Electronics

Aanvullende cursus aangaande oplossingsmethoden en voorbeelden aangaande gelijkstroom

---

Opleiding: Bachelor Elektronica-ICT

Academiejaar: 2019-2020

Ing. Patrick Van Houtven

patrick.vanhoutven@ap.be

Inhoud

1 Serie/Parallel-schakelen van weerstanden

1.1 Toepassen van de wet van Ohm

In deze paragraaf worden voorbeelden weergegeven van de toepassing van de wet van Ohm. De voorbeelden gaan over het berekenen van de spanning, stroom en weerstand in elektrische schakelingen. Je zal ook zien hoe je hoeveelheden, uitgedrukt met metrische voorvoegsels, kan toepassen in de berekeningen.

Wat onthoud je best?

- Je berekent de stroom als je de spanning en de weerstand kent.
- Je berekent de spanning als je de stroom en weerstand kent.
- Je berekent de weerstand als je de spanning en stroom kent.
- Je maakt tijdens berekeningen gebruik van hoeveelheden met metrische voorvoegsels.

1.1.1 Stroomberekeningen

In volgende voorbeelden leer je de stroomwaarden te bepalen vanuit de waarden van spanning en weerstand. Om de stroom te vinden is gebruik gemaakt van de formule van de wet van Ohm, namelijk:

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

Om de stroom in ampère te krijgen, moet u de waarde van de spanning in volt en de waarde van de weerstand in ohm geschreven zijn.

Voorbeeld 1-1

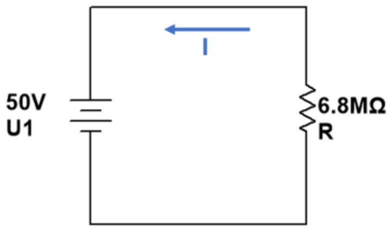
Bereken de hoeveelheid stroom door de weerstand van figuur 1-vb1 in microampéres.

Oplossing

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50\ V}{6{,}8\ M\Omega} = \frac{50\ V}{6{,}8\ \times 10^{6}\Omega} = 7{,}35\ \times 10^{-6}\ A$$

Met gebruik van een prefix voor het resultaat van de stroom:

$$I = 7{,}35\ \mu A$$



Figuur 1-vb1

Voorbeeld 1-2

Een LED is een lichtgevende diode. Als deze op een spanningsbron van 5 V wordt aangesloten moet de stroom beperkt worden die door de LED gaat. Om de stroom door deze LED te beperken wordt een weerstand van *220* Ω gebruikt. Er wordt aangenomen dat over de LED een spanningsval van $2\ V$ komt te staan deze weerstand een spanningsval van *3 V* komt te staan. Hoeveel bedraagt dan de stroom door deze weerstand?

Oplossing

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3\ V}{220\ \Omega} = 13{,}64\ mA$$

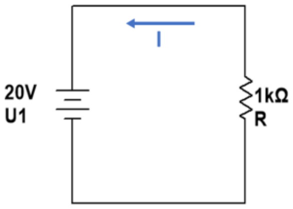
Voorbeeld 1-3

Bereken de stroom in milliampères voor de schakeling in de figuur 1-vb2 en maak gebruik van prefixes.

Oplossing

$1\ k\Omega$ kan geschreven worden als $1 \times 10^3\ \Omega$.
Als we dit invullen voor de stroom:

$$I = \frac{20\ V}{1\ k\Omega} = \frac{20\ V}{1 \times 10^3 \Omega} = 20\ mA$$



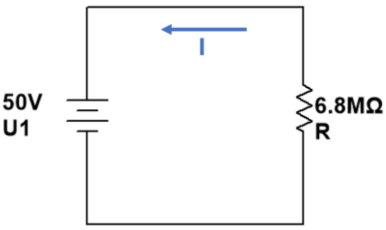
Figuur 1-vb2

Voorbeeld 1-4

Bereken de hoeveelheid stroom door de weerstand van figuur 1-vb3 in microampéres.

Oplossing

$$I = \frac{50\ V}{6{,}8\ M\Omega} = \frac{50\ V}{6{,}8 \times 10^6 \Omega} = 7{,}35\ \times 10^{-6}\ A = 7{,}35\ \mu A$$



Figuur 1-vb3

Voorbeeld 1-5

Over een weerstand van *2,7 M*Ω staat een spanning van *200 mV*. Bepaal de stroom die er door gaat.

Oplossing

$$I = \frac{200m\ V}{2{,}7\ M\Omega} = \frac{200\ \times 10^{-3}\ V}{2{,}7 \times 10^6 \Omega} = 74{,}07\ \times 10^{-9}\ A = 74{,}07\ nA$$

1.1.2 Spanningsberekeningen

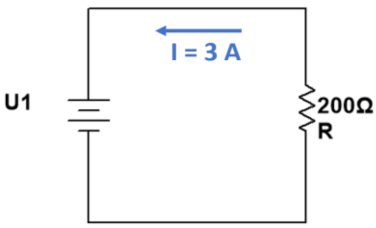
In volgende voorbeelden leer je de spanning bepalen als de weerstandswaarde en de stroomsterkte gekend zijn. Ook zijn er voorbeelden bij die gebruik maken van de prefixen.

Voorbeeld 1-6

Als door een weerstand van *200 Ω* een stroom van *3 A* vloeit, zie figuur 1-vb4, bepaal dan de spanning over deze weerstand.

Oplossing

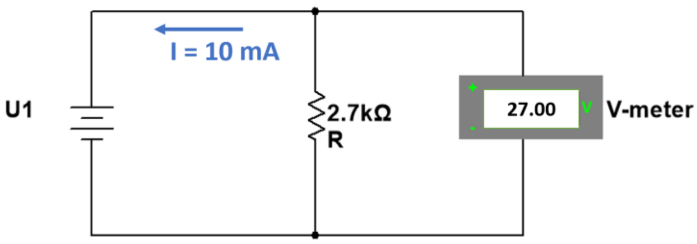
$U = I \times R = 3\,A \times 200\,\Omega = 600\,V$



Figuur 1-vb4

Voorbeeld 1-7

a) Bereken de spanningsval over de weerstand in figuur 1-vb5.
b) Hoeveel bedraagt de aangelegde bronspanning?



Figuur 1-vb5

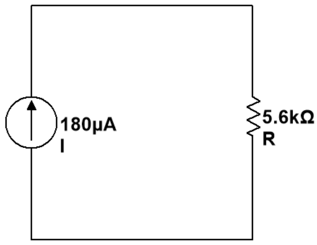
Oplossing

a) $U = I \times R = 10\,mA \times 2{,}7\,k\Omega = 10 \times 10^{-3}\,A \times 2{,}7 \times 10^{3}\,\Omega = 27\,V$

b) Volgens de spanningswet van Kirchhoff (zie verder in deze cursus) is de aangelegde spanning in een schakeling gelijk aan de som der deelspanningen. In deze schakeling hebben we enkel een weerstand die over de spanningsbron staat. Bijgevolg is de spanning die de bron levert gelijk aan de spanningsval over de weerstand en dus gelijk aan 27 V.

Voorbeeld 1-8

In figuur 1-vb6 is een zonnecel verbonden met een weerstand van *5,6 kΩ*. Wanneer de zonnecel zich in helder zonlicht bevindt, gedraagt deze zonnecel zich als een stroombron die een stroom van *180 µA* levert aan de aangesloten weerstand. Hoeveel bedraagt de spanning die over de weerstand komt te staan?



Figuur 1-vb6

Oplossing

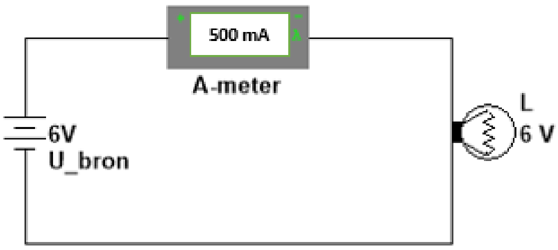
$$V_R = I \times R = 180\ \mu A \times 5{,}6\ k\Omega = 1{,}008\ V$$

1.1.3 Weerstandsberekeningen

Onderstaande voorbeelden geven je meer inzicht hoe je met de wet van Ohm de weerstandswaarde kan bepalen.

Voorbeeld 1-9

In figuur 1-vb7 wordt een lamp van *6 V* aangesloten op een bron met spanning 6 V. Als door de lamp een stroom vloeit van 500 mA, bepaal dan de weerstandswaarde van deze lamp.



Figuur 1-vb7

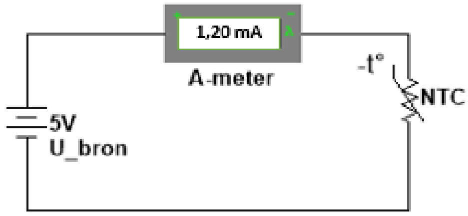
Oplossing

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6\ V}{500\ mA} = 12\ \Omega$$

Voorbeeld 1-10

In figuur 1-vb8 is een schakeling met een NTC-weerstand weergegeven. Een NTC is een weerstand waarvan de weerstandswaarde veranderlijk is met de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur wordt, hoe kleiner de weerstandswaarde. Van daar de naam : **N**egatieve **T**emperatuurs**C**oëfficiënt. NTC's worden vaak gebruikt voor temperatuurmetingen bij verwarmingsinstallaties. Bv. de "buitenvoeler" van een verwarmingssysteem bestaat uit een NTC.

