 een stroom lopen die de potentiaal van de miningang omlaag trekt. Via weerstand R_2 wordt de potentiaal van de miningang dus geremd in zijn stijging.

Spanningsversterking van een tegengekoppelde opamp

Onder de spanningsversterking A verstaan we het aantal keer dat het uitgangssignaal U_{UIT} groter is dan het ingangssignaal U_{IN} . In formulevorm wordt dit:

$$A = \frac{U_{UIT}}{U_{IN}}$$

Dankzij tegenkoppeling wordt de verschilspanning U_D zo sterk verkleind, dat deze bijna nul wordt. Hierdoor kan de spanningsversterking eenvoudig uitgerekend worden.

Bij de niet-inverterende schakeling geldt namelijk:

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

en bij de inverterende schakeling geldt:

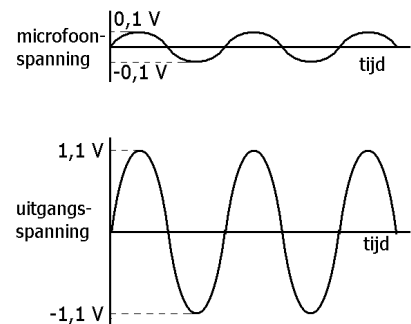
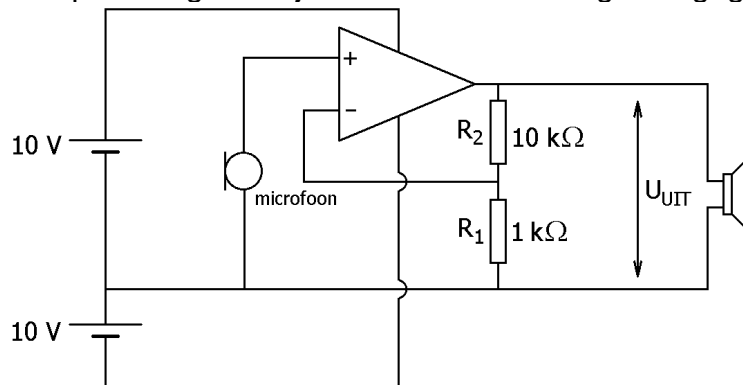
$$A = -\frac{R_2}{R_1}$$

Het minteken in de laatste formule houdt verband met het inverteren (omkeren) van het signaal.

Je kunt nagaan dat de spanningsversterking inderdaad door de bovenstaande twee formules beschreven wordt. Je moet dan aannemen dat de verschilspanning U_D nul is en dat er geen stroom loopt bij de plus- en miningang.

Voorbeeld van een niet-inverterende versterker

Met de schakeling in de volgende figuur wordt het signaal van een microfoon versterkt en aan een (hoogohmige) luidspreker aangeboden. Het microfoonsignaal en het luidsprekersignaal zijn naast de schakeling weergegeven.



Voor de spanningsversterking geldt:

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{1\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega} = 11$$

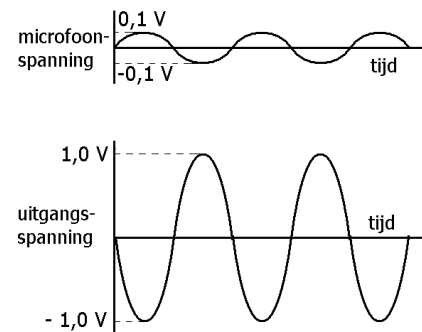
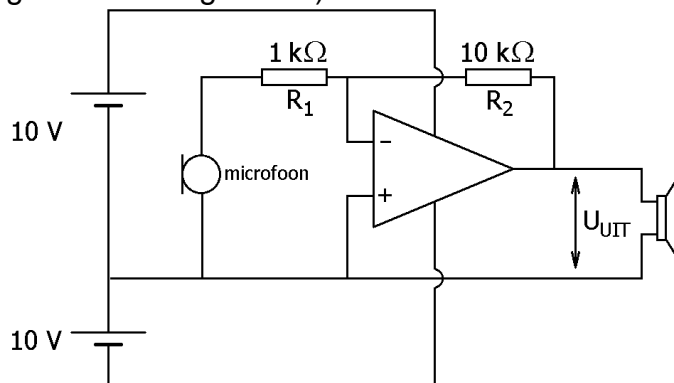
Stel dat de microfoon een wisselspanning met een piekwaarde van 0,1 V levert.

De piekspanning over de luidspreker is dan $11 \times 0,1\text{ V} = 1,1\text{ V}$.

Aangezien deze waarde veel kleiner is dan de voedingsspanning (plus en min 10 V), is er absoluut geen risico dat de pieken van de uitgangspotential worden afgetopt.

Voorbeeld van een inverterende versterker

In de onderstaande schakeling wordt het signaal van een microfoon versterkt en aan een hoogohmige luidspreker aangeboden. Rechts van de schakeling zijn het microfoonsignaal en luidsprekersignaal weergegeven. Duidelijk is te zien dat de microfoonsignaal in tegenfase is met het luidsprekersignaal (bij een golfberg hoort een golfdal en omgekeerd).



Voor de spanningsversterking geldt:

$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega} = -10.$$

Stel dat de microfoon een wisselspanning met een piekwaarde van 0,1 V levert.

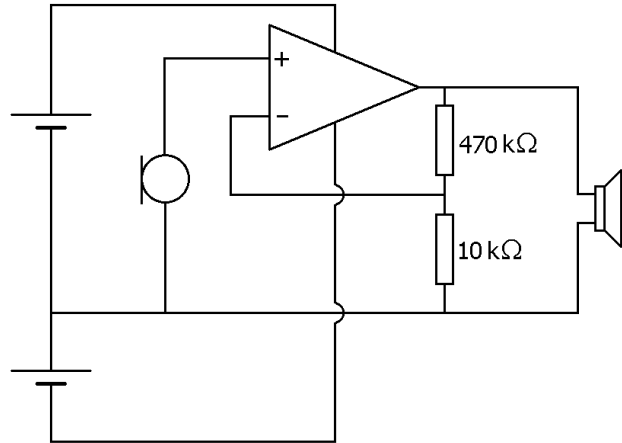
De piekspanning over de luidspreker is dan $10 \times 0,1\text{ V} = 1,0\text{ V}$.