Stel dat een NTC aan een spanningsbron van *5 V* wordt aangesloten. Dit heeft als gevolg dat bij een bepaalde temperatuur door de NTC een stroom vloeit gelijk aan *1,20 mA. B*epaal de weerstandswaarde die de NTC heeft in deze situatie.



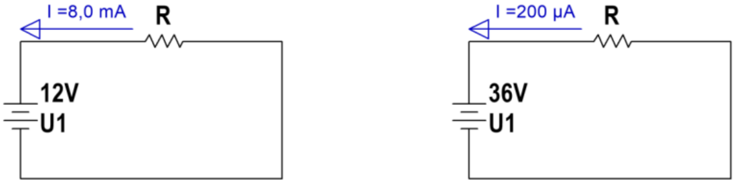
Figuur 1-vb8

Oplossing:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5\ V}{1{,}20\ mA} = 4167\ \Omega\ of\ 4{,}17\ k\Omega$$

1.1.4 Oefeningen op wet van Ohm

1. Bepaal de correcte weerstandswaarde in figuur 1-o1. Geef de waarde van de deze weerstand en geef deze eveneens weer in de kleurencode voor een metaalfilmweerstand (5-ringen). De tolerantie van de gebruikte weerstanden is telkens 2%.

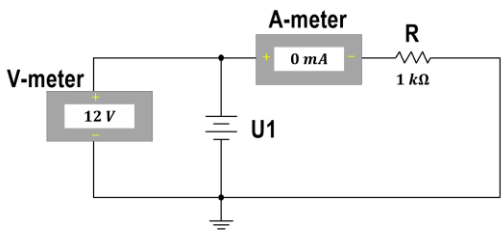


(a) (b)

Figuur 1-o1

2. Onderstaande situaties geven een stroom- en spanningsmeting weer op een eenvoudige schakeling. In de schakeling is telkens een bepaalde fout opgetreden. Geef via de meetwaarden van de voltmeter (V-meter) en de ampèremeter (A-meter) wat de fout is.

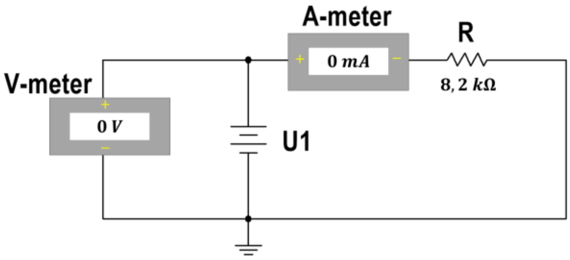
   A) De V-meter geeft $12\ V$ aan en de A-meter $0\ mA$ (figuur 1-o2) De fout is:



Figuur 1-o2

   (a) R is kortgesloten (beide uiteinden van R zijn op één of andere manier met elkaar verbonden)
   (b) R is open (één van de uiteinden van R is niet met de rest van de schakeling verbonden)
   (c) De spanningsbron is foutief aangesloten op de schakeling

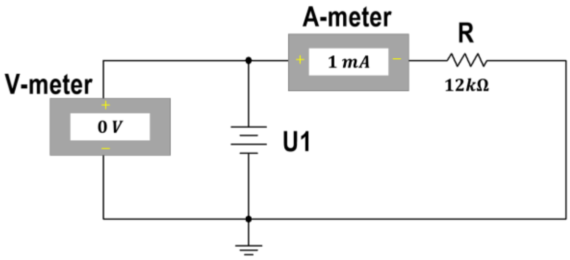
B) De V-meter geeft $0\ V$ aan en de A-meter $0\ mA$ (figuur 1-o3). De fout is:



Figuur 1-o3

(a) R is open
(b) R is kortgesloten
(c) De spanningsbron is uitgeschakeld of foutief aangesloten

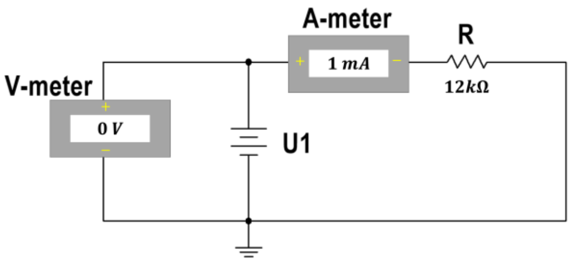
C) De V-meter geeft $0\ V$ aan en de A-meter $1\ mA$ (figuur 1-o4). De fout is:



Figuur 1-o4

(a) De V-meter is stuk
(b) De A-meter meet foutief
(c) De spanningsbron is uitgeschakeld of foutief aangesloten

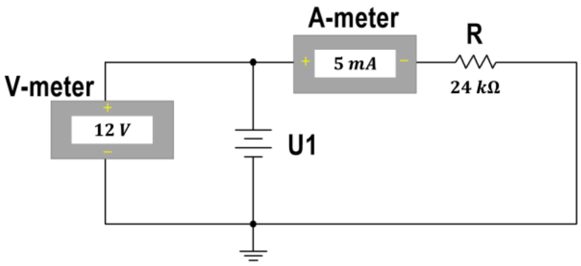
D) De V-meter geeft $0\ V$ aan en de A-meter $1\ mA$ (figuur 1-o5). De fout is:



Figuur 1-o5

(d) De V-meter is stuk
(e) De A-meter meet foutief
(f) De spanningsbron is uitgeschakeld of foutief aangesloten

E) De V-meter geeft $0\ V$ aan en de A-meter $1\ mA$ (figuur 1-o6). De fout is:



Figuur 1-o6

(g) De V-meter is stuk
(h) De R-waarde is hoger dan dat deze volgens het schema moet zijn
(i) De R-waarde is lager dan dat deze volgens het schema moet zijn

1.2 Serieschakeling

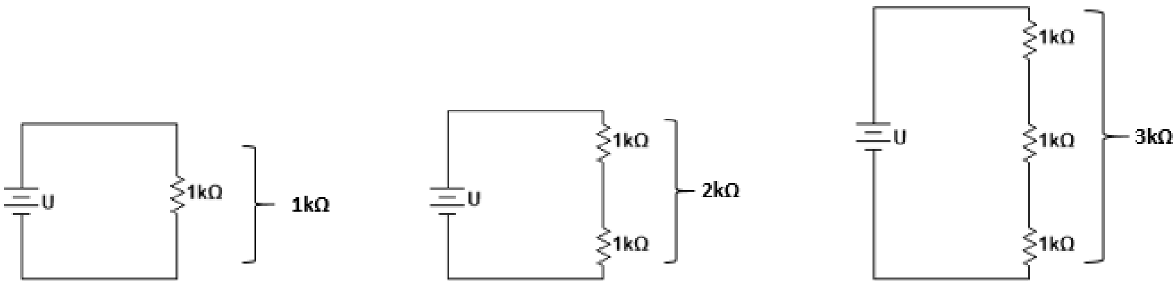
De totale weerstand van een serieschakeling is gelijk aan de som van elke weerstandswaarde die in serie staat.

Wat is belangrijk?

- ***Je bepaalt de totale serieweerstand.***
- ***Je legt uit waarom de serieweerstand verhoogt telkens je een weerstand in serie bijschakelt.***
- ***Je past de formule voor serieweerstand toe***.
- ***Je kan de stroom bepalen door een serieschakeling.***
- ***Je kan de spanning over elke weerstand in een serieschakeling bepalen.***
-

1.2.1 Toevoegen van een serieweerstand

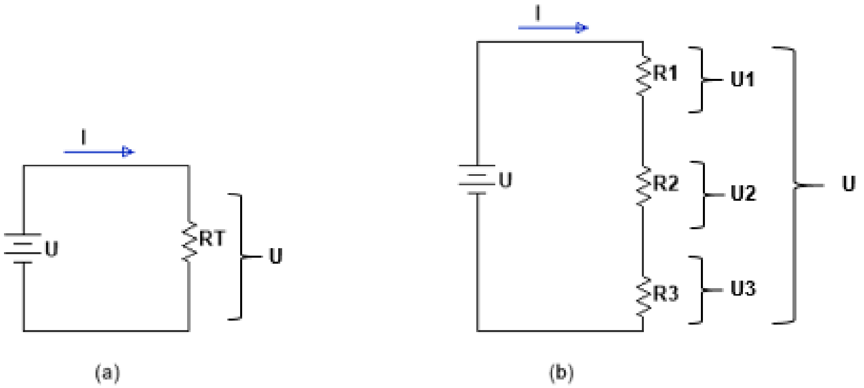
Als bij een aantal weerstanden die in serie staan een weerstand wordt toegevoegd, stijgt de totale weerstandswaarde. Waarom? Iedere weerstand biedt een bepaalde weerstand aan de stroom. Voeg je een weerstand toe dan vergroot het verzet tegen de stroom. Hoe meer verzet er ontstaat tegen de stroom, hoe hoger de totale weerstandswaarde wordt.



Figuur 1-1 : Hoe meer weerstanden in serie, hoe groter de totale weerstandswaarde

1.2.2 Bepalen van de totale serieweerstand R_T

Beschouw figuur 1-2(b). Hierin staan drie weerstanden in serie. We willen deze schakeling vervangen door de schakeling van figuur 1-2(a) maar de totale weerstandswaarde moet hetzelfde blijven.



Figuur 1-2 : De totale weerstandswaarde in een serieschakeling is gelijk aan de som van de weerstanden in serie

Als de totale weerstandswaarde R_T hetzelfde moet zijn als de totale weerstandswaarde van figuur 1-2(b), betekent dit dat de totale stroom I in beide schakelingen even groot moet zijn. De stromen die door de drie weerstanden R_1, R_2 en R_3 vloeien zijn gelijk aan elkaar en eveneens gelijk aan de totale stroom I. Bijgevolg vloeit er door iedere weerstand de stroom I. De spanningsval over R_T moet eveneens even groot zijn als de som van de spanningsvallen over R_1, R_2 en R_3. Enkel als aan die voorwaarden voldaan is, is de weerstandswaarde R_T even groot als de totale weerstandswaarde in figuur 1-2(b). In formulevorm :

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Vervangen we de spanning door het product weerstand maal stroom dan verkrijgen we :

$$I \times R_T = I \times R_1 + I \times R_2 + I \times R_3$$

$$I \times R_T = I\,(R_1 + R_2 + R_3)$$

Vermits de stroom in beide schakelingen gelijk is kunnen we deze wegdelen en bekomen we :

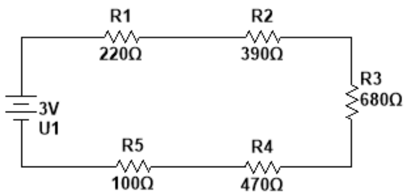
$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Als er *n* weerstanden in serie staan is de totale serieweerstand van die schakeling gelijk aan :

$$\boldsymbol{R_T = R_1 + R_2 + \ldots + R_n}$$

Voorbeeld 1-11

Bepaal de totale serieweerstand van de schakeling in figuur 1-vb9.



Figuur 1-vb9

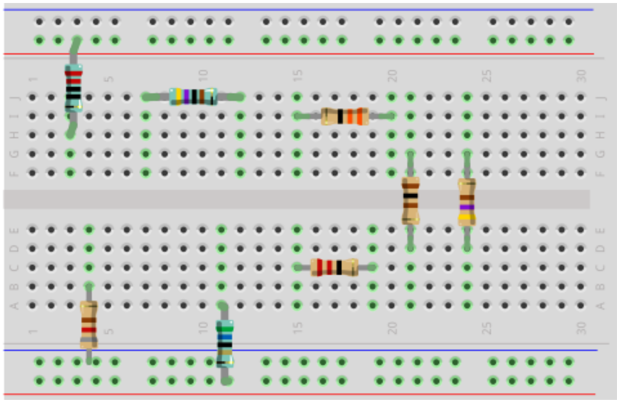
Oplossing:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

$$R_T = 220\,\Omega + 390\,\Omega + 680\,\Omega + 470\,\Omega + 100\,\Omega = 1860\,\Omega\ of\ 1{,}86\ k\Omega$$

Voorbeeld 1-12

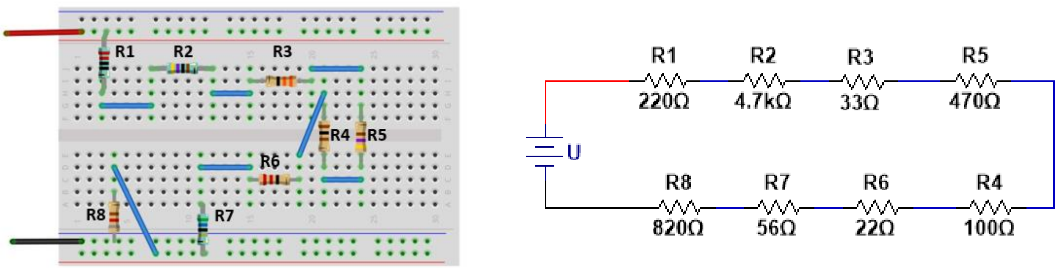
Verbind de weerstanden op het breadboard van figuur 1-vb10 in serie en bereken de totale weerstandswaarde R_T van de schakeling aan de hand van de kleurcodes van de weerstanden.



Figuur 1-vb10

Oplossing:

De weerstanden worden geschakeld zoals in figuur 1-vb11(a) is weergegeven en de totale weerstandswaarde wordt gevonden door alle weerstandswaarden op te tellen.



(a) (b)

Figuur 1-vb11

In figuur 1-vb11(b) is het elektrisch schema weergegeven van de schakeling op het breadboard van figuur 1-vb11(a). De totale weerstandswaarde R_T is dan gelijk aan :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8$$

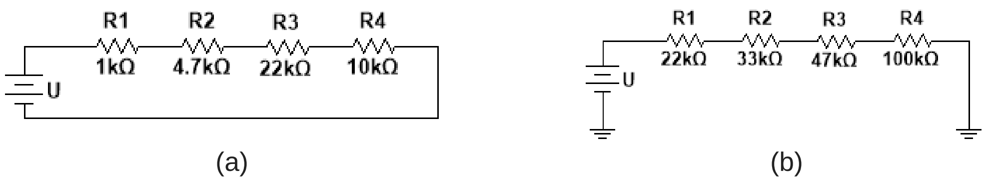
$$R_T = 220\,\Omega + 4{,}7\ k\Omega + 33\,\Omega + 100\,\Omega + 470\,\Omega + 22\,\Omega + 56\,\Omega + 820\,\Omega$$

$$R_T = 6421\,\Omega$$

Merk op dat de volgorde waarin de weerstanden van figuur 1-2(b) worden opgeteld niet van belang is. Men kan de weerstandsposities fysiek veranderen in het circuit zonder dat de totale weerstand of stroom wordt beïnvloed.

Voorbeeld 1-13

Bereken de totale serieweerstand R_T voor iedere schakeling van figuur 1-vb12



Figuur 1-vb12

Oplossing:

Voor de schakeling van figuur 4-10 (a) :

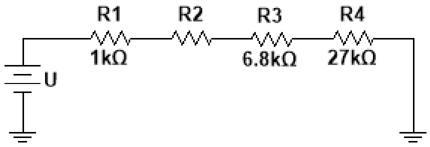
$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 1\ k\Omega + 4{,}7\ k\Omega + 22\ k\Omega + 10\ k\Omega = 37{,}7\ k\Omega$$

Voor de schakeling van figuur 4-10 (b) :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 22\ k\Omega + 33\ k\Omega + 47\ k\Omega + 100\ k\Omega = 202\ k\Omega$$

Voorbeeld 1-14

Hoe groot moet *R₂* zijn om een totale weerstandswaarde van *40 k*Ω te bekomen in de schakeling van figuur 1-vb13?



Figuur 1-vb13

Oplossing:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$
$$40\ k\Omega = 1\ k\Omega\ + R_2 + 6{,}8\ k\Omega + 27\ k\Omega$$

$$40\ k\Omega - 1\ k\Omega\ -\ 6{,}8\ k\Omega -\ 27\ k\Omega =\ R_2$$

$$R_2 = 5{,}2\ k\Omega$$

Serieschakeling van *n* gelijke weerstanden

In een serieschakeling die bestaat uit een aantal weerstanden met dezelfde weerstandswaarde kan de totale weerstandswaarde ook berekend worden door de weerstandswaarde van één weerstand te vermenigvuldigen met het aantal weerstanden in de serieschakeling.

In formulevorm :

$$R_T = n\ \times R$$

Hierin is *n* het aantal weertanden met dezelfde waarde in de serieschakeling.

Voorbeeld 1-15

Bepaal de R_T van zeven $33\ \Omega$ weerstanden in serie.

Oplossing:

Je kan R_T bepalen door gewoon de waarden op te tellen :

$$R_T = 33\ \Omega + 33\ \Omega + 33\ \Omega + 33\ \Omega + 33\ \Omega + 33\ \Omega + 33\ \Omega = 231\ \Omega$$

Je bereikt wel sneller resultaat door gewoon de weerstandswaarde te vermenigvuldigen met het aantal in serie staande gelijke weerstanden :

$$R_T = 7\ \times\ 33\ \Omega = 231\ \Omega$$

1.2.3 Wet van Ohm toegepast in een serieschakeling

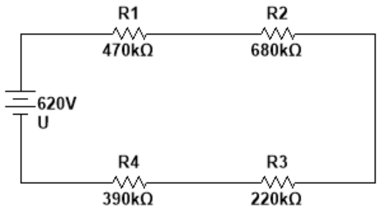
De basisconcepten van serieschakelingen en de wet van Ohm kunnen gebruikt worden voor analyse van een serieschakeling.

Vooraleer je start met de analyse van een serieschakeling is het belangrijk om volgende zaken te weten:

- De stroom door eender welk van deserieweerstanden is gelijk aan de totale stroom door de schakeling
- Volgens de wet van Ohm geldt: $I_T = \frac{U_T}{R_T}$
- Als je de spanningsval over een weerstand R_x kent, dan is : $I_T = \frac{U_x}{R_x}$
- Als je de totale stroom kent, dan is de spanningsval over een weerstand R_x : $U_x = I_T.\ R_x$
- De polariteit van een spanningsval over een weerstand is het positiefst aan het uiteinde van de weerstand die het dichts bij de positieve klem is van de spanningsbron (voeding)
- De stroom door een weerstand vloeit van de aansluitdraad van de weerstand die het negatiefst is naar de aansluitdraad van de weerstand die het positiefst is.
- Eén opening in een serieschakeling (vb. open schakelaar) voorkomt dat er stroom door de schakeling vloeit. Dit houdt in dat over elke serieweerstand geen spanning staat en dat de volledige bronspanning over de opening (open schakelaar) staat.