Opgaven bij § 9

Opgave 1

De microfoon in de schakeling hiernaast levert een wisselspanning met een piekwaarde van 0,15 V. Deze wisselspanning wordt versterkt door een opamp-schakeling.

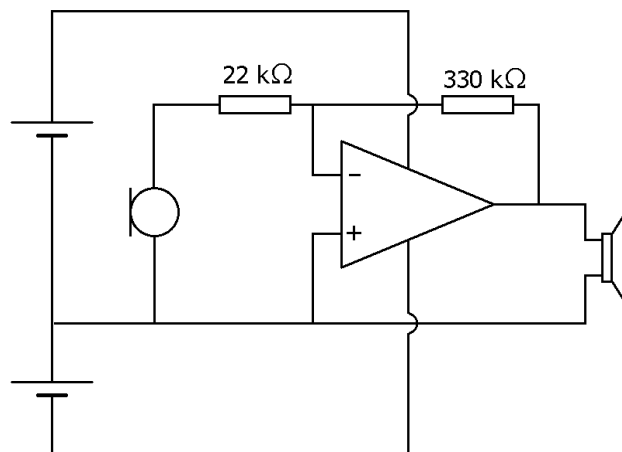
- a. Is er sprake van een niet-inverterende of een inverterende versterker?
- b. Bereken de spanningsversterking van de opamp-schakeling.
- c. Bereken de piekwaarde van de wisselspanning over de luidspreker.
- d. Leg uit waarom het niet nodig is om een koppelcondensator in serie met de luidspreker te plaatsen.



Opgave 2

In de schakeling hiernaast wordt het signaal van een microfoon versterkt.

- a. Is er sprake van een niet-inverterende of een inverterende versterker?
- b. Bereken de spanningsversterking van de opamp-schakeling.

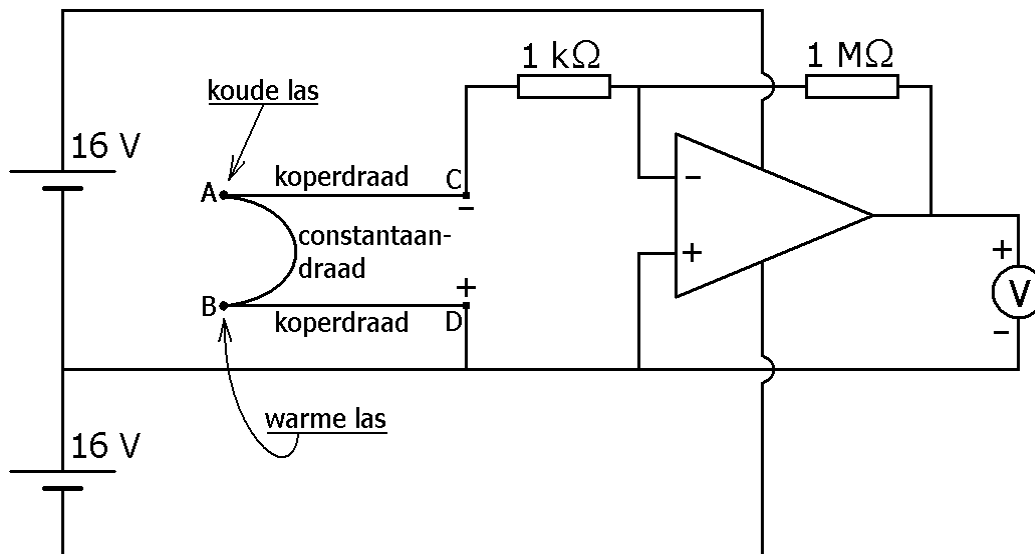


Opgave 3

In de onderstaande figuur is het ene uiteinde van constantaandraad AB aan koperdraad AC gesoldeerd en het andere uiteinde aan koperdraad BD. Verbinding A wordt op een lage temperatuur gebracht (dit wordt de koude las genoemd) en verbinding B op een hoge temperatuur (warme las). De punten C en D hebben dezelfde temperatuur. Het temperatuurverschil ΔT tussen A en B veroorzaakt spanning U_{THERMO} tussen de punten C en D. Dit wordt het Seebeck-effect genoemd. Voor deze spanning geldt:

$$U_{\text{THERMO}} (\mu\text{V}) = (41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot \Delta T (^\circ\text{C}).$$

De constantaandraad en de twee koperdraden kunnen worden opgevat als een gelijkspanningsbron met C en D als polen (aansluitklemmen). De geleverde spanning U_{THERMO} wordt door de tegengekoppelde opamp versterkt en afgelezen op een voltmeter.

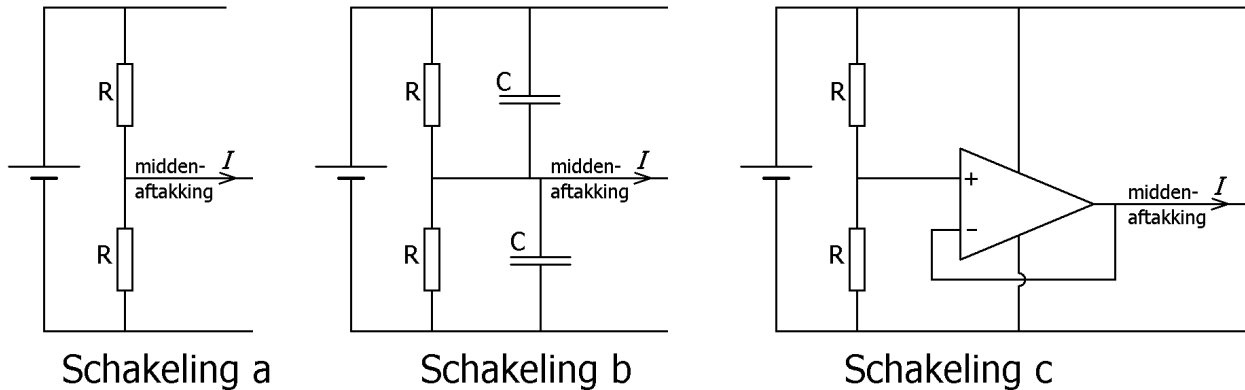


a. Bereken de spanning tussen C en D als punt A in smeltend ijs en punt B in water van 50°C wordt gehouden. Neem hierbij aan dat de weerstand van $1 \text{ k}\Omega$ geen belasting vormt voor de koper- en constantaandraden.