Voorbeeld 1-16

Bereken de stroom doorheen de serieschakeling van figuur 1-vb14



Figuur 1-vb14

Oplossing:

De stroom wordt bepaald door de bronspanning en de totale serieweerstand R_T.

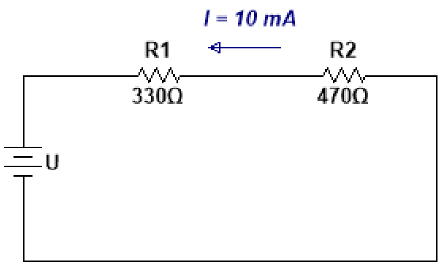
$$R_T = 470\ k\Omega\ + 680k\Omega\ +\ 220\ k\Omega\ + 390\ k\Omega = 1760\ k\Omega = 1{,}76\ M\Omega$$

Via de wet van Ohm kan de stroom worden bepaald:

$$I = \frac{U}{R_T} = \frac{620\ V}{1{,}76\ M\Omega} = 352\ \mu A$$

Voorbeeld 1-17

De stroom doorheen de serieschakeling van figuur 1-vb-16 bedraagt 10 mA. Hoe groot is de aangelegde spanning aan de schakeling opdat deze stroom zou vloeien?



Figuur 1-vb-16

Oplossing:

De aangelegde bronspanning kan worden bepaald via de stroom en de totale serieweerstand R_T.

$$R_T = 330\ \Omega\ + 470\ \Omega\ = 800\ \Omega$$

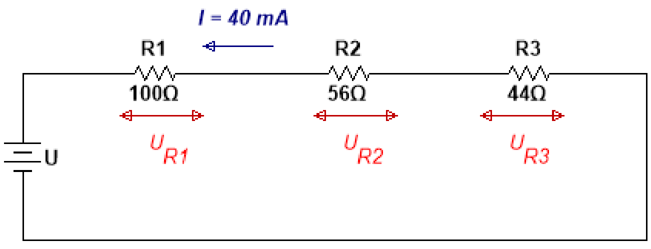
Via de wet van Ohm kan de bronspanning *U* worden bepaald :

$$U = I\ \times R_T = 10\ mA\ \times 800\ \Omega = 8\ V$$

Voorbeeld 1-20

a) Bereken de spanningsvallen over de weerstanden en de aangelegde spanning U van de serieschakeling in figuur 1-vb17.

b) Tot hoeveel volt moet de spanningsbron worden verlaagd opdat er een stroom van $20\ mA$ zou vloeien door de serieschakeling van figuur 4-17?



Figuur 1-vb17

Oplossing:

a) De stroom is gekend en bedraagt *40 mA* (zie fig. 4-17). Via de wet van Ohm kan dan de spanning over de drie weerstanden bepaald worden:

$$U_{R1} = I \times R_1 = 40\ mA \times 100\ \Omega = 4\ V$$

$$U_{R2} = I \times R_2 = 40\ mA \times 56\ \Omega = 2{,}24\ V$$

$$U_{R3} = I \times R_3 = 40\ mA \times 44\ \Omega = 1{,}76\ V$$

De aangelegde spanning U kan gevonden worden door eerst de totale serieweerstand van de schakeling te bepalen en daarna deze te vermenigvuldigen met de stroom door deze schakeling.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 = 100\ \Omega + 56\ \Omega + 44\ \Omega = 200\ \Omega$$

$$U = I \times R_T = 40\ mA \times 200\ \Omega = 8\ V$$

Merk op dat de aangelegde spanning U ook kan gevonden worden door de spanningsvallen over de weerstanden op te tellen.

$$U = U_{R1} + U_{R2} + U_{R3} = 4\ V + 2{,}24\ V + 1{,}76\ V = 8\ V$$

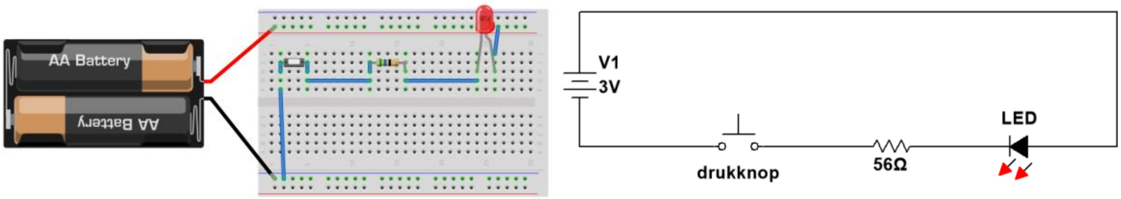
b) Indien er een stroom van $20\ mA$ zou vloeien door de schakeling kan de aangelegde spanning als volgt bepaald worden :

$$U = I \times R_T = 20\ mA \times 200\ \Omega = 4\ V$$

Voorschakelweerstand

Indicatielicht wordt gebruikt om een bepaalde toestand van een machine, relais of schakeling weer te geven. Bijvoorbeeld als je de geluidsversterker van een audio-installatie aanschakelt, begint een indicatie-LED te branden om weer te geven dat de versterker aan staat. Een LED is een elektronische halfgeleidercomponent (diode) die licht uitstraalt als er een elektrische stroom in doorlaat doorheen stroomt. Het halfgeleidermateriaal wordt ingebouwd in een kleine doorzichtige behuizing van een paar millimeter groot dat tevens als lens wordt gebruikt. LED staat voor **l**icht **e**mitterende **d**iode of licht uitstralende diode. Gloeilampindicatorlampen zijn eveneens beschikbaar voor spanningen van $240\ V, 120\ V, 480\ V$ en $600\ V$.

LED's zijn een goede keuze voor het aangeven van een bepaalde conditie zoals het opzetten van de labovoeding. Over een typische LED staat $1{,}7\ V$. Deze spanning is wel afhankelijk van het gebruikte materiaal waarmee de LED is opgebouwd. Afhankelijk van de gewenste lichtsterkte moet een bepaalde stroom door de LED vloeien zodat deze voldoende licht geeft. Meestal wordt bij berekeningen hiervoor $20\ mA$ gekozen. Een stroombegrenzingsweerstand wordt meestal gebruikt in serie met de LED. Deze serieweerstand heeft als functie de stroom door deze LED te beperken.



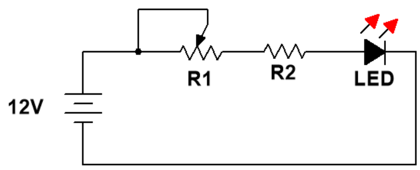
Figuur 1-3: voorbeeld van gebruik van een serieweerstand om een LED te laten oplichten bij een bepaalde spanning

Voorbeeld 1-21

Om de lichtsterkte van een LED aan zijn omgeving te kunnen aanpassen is de schakeling van figuur 4-19 ontworpen. De rheostaat R_1 wordt gebruikt om het licht van de LED te kunnen dimmen.

Over een rode LED staat steeds een spanning van ongeveer *1,7 V* wanneer deze in normale omstandigheden werkt. De overige spanning staat over de beide serieweerstanden.

Stel dat je de stroom door de LED wil laten variëren van een minimum van 4 mA tot een maximum van *20 mA* (helder licht). Welke waarden moeten dan beide weerstanden hebben om dit te realiseren met de schakeling van figuur 1-vb18?



Figuur 1-vb18

Oplossing:

Wanneer de LED het meeste licht geeft (helder), heeft de weerstand $R1$ een weerstandswaarde gelijk aan *0* Ω. De stroom die door de schakeling vloeit is dan *20 mA*. Over $R2$ staat dan een spanningsval gelijk aan het verschil tussen de bronspanning en de spanning over de LED. In formulevorm:

$$R_2 = \frac{U - U_{LED}}{I_{helder}} = \frac{12\ V - 1{,}7\ V}{20\ mA} = \frac{10{,}3\ V}{20\ mA} = 515\ \Omega$$

Wanneer de LED het minst licht geeft (donker) is weerstand $R1$ mee in de schakeling geplaatst met zijn maximale weerstandswaarde. De totale weerstand RT die dan in de schakeling is terug te vinden is gelijk aan de som van $R1$ met $R2$. Vermits $R2$ reeds gekend is, is $R1$ te vinden door het verschil te nemen tussen RT en $R2$. In formulevorm:

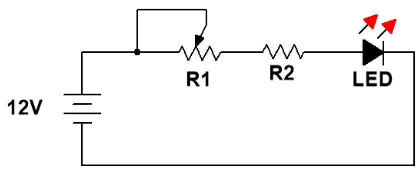
$$R_T = \frac{U - U_{LED}}{I_{donker}} = \frac{12\ V - 1{,}7\ V}{4\ mA} = \frac{10{,}3\ V}{4\ mA} = 2575\ \Omega$$

$$R_1 = R_T - R_2 = 2575\ \Omega - 515\ \Omega = 2060\ \Omega$$

Uiteindelijk kiezen we voor $R_2 = 510\ \Omega$ en $R_1 = 2200\ \Omega$ als dichts bijzijnde standaard weerstandswaarden (E24 reekswaarden)

Voorbeeld 1-22

Om de lichtsterkte van een LED aan zijn omgeving te kunnen aanpassen is de schakeling van figuur 1-vb19 ontworpen. De rheostaat R_1 wordt gebruikt om het licht van de LED te kunnen dimmen.



Figuur 1-vb19

Over een rode LED staat steeds een spanning van ongeveer *1,7 V* wanneer deze in normale omstandigheden werkt. De overige spanning staat over de beide serieweerstanden.

Stel dat je de stroom door de LED wil laten variëren van een minimum van 4 mA tot een maximum van *20 mA* (helder licht). Welke waarden moeten dan beide weerstanden hebben om dit te realiseren met de schakeling van figuur 1-vb19?

Oplossing:

Wanneer de LED het meeste licht geeft (helder), heeft de weerstand $R1$ een weerstandswaarde gelijk aan *0* Ω. De stroom die door de schakeling vloeit is dan *20 mA*. Over $R2$ staat dan een spanningsval gelijk aan het verschil tussen de bronspanning en de spanning over de LED. In formulevorm:

$$R_2 = \frac{U - U_{LED}}{I_{helder}} = \frac{12\,V - 1{,}7\,V}{20\,mA} = \frac{10{,}3\,V}{20\,mA} = 515\,\Omega$$

Wanneer de LED het minst licht geeft (donker) is weerstand $R1$ mee in de schakeling geplaatst met zijn maximale weerstandswaarde. De totale weerstand RT die dan in de schakeling is terug te vinden is gelijk aan de som van $R1$ met $R2$. Vermits $R2$ reeds gekend is, is $R1$ te vinden door het verschil te nemen tussen RT en $R2$. In formulevorm:

$$R_T = \frac{U - U_{LED}}{I_{donker}} = \frac{12\,V - 1{,}7\,V}{4\,mA} = \frac{10{,}3\,V}{4\,mA} = 2575\,\Omega$$

$$R_1 = R_T - R_2 = 2575\,\Omega - 515\,\Omega = 2060\,\Omega$$

Uiteindelijk kiezen we voor $R_2 = 510\,\Omega$ en $R_1 = 2200\,\Omega$ als dichts bijzijnde standaard weerstandswaarden (E24 reekswaarden)

1.2.4 Spanningsbronnen in serie

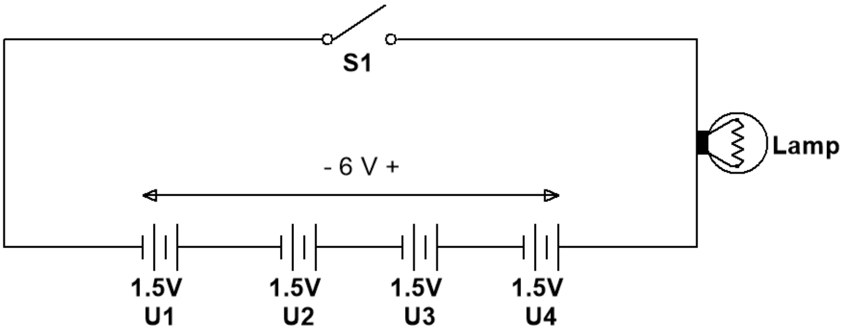
Een spanningsbron is een energiebron die een constante spanning aan een belasting levert. Batterijen en voedingen (power supplys) zijn praktische voorbeelden van een spanningsbron. Wanneer twee of meer spanningsbronnen in serie staan, is de totale spanning gelijk aan de algebraische som van deze twee spanningsbronnen.

Wat is belangrijk?

- **Je kan de totale spanning van een aantal spanningsbronnen in serie bepalen met dezelfde polariteit.**
- **Je kan de totale spanning van een aantal spanningsbronnen in serie bepalen met tegengestelde polariteit.**

Om een hogere spanning te bekomen worden een aantal batterijen in serie geplaatst. Zo worden bijvoorbeeld in een bepaalde zaklamp vier batterijen in serie geplaatst om een lamp van *6 V* te laten branden. In afstandsbedieningen zie je dikwijls twee batterijen in serie om *3 V* te bekomen.

In figuur 1-4 is het schema van de schakeling weergegeven van een zaklamp met een lamp werkend op $6\,V$. Bronnen die in serie worden geplaatst met hun polariteit in dezelfde richting leveren een totale spanning op dat gelijk is aan de som van de afzonderlijke spanningen van deze bronnen.



Figuur 1-3 : schematisch overzicht van een zaklamp met lamp op 6 V

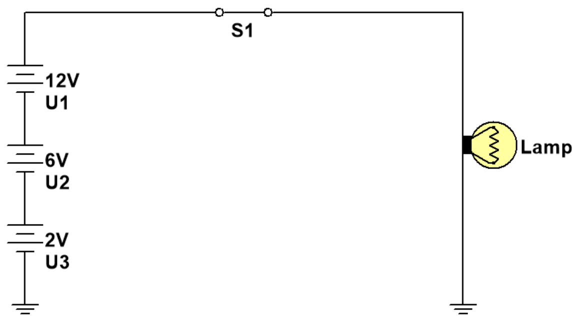
. Voor figuur 1-3 verkrijgen we aldus:

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 1{,}5\ V + 1{,}5\ V + 1{,}5\ V + 1{,}5\ V = 6\ V$$

Er is geen geldige reden om een batterij omgekeerd te plaatsen ten opzichte van de andere batterijen. Dit kan leiden tot grote stromen en reduceert de levensduur van de batterij.

Voorbeeld 1-23

Wat is de totale spanning U_T over de lamp in figuur 1-vb20?



Figuur 1-vb20

Oplossing:

De polariteit van iedere bron is in dezelfde richting. Hierdoor kan je de spanningen van de drie bronnen optellen:

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3 = 12\ V + 6\ V + 2\ V = 20\ V$$

Deze drie individuele spanningsbronnen kunnen eventueel vervangen worden door één spanningsbron met *20 V*.

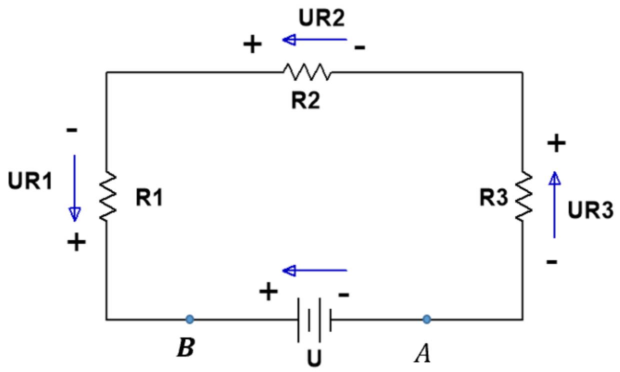
1.2.5 Spanningswet van Kirchhoff

De spanningswet van Kirchhoff is een fundamentele wet die zegt dat de som van de deelspanningen in een elektrische schakeling gelijk is aan de aangelegde voedingsspanning.

Wat is belangrijk?

- Je kan met eigen woorden de spanningswet van Kirchhoff opzeggen.
- Je kan de spanning van een spanningsbron bepalen als je de deelspanningen van een elektrische schakeling kent.
- Je kan een ongekende spanningsval bepalen

In een elektrisch schema staan de polariteiten van de spanningsvallen steeds tegenover de polariteit van de spanningsbron. In figuur 1-4 is te zien dat de stroom tegen de klok in vloeit (elektronenzin). In het voorbeeld van figuur 1-4 is er bijgevolg een linksdraaiende stroomlus. Merk op dat in de figuur 1-4 de bronspanning gaat van plus naar min en dat iedere spanningsval over de weerstand gaat van min naar plus.



-

- *Figuur 1-4 : Voorbeeld van spanningspotentialen in een gesloten schakeling*

De stroom door een weerstand levert energieverlies op in deze weerstand. Hierdoor komen de elektronen op een lager energieniveau uit de weerstand. Een lager energieniveau betekent minder negatief en bijgevolg dus een positiever potentiaal. De daling van het energieniveau over de weerstand creëert een potentiaalverschil of spanningsval over de weerstand met een polariteit gericht van min- naar pluspolariteit in de richting van de stroom. De spanning van punt A naar punt B in figuur 1-4 is gelijk aan de bronspanning maar is ook gelijk aan de som van de spanningsvallen over de weerstanden in de schakeling. Algemeen kan men hieruit concluderen :

De som van al de spanningsvallen in een enkel gesloten pad in een elektrische schakeling is gelijk aan de totale bronspanning over dit gesloten pad. Met andere woorden: **de aangelegde spanning in een circuit is gelijk aan de som der deelspanningen.**

In formulevorm :

$$U_{bron} = U_1 + U_2 + \cdots + Un$$

Een variant op de spanningswet van Kirchhoff:

De algebraïsche som van alle spanningen rond een gesloten pad in een circuit is gelijk aan nul.