b. Bereken de spanning die de voltmeter aanwijst.

Opgave 4

Als je met een opamp een signaal wilt versterken en je alleen de beschikking hebt over een simpele spanningsbron (single power supply), kun je in eerste instantie aan de onderstaande schakeling a denken om een symmetrische voeding te maken. Om de spanning van de bron in twee gelijke delen te verdelen, moeten beide weerstanden R gelijk gekozen worden. Schakeling b en schakeling c zijn verbeterde versies van schakeling a.



In schakeling a is de spanning over de bovenste weerstand ongelijk aan de spanning over de onderste weerstand als er een stroom I door de middenaftakking loopt.

a.

Leg dat kort uit.

De stroom I door de middenaftakking is vaak een wisselstroom waardoor de spanning over de weerstanden R afwisselend groter en kleiner wordt. Als de spanning over de ene R toeneemt, neemt de spanning over de andere R af en andersom. In een poging om deze spanningsveranderingen te onderdrukken, zijn in schakeling b twee condensatoren parallel aan de weerstanden gezet.

b.

Leg uit dat de condensatoren een onderdrukkende werking op de spanningsveranderingen hebben.

Als stroom I door de middenaftakking een gelijkstroom is of een wisselstroom met lage frequentie, hebben de condensatoren in schakeling b weinig effect en kan de opamp in schakeling c uitkomst bieden.

c.

Leg uit dat de spanningsdeler in schakeling c niet belast wordt.

d.

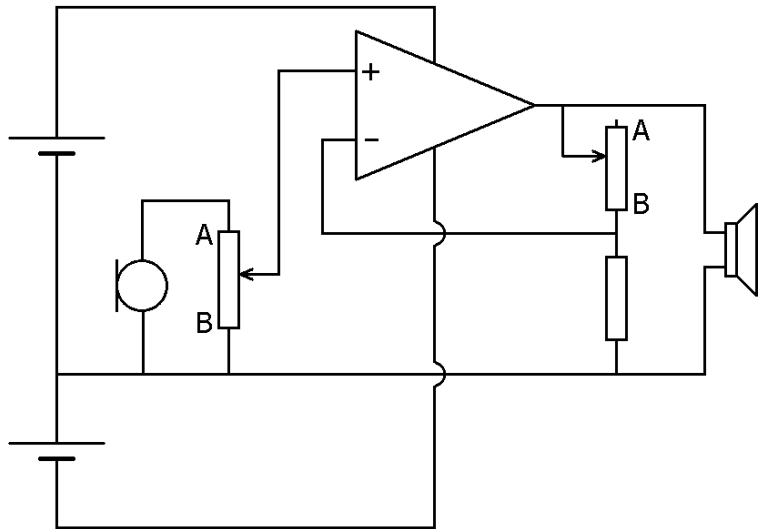
Leg uit dat de spanning tussen de uitgang en de plusingang van de opamp praktisch nul is.

Opgave 5

In de schakeling hiernaast wordt het signaal van een microfoon versterkt en aangeboden aan een luidspreker. In de schakeling bevinden zich twee potmeters. Stel dat je het signaal van de microfoon zoveel mogelijk wilt versterken. In welke richting (naar A of B) moet je de looper van de potmeters dan verschuiven?

Van de linker potmeter: _____

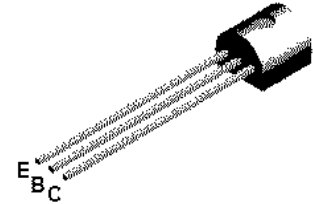
Van de rechter potmeter: _____



§ 10 Zeer eenvoudige transistorschakelingen

Transistor in het kort

In de figuur hiernaast is een transistor afgebeeld. Een transistor heeft drie aansluitingen, namelijk de basis, de emitter en de collector. Het nut van een transistor is dat je met een kleine stroom een grote stroom kunt regelen. De kleine stroom loopt door de basis, de grote stroom door de emitter en de collector. Elke transistor heeft (bij benadering) een vaste verhouding tussen de kleine stroom en de grote stroom. Deze ligt meestal ergens tussen 1 : 100 en 1 : 300 en hangt van het type transistor af en varieert zelfs van exemplaar tot exemplaar. Een kleine verandering van de basisstroom leidt dus tot een grote verandering van de collector- en emitterstroom. Je zou een transistor daarom ook wel een 'stroomversterker' kunnen noemen.