In formulevorm :

$$0 = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$$

Als er een spanningsbron in de schakeling staat wordt deze op dezelfde manier behandeld als de spanningsvallen in de schakeling. Merk op dat de spanningsvector van de bron in figuur 1-4 tegengesteld staat als de spanningsvectoren van de spanningsvallen over de weerstanden.

Bovenstaande vergelijkingen aangaande de spanningswet van Kirchhoff toepassen op de schakeling van figuur 1-4 levert volgend resultaat op:

$$U_{bron} = U_{R1} + U_{R2} + U_{R3}$$

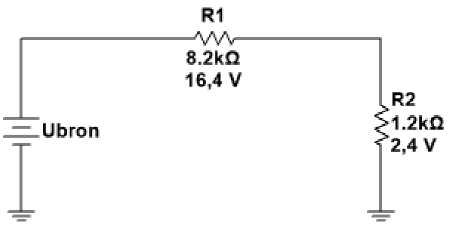
En :

$$0 = -U_{bron} + U_{R1} + U_{R2} + U_{R3}$$

Merk eveneens op dat de spanningswet van Kirchhoff ook in schakelingen die verschillend zijn van een serieschakeling toegepast kan worden.

Voorbeeld 1-24

Bepaal de spanningswaarde van de spanningsbron U_{bron} in figuur 1-vb21.



Figuur 1-vb21

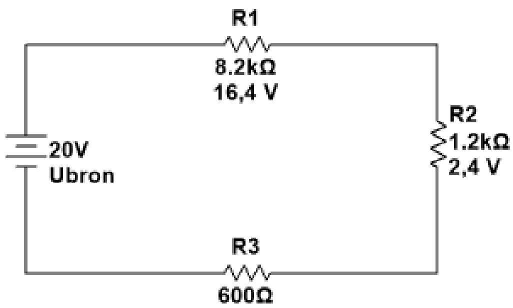
Oplossing:

Volgens de spanningswet van Kirchhoff moet de som van de spanningsvallen in de schakeling gelijk zijn aan de aangelegde bronspanning. Door beide spanningsvallen op te tellen bekomen we de aangelegde spanning.

$$U_{bron} = U_{R1} + U_{R2} = 16{,}4\text{ V} + 2{,}4\text{ V} = 18{,}8\text{ V}$$

Voorbeeld 1-25

Bepaal de onbekende spanningsval U_{R3} in figuur 1-vb22.



Figuur 1-vb22

Oplossing:

Spanningswet van Kirchhoff toepassen levert: .

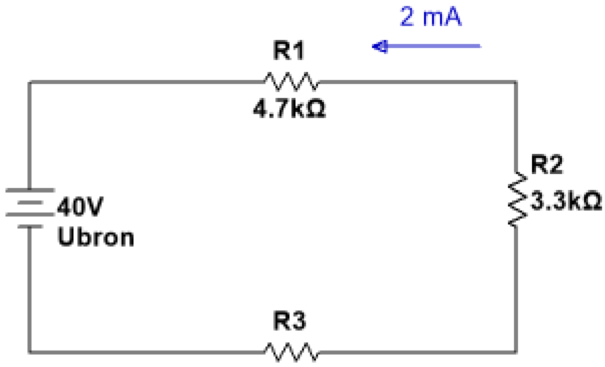
$$U_{bron} = U_{R1} + U_{R2} + U_{R3}$$

$$20\ V = 16{,}4\ V + 2{,}4 V + U_{R3}$$

$$U_{R3} = 20\ V - 16{,}4\ V - 2{,}4\ V = 1{,}2\ V$$

Voorbeeld 1-26

Bepaal de onbekende weerstand R_3 in figuur 1-vb23



Figuur 1-vb23

Oplossing:

Via de wet van Ohm kan je de spanningsvallen over R_1 en R_2 bepalen.

$$U_{R1} = 2\ mA\ \times 4{,}7\ k\Omega = 9{,}4\ V$$

$$U_{R2} = 2\ mA\ \times 3{,}3\ k\Omega = 6{,}6\ V$$

Vervolgens kan je via de spanningswet van Kirchhoff de spanning over R_3 bepalen.

$$U_{bron} = \ U_{R1} + \ U_{R2} + \ U_{R3}$$

$$40\ V = 9{,}4\ V + 6{,}6\ V + \ U_{R3}$$

$$U_{R3} = 40\ V - 9{,}4\ V - 6{,}6V = 24\ V$$

Vervolgens pas je terug de wet van Ohm toe om R_3te vinden :

$$R_3 = \frac{U_{R3}}{2\ mA} = \frac{24\ V}{2\ mA} = 12\ k\Omega$$

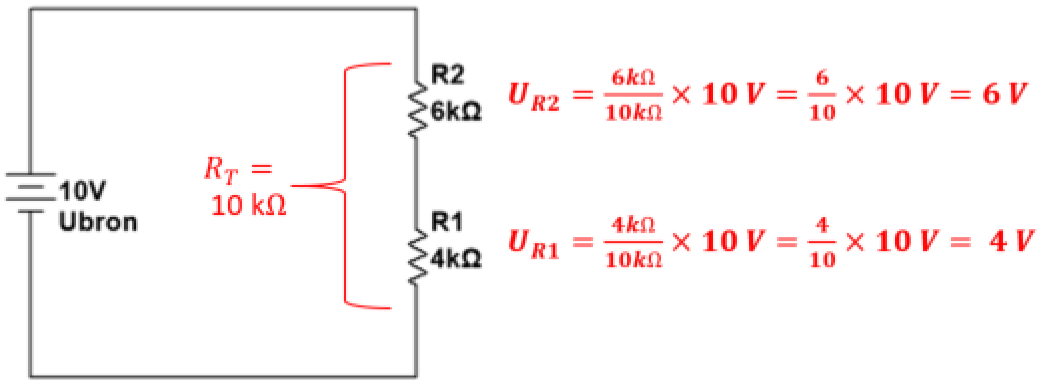
1.2.6 Spanningsdelers

Een serieschakeling gedraagt zich als een spanningsdeler. De spanningsdeler is een belangrijke toepassing van de serieschakeling.

Wat is belangrijk?

- ***Je zegt de spanningsdelerformule op en past hem toe.***
- ***Je gebruikt een potentiometer als spanningsdeler en stelt hem als zodanig in.***
- ***Je beschrijft enkele spannigsdelertoepassingen***.
- ***Je stelt een spanningsdeling met weerstanden in aan de hand van berekeningen***.

Een serieschakeling die bestaat uit weerstanden gedraagt zich als een spanningsdeler. De totale spanningsval over een enkel gesloten stroompad is afhankelijk en recht evenredig met de waarden van de serieweerstanden in dit stroompad. De kleinste weerstand heeft de kleinste spanningsval en de grootste weerstand heeft de grootste spanningsval. In figuur 1-5 zie je dat $6/10$ van de spanningsval over R_2 staat en $4/10$ van de spanningsval over R_1. De reden hiervoor is dat de som van de twee weerstanden gelijk is aan $10\ k\Omega$ ($6\ k\Omega + 4\ k\Omega$). $R_1$is $4/10$ van de totale weerstand en R_2 $6/10$. Dit heeft als gevolg dat over $R_1 4/10$ van de totale spanning staat en over R_2 staat $6/10$ van de totale spanning.

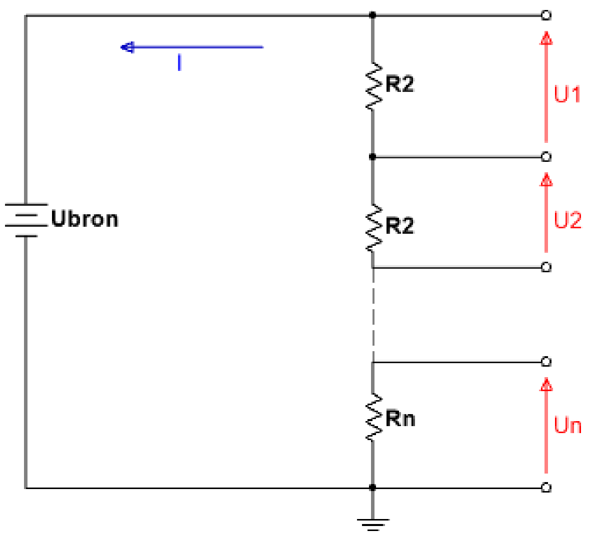


Figuur 1-5 : voorbeeld van een spanningsdeler met twee weerstanden

Een serieschakeling die bestaat uit weerstanden gedraagt zich als een spanningsdeler. De totale spanningsval over een enkel gesloten stroompad is afhankelijk en recht evenredig met de waarden van de serieweerstanden in dit stroompad. De kleinste weerstand heeft de kleinste spanningsval en de grootste weerstand heeft de grootste spanningsval. In figuur 1-5 zie je dat $6/10$ van de spanningsval over R_2 staat en $4/10$ van de spanningsval over R_1. De reden hiervoor is dat de som van de twee weerstanden gelijk is aan $10\ k\Omega$ ($6\ k\Omega + 4\ k\Omega$). $R_1$is $4/10$ van de totale weerstand en R_2 $6/10$. Dit heeft als gevolg dat over $R_1 4/10$ van de totale spanning staat en over R_2 staat $6/10$ van de totale spanning.

1.2.6.1 Formule van de spanningsdeler

Figuur 1-6 toont een algemeen schema van een spanningsdeler met n weerstanden.



Figuur 1-6 : algemeen schema van een spanningsdeler met n weerstanden

Stel dat U_x één van de spanningsvallen is van de weerstanden in figuur 1-6 en dat R_x de specifieke weerstand is waarover deze spanningsval staat. Volgens de wet van Ohm geldt:

$$U_x = I \times R_x \qquad \text{(a)}$$

Hierin is I de totale stroom die door alle weerstanden vloeit. Deze stroom is gelijk aan :

$$I = \frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{U_{bron}}{R_1+R_2+\cdots+R_x+\cdots+R_n} \qquad \text{(b)}$$

Vervang nu in vergelijking (a) de stroom I door vergelijking (b) :

$$U_x = I \times R_x = \frac{U_{bron}}{R_T} \times R_x$$

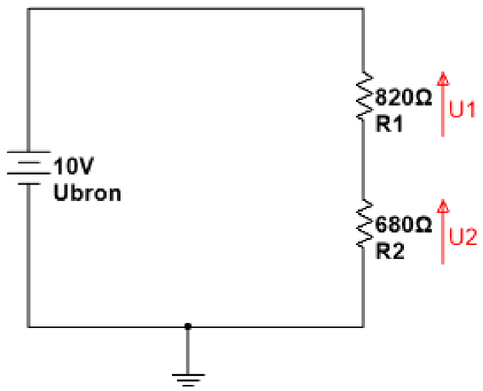
Anders gerangschikt :

$$\boldsymbol{U_x = \frac{R_x}{R_T} \times U_{bron}}$$

De spanningsval over eender welke weerstand van een combinatie van weerstanden in een serieschakeling is gelijk aan de verhouding van deze weerstand op de totale weerstand, vermenigvuldigt met de bronspanning.

Voorbeeld 1-27

Bepaal de spanningsvallen over de weerstanden in figuur 1-vb24.



Figuur 1-vb24

Oplossing:

Via de spanningsdelerformule kan je U_1 en U_2 bepalen. Eerst wordt de totale weerstand bepaald:

$$R_T = R_1 + R_2 = 820\Omega + 680\Omega = 1500\Omega = 1{,}5\ k\Omega$$

Vervolgens kan je de spanningen op volgende wijze bepalen:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_T} \times U_{bron} = \frac{820\Omega}{1500\Omega} \times 10\ V = 5{,}47\ V$$

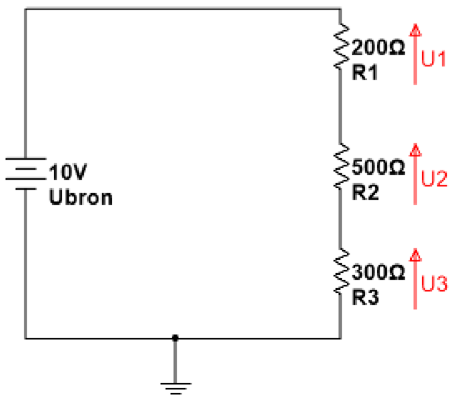
$$U_2 = \frac{R_2}{R_T} \times U_{bron} = \frac{680\Omega}{1500\Omega} \times 10\ V = 4{,}53\ V$$

Controle: Via de spanningswet van Kirchhoff kan je nagaan of je berekeningen kloppen. Immers de som van de spanningsvallen U_1 en U_2 moet gelijk zijn aan de aangelegde bronspanning $Ubron$:

$$U_{bron} = U_1 + U_2 = 5{,}47\ V + 4{,}536\ V = 10\ V$$

Voorbeeld 1-28

Bepaal de spanningsvallen over de weerstanden in figuur 1-vb25



Figuur 1-vb25

Oplossing:

Eerst bereken je de totale weerstand van de serieschakeling. Vervolgens pas je de formule voor de spanningsdeling toe.

$$R_T = 200\Omega + 500\Omega + 300\Omega = 1000\Omega$$

200Ω is 20% van de totale weerstand. Bijgevolg staat over deze weerstand 20 % van de bronspanning of 2 V. Analoog kan je deze redenereing toepassen voor de twee andere weerstanden. Over R_2 staat 50% of $5\ V$ en over $R3$ 30% of 3 V.

Controle via de spanningsdelerformule=

$$U_1 = \frac{R_1}{R_T} \times U_{bron} = \frac{200\Omega}{1000\Omega} \times 10\ V = 2\ V_{CC}$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_T} \times U_{bron} = \frac{500\Omega}{1000\Omega} \times 10\ V = 5\ V$$

$$U_3 = \frac{R_3}{R_T} \times U_{bron} = \frac{300\Omega}{1000\Omega} \times 10\ V = 3\ V$$

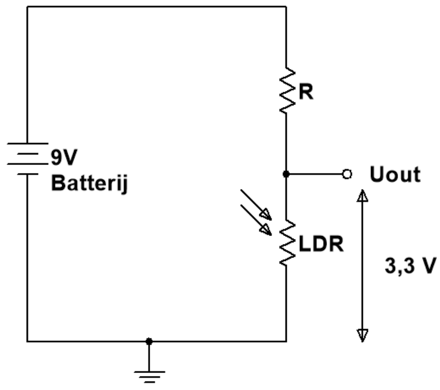
Voorbeeld 1-29

Een LDR wordt gebruikt als lichtdetector in een schakeling zoals in figuur 1-vb26 is weergegeven. De schakeling wordt gevoed door een batterij van 9 V. Stel dat wanne er het donker wordt de weerstand van de LDR gelijk is aan 120 kΩ. De schakeling wordt gebruikt om een triggerpuls af te leveren van 3,3 V aan een digitale schakeling. Dit betekent dat zodra de spanning aan U_{out} gelijk is aan 3,3 V de digitale schakeling een aantal lampen laat aangaan.

Gevraagd: Welke waarde moet de weerstand R hebben opdat de uitgangspanning 3,3 V wordt als het donker wordt?

Oplossing

De formule voor spanningsdeling :



Figuur 1-vb26

Oplossing

De formule voor spanningsdeling :

$$V_{out} = \frac{R_{LDR}}{R + R_{LDR}} \times V_{Batterij}$$

De gekende waarden invullen:

$$3{,}3\ V = \frac{120\ k\Omega}{R + 120\ k\Omega} \times 9\ V$$

Uitwerken naar R :

$$3{,}3 \times (R + 120\ k\Omega) = 120\ k\Omega \times 9$$

$$3{,}3\ R + 3{,}3 \times 120\ k\Omega = 9 \times 120\ k\Omega$$

$$3{,}3\ R = 9 \times 120\ k\Omega - 3{,}3 \times 120\ k\Omega$$

$$R = \frac{9 - 3{,}3}{3{,}3} \times 120\ k\Omega = 207{,}27\ k\Omega$$

1.2.7 Vermogen in een serieschakeling

Het vermogen dat gedissipeerd wordt door één weerstand in een serieschakeling draagt bij tot de totale vermogendissipatie in de schakeling. De individuele vermogendissipaties van de weerstanden in de schakeling kunnen worden opgeteld om het totale vermogen te bekomen.

Het totale vermogen P_T in een serieschakeling van weerstanden is gelijk aan de som van de vermogens in iedere weerstand in deze serieschakeling. In formulevorm:

$$\boldsymbol{P_T = P_1 + P_2 + \cdots + P_n}$$

De vermogenformules die in hoofdstuk *3* besproken zijn, zijn ook hier geldig. Deze formules zijn :

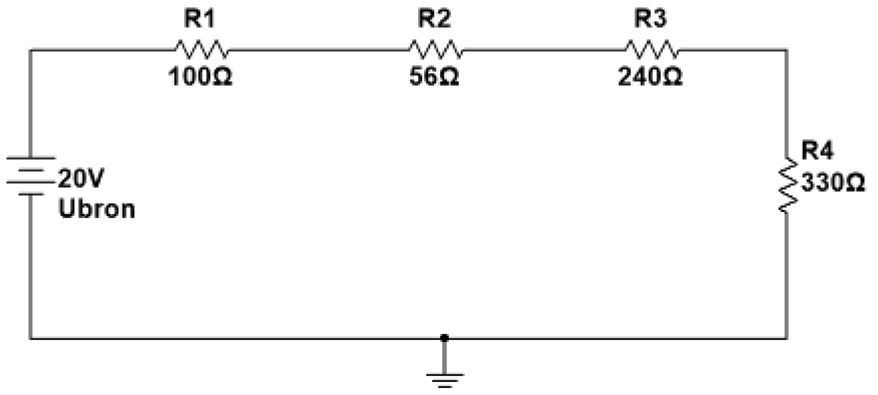
$$P_T = U_{bron} \times I$$

$$P_T = I^2 \times R_T$$

$$P_T = \frac{U_{bron}^2}{R_T}$$

Voorbeeld 1-30

Bepaal het totale vermogen in de serieschakeling van figuur 1-vb27.