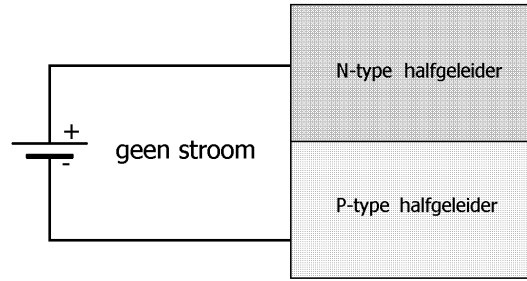
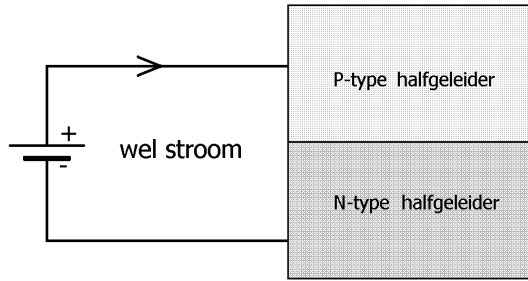


Opbouw van een diode

De opbouw van een transistor hangt zeer nauw samen met die van een diode. Daarom richten we onze aandacht nu eerst op de diode. Dioden worden gemaakt van de stoffen silicium of germanium. Silicium en germanium zijn zogenoemde 'halfgeleiders'. Een halfgeleider zit qua elektrische weerstand tussen een isolator en een geleider in. Tegenwoordig gebruikt men hoofdzakelijk silicium en in het vervolg van dit verhaal gaan we hier dan ook vanuit. Het gedrag van germanium is echter in grote lijnen gelijk aan dat van silicium.

Zuiver silicium geleidt de stroom slecht (het lijkt dus op een isolator). In het silicium, dat in een diode wordt toegepast, zijn echter zeer kleine, nauwkeurig gedoseerde hoeveelheden van bepaalde stoffen aangebracht. Door deze geringe verontreinigingen gaat het silicium de stroom veel beter geleiden. Afhankelijk van de toegevoegde stof ontstaat er p-type halfgeleider of n-type halfgeleider. De precieze werking van de verontreinigingen valt buiten de lesstof, evenals de betekenis van de letters p en n.

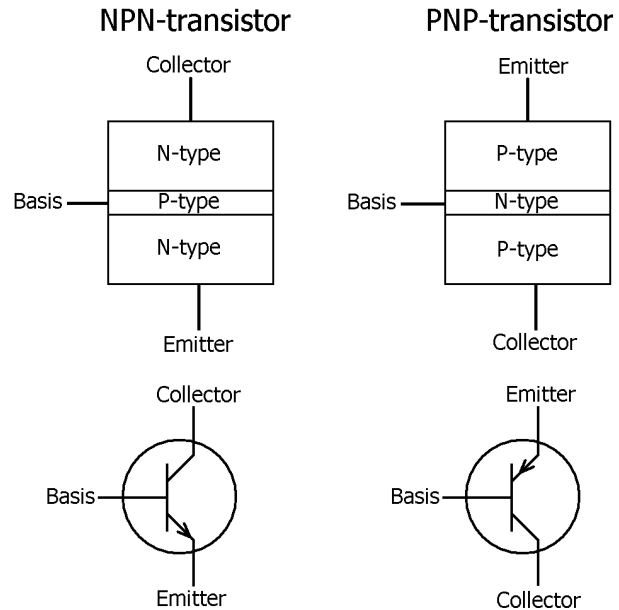
Het wordt interessant als we een stukje p-type halfgeleider in verbinding brengen met een stukje n-type halfgeleider. We spreken dan van een pn-overgang. Het blijkt namelijk dat de elektrische stroom wel van p-type naar n-type halfgeleider kan stromen maar niet andersom. Een diode is eigenlijk niks anders dan een siliciumkristal dat zodanig verontreinigd is, dat er een pn-overgang is gevormd wordt. Zie de onderstaande figuren (links een diode in doorlaatrichting, rechts in sperrichting).



Opbouw van een transistor

Een transistor is een stukje siliciumkristal waarin twee pn-overgangen zijn aangebracht. Zie de figuren hiernaast. We onderscheiden npn-transistors en pnp-transistors. Een npn-transistor heeft twee n-gebieden (dus van n-type halfgeleider), die gescheiden zijn door een p-gebied (dus van p-type halfgeleider). Een pnp-transistor heeft twee p-gebieden, die gescheiden zijn door een n-gebied.

Omdat een transistor drie gebieden heeft, heeft een transistor ook drie aansluitpunten, namelijk de emitter, de basis en de collector. Zoals in de figuren te zien is, is het middengebied (de basis) heel smal gemaakt.



De onderste figuren zijn de schakelschema's van de npn- en pnp-transistor. De emitter kan in beide gevallen herkend worden aan het kleine pijltje. Aan de richting van het pijltje kun je zien of je met een npn of een pnp transistor te maken hebt. Beide symbolen zijn zodanig getekend dat de stroom in beide gevallen van boven naar beneden loopt.

Een transistor aansluiten

Om een transistor goed als stroomversterker te laten werken, moeten de spanningen tussen de basis, emitter en collector aan de volgende twee eisen voldoen.

Eis 1

De pn-overgang tussen de basis en de emitter moet in doorlaatrichting staan. De spanning tussen basis en emitter ligt in een klein gebiedje, namelijk ergens tussen 0,5 V en 0,8 V. Dit gebied is gelijk aan dat bij een diode in doorlaatrichting. Bij berekeningen wordt meestal uitgegaan van een spanning van 0,6 V.

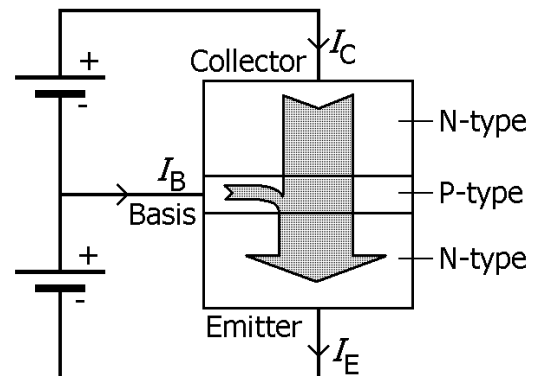
Eis 2

De pn-overgang tussen de collector en de basis moet in sperrichting staan.

De spanning tussen collector en basis heeft verder weinig invloed op de werking van de transistor en kan zelfs meer dan 15 volt bedragen. Die spanning mag echter niet te hoog worden (zeg meer dan 50 volt of zo) want dan kan de collector-basis overgang doorslaan.

In de rest van dit verhaal kijken we alleen naar de npn-transistor. Voor de pnp-transistor geldt in principe hetzelfde, alleen moeten alle stromen en spanningen dan van richting omkeren.

In de figuur hiernaast is een npn-transistor op de juiste manier geschakeld om als stroomversterker te kunnen werken. De basis (p-gebied) is positief ten opzichte van de emitter (n-gebied), zodat de bijbehorende pn-overgang in doorlaatrichting komt. De collector (n-gebied) is positief ten opzichte van de basis (p-gebied), zodat de bijbehorende pn-overgang in sperrichting staat.



In de figuur is met pijlen aangegeven hoe de stroom door een npn-transistor loopt. Uitwendig gezien zijn er drie stromen, namelijk:

- 1) de emitterstroom I_E .
- 2) de basisstroom I_B .
- 3) de collectorstroom I_C .

De emitterstroom komt als enige de transistor uit. Voor deze stroom geldt:

$$I_E = I_C + I_B$$

Je zou verwachten dat de collectorstroom nul is (vanwege de gesperde pn-overgang) en dat de basisstroom even groot is als de emitterstroom. Echter, doordat de basis een zeer dun laagje is, zijn beide pn-overgangen niet onafhankelijk van elkaar. Dit resulteert uiteindelijk in een heel kleine basisstroom en een veel grotere collector- en emitterstroom. De uitleg waarom dit zo is, gaat helaas te ver voor deze cursus.

Samengevat geldt dus dat I_B veel kleiner is dan I_C en dan I_E . Deze laatste twee zijn praktisch even groot.

Stroomversterking van de transistor

Als aan de eerder genoemde twee eisen is voldaan, fungeert de transistor als stroomversterker. De collectorstroom en de emitterstroom zijn dan niet alleen veel groter dan de basisstroom, ze zijn ook (bij benadering) evenredig met de basisstroom. Dat wil zeggen dat als de basisstroom verdubbelt, de collectorstroom en de emitterstroom (bij benadering) ook verdubbelen. In dit verband gebruiken we het begrip 'stroomversterking'. Deze wordt met het symbool h_{FE} aangegeven.

Onder de stroomversterking van de transistor verstaan we het aantal keer dat de collectorstroom groter is dan de basisstroom.

De stroomversterking ligt meestal tussen 100 en 300. Bij veel transistorschakelingen wordt hiervan gebruik gemaakt. Met een kleine stroom (de basisstroom) kun je dan een grote stroom (de collectorstroom en emitterstroom) regelen.

Veel voorkomende transistorschakeling

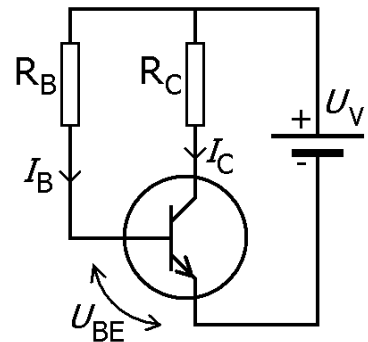
De figuur hiernaast toont een veel gebruikte transistorschakeling. Zowel de basis als de collector zijn via een weerstand met de pluspool van de voeding verbonden. De weerstand in de basisleiding is met R_B aangeduid en de weerstand in de collectorleiding met R_C .

De spanning over R_B is gelijk aan de voedingsspanning U_V minus de spanning U_{BE} tussen de basis en de emitter. Voor de basisstroom I_B geldt daarom:

$$I_B = \frac{U_V - U_{BE}}{R_B}$$

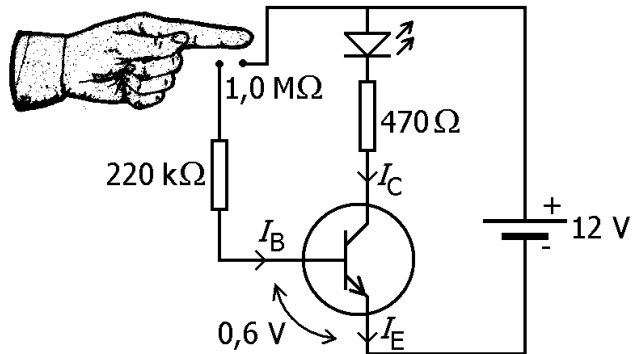
Zoals hiervoor reeds is gezegd, is de basis-emitter overgang een diode in doorlaatrichting en bedraagt U_{BE} ongeveer 0,6 V. Omdat U_V doorgaans veel groter is dan U_{BE} , wordt deze laatste vaak verwaarloosd te opzichte van U_V en kun je bij benadering zeggen dat U_V over R_B staat. Weerstand R_B is altijd een grote weerstand zodat stroom I_B klein blijft. Dit is ook het geval in het onderstaande voorbeeld.

De collectorstroom I_C wordt door I_B en door de stroomversterking van de transistor bepaald. Dit geldt echter alleen zolang de spanning over R_C niet te groot wordt, want dan wordt niet meer aan de bovenstaande eis 2 voldaan.



Voorbeeld

In de schakeling hiernaast is een transistor opgenomen. Als je met je (natte) vinger op de twee contactpunten drukt, loopt er een kleine stroom door je vinger. Deze stroom wordt door de transistor versterkt. De versterkte stroom loopt door een led, die dan licht gaat uitzenden.



Als je op de contactpunten drukt, bedraagt de weerstand tussen deze punten bijvoorbeeld $1,0 \text{ M}\Omega$. De weerstand van $220 \text{ k}\Omega$ in de basisleiding beschermt de transistor tegen het gevaar van kortsluiting tussen de contactpunten. Tijdens het drukken op de contactpunten geldt dan voor de basisstroom:

$$I_B = \frac{U}{R} = \frac{12 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{1,0 \text{ M}\Omega + 0,22 \text{ M}\Omega} = 9,3 \mu\text{A}$$

Stel dat de stroomversterking van de transistor 200 is. Voor de collectorstroom (en dus ook voor de stroom door de led) geldt dan:

$$I_C = 200 \times 9,3 \mu\text{A} = 1,9 \text{ mA.}$$

De weerstand van 470Ω in de collectorleiding dient ervoor om de led tegen al te grote stroomsterktes te beschermen. In het huidige getallenvoorbeeld speelt hij echter geen rol.

Opgaven bij § 10

Opgave 1

Vul in: doorlaatrichting of sperrichting

Bij een transistor moet de pn-overgang tussen de basis en de emitter in _____ staan.

Bij een transistor moet de pn-overgang tussen de collector en de basis in _____ staan.

Opgave 2

Vul op de volgende open plekken 'basisstroom', 'collectorstroom' of 'emitterstroom' in.

De stroomversterking van een transistor is het aantal keer dat de _____

groter is dan de _____.

Opgave 3

Om een transistor als stroomversterker te laten werken, moet de spanning tussen de basis en de emitter tussen _____ volt en _____ volt liggen.

Opgave 4

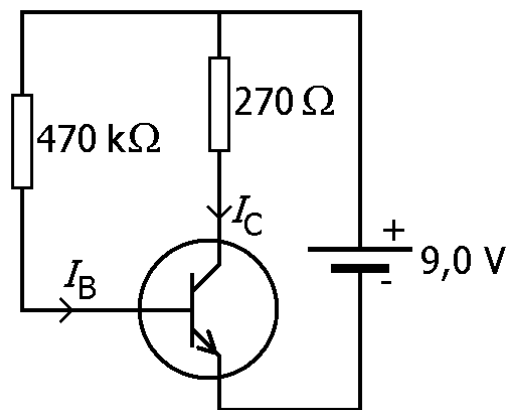
De transistor in de schakeling hiernaast heeft een stroomversterking van 400.

De spanning tussen de basis en de emitter is 0,6 V.

a.
Bereken de spanning over de weerstand van 470 k Ω .

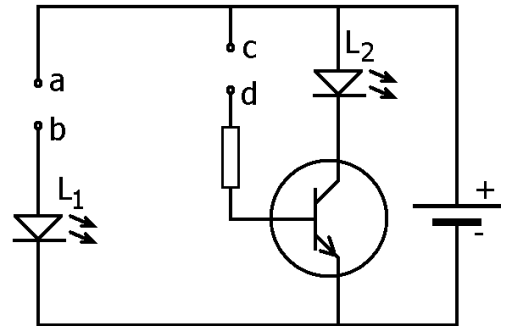
b.
Bereken de basisstroom.

c.
Bereken de spanning over de weerstand van 270 Ω .



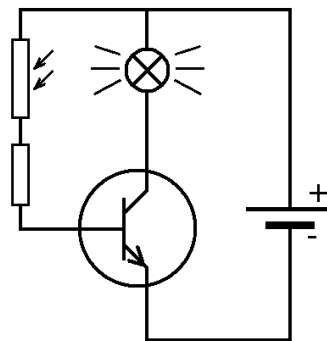
Opgave 5

In de figuur hiernaast kun je met je wijsvinger op de punten a en b drukken. Je vinger laat een heel klein beetje stroom door, zeker als hij wat vochtig is. Toch is deze stroom te klein om led L_1 te laten branden. Als je echter met je vinger de punten c en d met elkaar verbindt, gaat led L_2 wel licht geven. Leg dat uit.



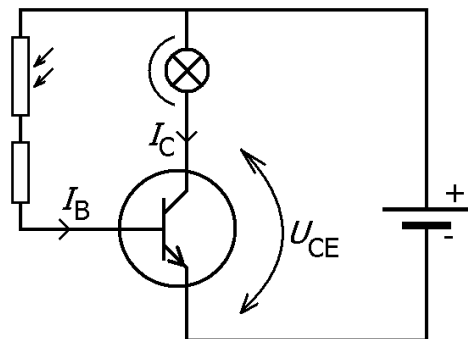
Opgave 6

De schakeling hiernaast bevindt zich in een verduisterde kamer. Het lampje in de schakeling brandt, en het uitgezonden licht beschijnt de LDR. Als je je vinger even op de LDR legt zodat er geen licht meer op kan vallen, gaat het lampje uit. Als je je vinger daarna weer weghaalt, blijft het lampje uit. Verklaar dit.



Opgave 7

In de schakeling hiernaast zijn een LDR, een transistor, een lampje en een spanningsbron opgenomen. Het lampje is zodanig afgeschermd, dat hij de LDR niet kan belichten. Met de volgende stappen beredeneren we hoe de spanning U_{CE} tussen de collector en de emitter verandert, als er meer licht op de LDR valt. Als er meer licht op de LDR valt, wordt zijn weerstand _____ (vul in: groter of kleiner).



Hierdoor neemt de _____ toe (vul in: basisstroom of collectorstroom).

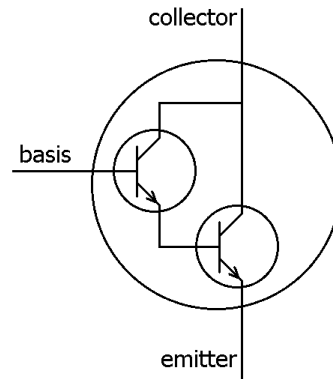
Hierdoor neemt de _____ toe (vul in: basisstroom of collectorstroom).

Hierdoor neemt de spanning over het lampje _____ (vul in: toe of af).

Hierdoor neemt de spanning tussen de collector en emitter _____ (vul in: toe of af).

Opgave 8

In de schakeling hiernaast worden twee transistors gecombineerd tot een 'supertransistor'. Als beide transistors in één behuizing zitten, wordt zo'n combinatie wel een darlingtontransistor of kortweg darlington genoemd. Kenmerkend voor een darlington is zijn grote stroomversterking.



Stel dat beide transistors in een darlington een stroomversterking van 150 hebben. Hoe groot is dan de stroomversterking van de darlington?

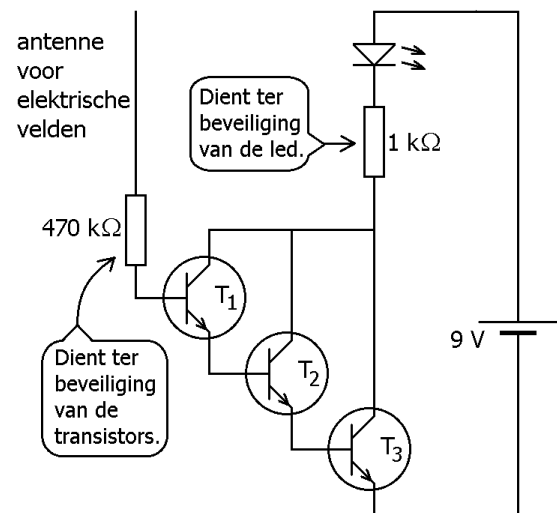
Opgave 9

Met de hiernaast afgebeelde schakeling kan worden nagegaan of een voorwerp positief of negatief geladen is. De antenne (met een lengte van bijvoorbeeld 30 cm) is met één uiteinde aan de basis van transistor T_1 verbonden (via een weerstand van $470\text{ k}\Omega$). Het andere uiteinde van de antenne is niet verbonden.

Als een positief geladen voorwerp de antenne nadert, gaat de led branden.

a.

Verklaar dit met behulp van de beweging van elektronen.



Als een negatief geladen voorwerp van de antenne weggaat, gaat de led ook branden.

b.

Verklaar dit met behulp van de beweging van elektronen.

Bijlage 1: Wet van Ohm

De definitie van de weerstand

De weerstand van een elektrisch apparaat geeft aan hoe moeilijk een elektrische stroom door dit apparaat heen kan gaan. In de figuur hiernaast is het apparaat als rechthoekig blokje getekend. Zijn weerstand R kan worden uitgerekend door de spanning U te delen door de stroomsterkte I . In formulevorm wordt dit:

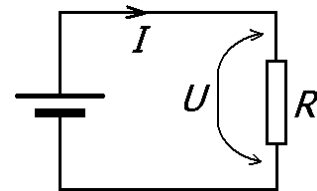
$$R = \frac{U}{I}$$

Deze formule kan in twee andere vormen geschreven worden namelijk:

$$U = I \times R \quad \text{en} \quad I = \frac{U}{R}$$

Als de spanning wordt uitgedrukt in volt en de stroomsterkte in ampère, dan wordt de elektrische weerstand uitgedrukt in ohm (symbool Ω). Als grotere eenheid komen we vaak tegen kilo-ohm (= 1000 ohm) en de mega-ohm (= 1.000.000 ohm).

Als de spanning over een elektrisch apparaat toeneemt, neemt in het algemeen de stroomsterkte door het apparaat ook toe. Als de verhouding van spanning en stroomsterkte hierbij gelijk blijft, heeft de weerstand van het apparaat een constante waarde. In dat geval zeggen we dat het apparaat aan de 'wet van ohm' voldoet.



Bijlage 2: Voorvoegsels van eenheden

Bij berekeningen in de elektronica worden eenheden vaak vergezeld van een voorvoegsel. Zo kan 0,003 A (met A = ampère) geschreven worden als 3 mA. De letter m is een afkorting van 'milli' en betekent een duizendste (= 0,001). Naast milli zijn er nog meer voorvoegsels. De belangrijkste voorvoegsels in de elektronica zijn in de tabel hiernaast weergegeven.

Voorvoegsels	Betekenis
G = giga	1.000.000.000
M = mega	1.000.000
k = kilo	1.000
m = milli	0,001
μ = micro	0,000 001
n = nano	0,000 000 001

In de elektronica wordt veel met voorvoegsels gewerkt. Door handig met voorvoegsels om te gaan, kun je veel tijd besparen. Zie de volgende voorbeelden.

Voorbeeld 1

Als er een klein lampje op een spanning van 4 V wordt aangesloten, loopt er een stroomsterkte van 4 mA door het lampje. De weerstand van het lampje wordt als volgt uitgerekend.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega$$

Bij deze berekening wordt de letter m (=milli=0,001) in de noemer automatisch de letter k (=kilo=1000) in de teller.

Voorbeeld 2

Als een stroom van 2 mA door een weerstand van 4 kΩ loopt, kan de spanning over de weerstand als volgt worden uitgerekend.

$$U = I \cdot R = 2 \text{ mA} \cdot 4 \text{ k}\Omega = 8 \text{ V}$$

Bij deze berekening kunnen de letters m en k meteen tegen elkaar worden weggestreept, omdat een duizendste keer duizend als uitkomst één heeft.

Dit voorbeeld laat zien dat het voordelig is om voorvoegsels buiten de berekening te houden. Zie ook de volgende voorbeelden.

Stel dat er een stroom van 50 μA door een weerstand van 2 MΩ loopt. De spanning over de weerstand kun je dan als volgt berekenen:

$$U = I \cdot R = 50 \text{ }\mu\text{A} \cdot 2 \text{ M}\Omega = 10 \text{ V}.$$

De letters μ en M vallen tegen elkaar weg, omdat een miljoenste keer een miljoen één is.

Stel dat er een spanning van 9 V over een weerstand van 3 kΩ staat. De stroomsterkte door de weerstand kun je dan op de volgende manier uitrekenen:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{9 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}.$$

De letter k in de noemer vertaalt zich meteen als de letter m in het antwoord, omdat $1 / 1000 = 0,001$.

Bijlage 3: Multimeter

In de figuur hiernaast is een deel van een multimeter afgebeeld. De naam multimeter (multi betekent veel) komt van het feit dat een dergelijke meter de functie van veel verschillende meetinstrumenten in één kastje bevat.

Met de grote draaiknop in het midden stel je in welke grootte gemeten wordt en welk bereik (= maximaal te meten waarde) daarbij gehanteerd wordt.

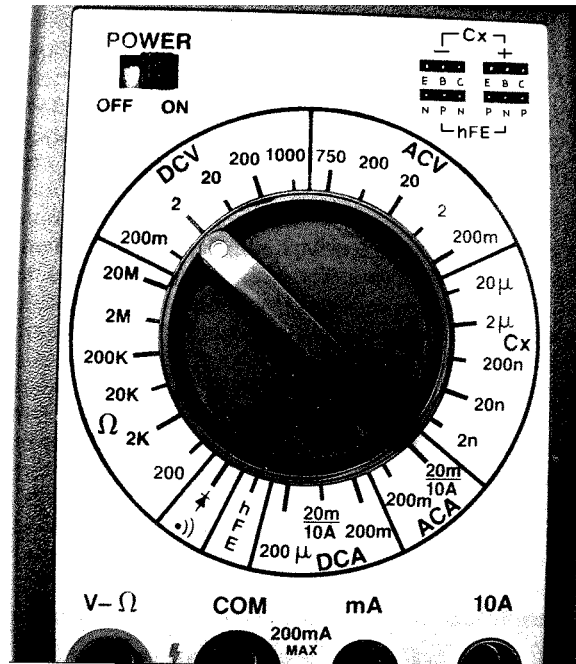
In de elektrotechniek komen de afkortingen DC en AC veelvuldig voor. DC betekent 'Direct Current' (= gelijkstroom) en AC betekent 'Alternating Current' (wisselstroom). Om daarbij nog onderscheid te maken tussen stroom en spanning, worden de volgende afkortingen op de multimeter gebruikt.

DCV = gelijkspanning

DCA = gelijkstroom

ACV = wisselspanning

ACA = wisselstroom



De getoonde multimeter bevat onder de draaiknop vier stekkerbussen, waar de meetsnoeren op kunnen worden aangesloten. Bij een meting worden steeds maar twee van de vier stekkerbussen gebruikt. De stekkerbus met COM wordt altijd gebruikt. COM betekent namelijk 'common'. Voor de tweede stekkerbus geldt het volgende.

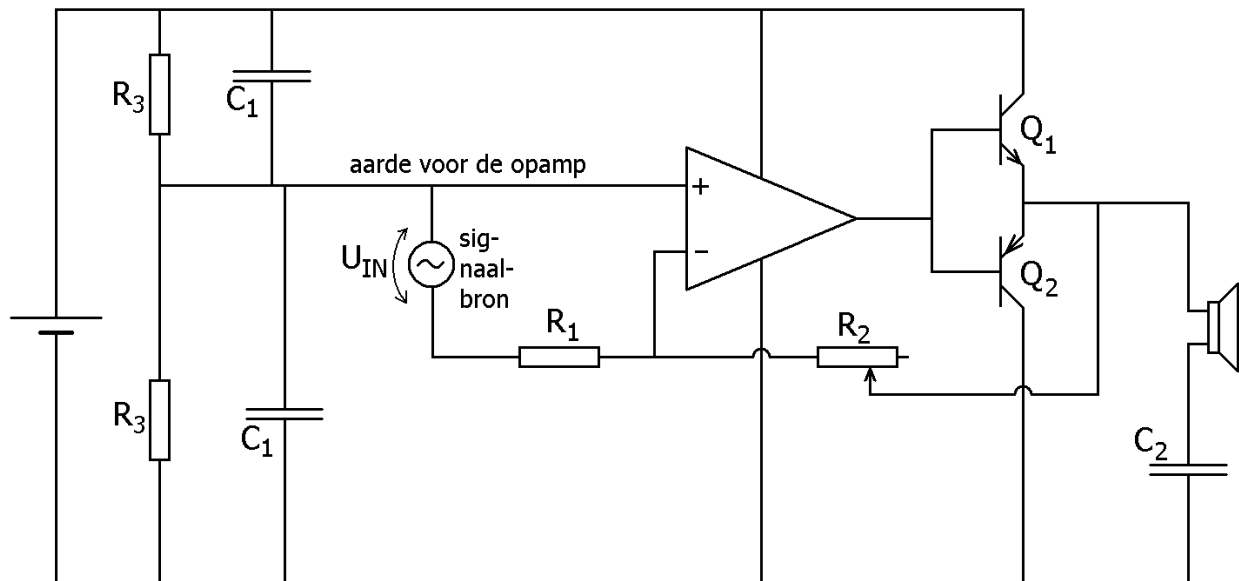
Voor het meten van spanningen of weerstanden wordt de bus met 'V-Ω' gebruikt.

Voor het meten van kleinere stroomsterktes (tot 200 mA) wordt de bus met 'mA' gebruikt.

Voor het meten van grote stroomsterktes (tot 10 A) wordt de bus met '10 A' gebruikt.

Bijlage 4: Schakeling van een simpele audioversterker met een opamp

De onderstaande figuur toont een eenvoudige schakeling waarmee een geluidssignaal versterkt kan worden en met een laagohmige luidspreker ($8\ \Omega$) hoorbaar gemaakt kan worden. De twee transistors Q_1 en Q_2 voorkomen dat de opamp te zwaar wordt belast door de luidspreker.



Voor de componenten gelden de volgende waarden (als suggestie).

$$R_1 = 1\ \text{k}\Omega$$

$$R_2 = \text{potmeter van } 10\ \text{k}\Omega$$

$$R_3 = 1\ \text{k}\Omega$$

$$C_1 = 1\ \mu\text{F}$$

$$C_2 = 100\ \mu\text{F}$$

Q_1 en Q_2 : complementaire npn en pnp transistors zoals de BC547 en de BC557.

Om hoogfrequente signalen aan de ingang weg te filteren, kan een (niet getekende) condensator van bijvoorbeeld $10\ \text{nF}$ tussen de twee ingangen van de opamp geplaatst worden.