Figuur 1-vb27

Oplossing

Eerst wordt de totale weerstand bepaald :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 100\ \Omega + 56\ \Omega + 240\ \Omega + 330\ \Omega = 726\ \Omega$$

Omdat de bronspanning en de totale weerstand nu gekend zijn, kan je het totaal vermogen berekenen met de formule $P_T = \frac{U_{bron}^2}{R_T}$.

$$P_T = \frac{(20\ V)^2}{726\ \ \Omega} = 551\ mW$$

Je kan ook het totale vermogen vinden door het vermogen van iedere weerstand te bepalen en deze vervolgens op te tellen. Eerst wordt de totale stroom bepaald:

$$I_T = \frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{20\ V}{726\ \Omega} = 27{,}55\ mA$$

Het totale vermogen is dan bijgevolg :

$$P_T = I_T^2 \times R_1 + \ I_T^2 \times R_2 + \ I_T^2 \times R_3 + \ I_T^2 \times R_4$$

$$P_T = (27{,}55\ mA)^2 \times 100\ \Omega + (27{,}55\ mA)^2 \times 56\ \Omega + (27{,}55\ mA)^2 \times 240\ \Omega$$
$$+ 27{,}55\ mA)\text{^}2\ \times 330\Omega$$

$P_T =$ 75,9 mW + 42,5 mW + 182,16 mW + 250,47 mW

$$P_T = 551\ mW$$

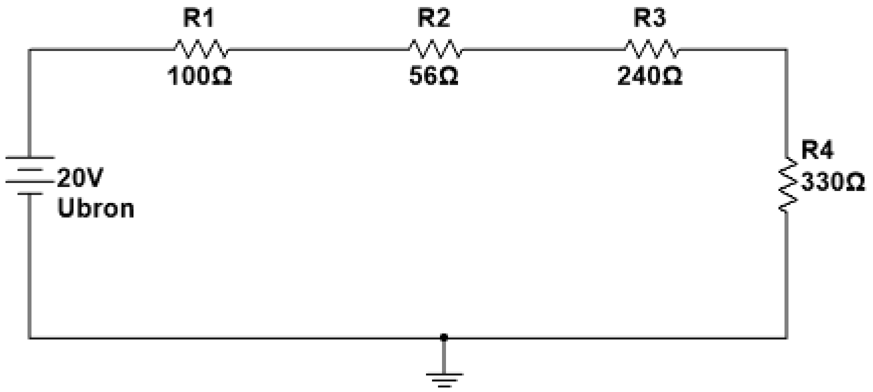
Voorbeeld 1-31

Bepaal het totale vermogen in de serieschakeling van figuur 1-vb28

Oplossing

Eerst wordt de totale weerstand bepaald :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 100\ \Omega + 56\ \Omega + 240\ \Omega + 330\ \Omega = 726\ \Omega$$



Figuur 1-vb28

Omdat de bronspanning en de totale weerstand nu gekend zijn, kan je het totaal vermogen berekenen met de formule $P_T = \frac{U_{bron}^2}{R_T}$.

$$P_T = \frac{(20\,V)^2}{726\ \Omega} = 551\,mW$$

Je kan ook het totale vermogen vinden door het vermogen van iedere weerstand te bepalen en deze vervolgens op te tellen. Eerst wordt de totale stroom bepaald:

$$I_T = \frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{20\,V}{726\,\Omega} = 27{,}55\,mA$$

Het totale vermogen is dan bijgevolg :

$P_T = I_T^2 \times R_1 + I_T^2 \times R_2 + I_T^2 \times R_3 + I_T^2 \times R_4$

$P_T = (27{,}55\,mA)^2 \times 100\,\Omega + (27{,}55\,mA)^2 \times 56\,\Omega + (27{,}55\,mA)^2 \times 240\,\Omega$
$+ 27{,}55\,mA)\text{^}2\ \times 330\Omega$

P_T = 75,9 mW + 42,5 mW + 182,16 mW + 250,47 mW

$P_T = 551\,mW$

1.3 Parallelschakelen van weerstanden

In sectie 1.2.3 heb je gezien hoe je de wet van Ohm kan toepassen. In sectie 1.2.5 de spanningswet van Kirchhoff. In paragraaf bespreken we onder andere de stroomwet van Kirchhoff. Deze drie wetten zijn zeer belangrijk voor het oplossen van problemen aangaande elektriciteit. Op gelijkstroomgebied kan je door toepassing van deze drie wetten meer dan 80 % van alle problemen oplossen. Immers veel van de andere formules kan je aan de hand van deze drie wetten uit een schema afleiden.

Wat is belangrijk?

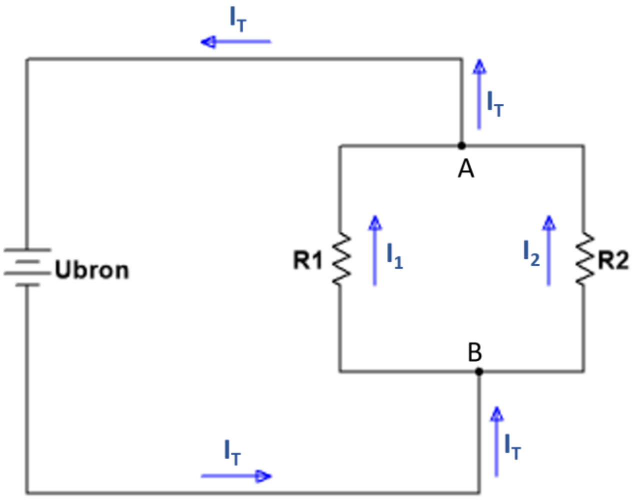
- **Je herkent een parallelschakeling in een elektronische schakeling**
- **Je vormt een fysische parallelschakeling om tot een schema**.
- **Je verklaart met eigen woorden waarom de totale weerstand verkleind als er steeds meer weerstanden in parallel komen te staan.**

- **Je beschrijft minstens twee toepassingen waarin gebruik wordt gemaakt van een parallelschakeling.**
- **Je bepaalt de spanning over iedere tak van een parallelspanning.**
- **Je verklaart waarom de spanning dezelfde waarde heeft over alle weerstanden die met elkaar in parallel staan.**
- **Je berekent de totale stroom in een parallelschakeling.**
- **Je bepaalt de stroom in iedere tak van een parallelschakeling**
- **Je zegt de stroomwet van Kirchhoff op.**
- **Je definieert het begrip knooppunt (node).**
- **Je bepaalt de totale stroom aan de hand van het optellen van de individuele takstromen.**
- **Je bepaalt de stroom in een tak van een parallelschakeling**.
- **Je gebruikt een parallelschakeling als stroomdeler.**
- **Je berekent de onbekende stroom in een bepaalde paralleltak.**

1.3.1 Weerstanden in parallel

Als twee of meer weerstanden verbonden zijn met dezelfde twee punten zegt men dat deze in parallel staan. Een parallelschakeling levert meer dan één pad op voor de stroom.

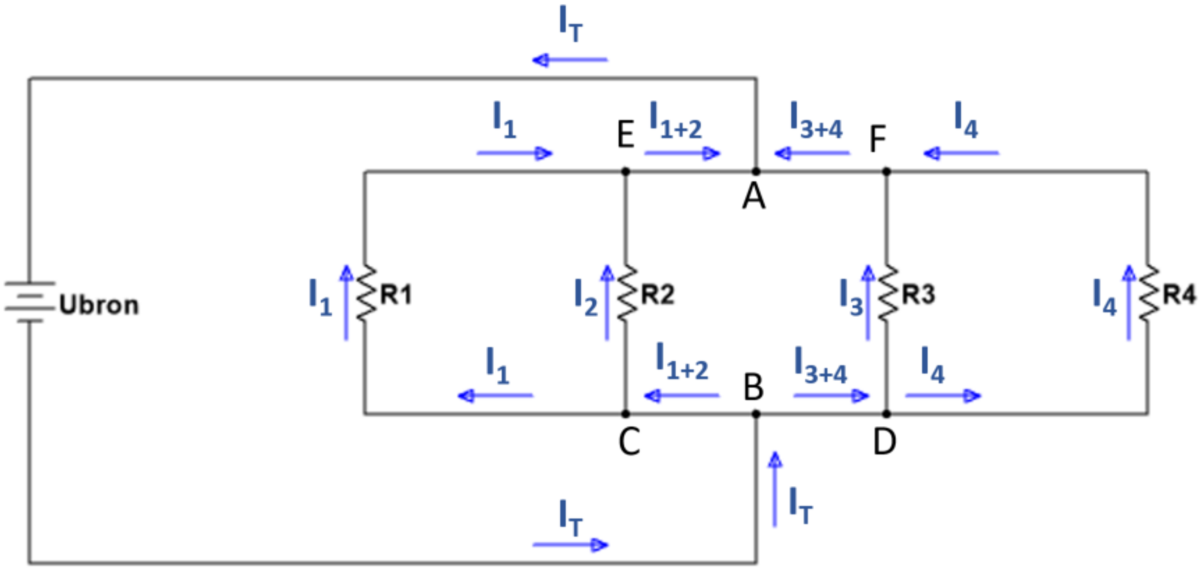
Ieder pad in een parallelschakeling wordt een tak of een “branch” genoemd. In figuur 1-7 zijn twee weerstanden in parallel weergegeven. De totale stroom I_T splitst zich vanaf knooppunt B in twee deelstromen I_1 en I_2. De stroom I_1vloeit door R_1 en de stroom I_2 door R_2.



Figuur 1-7 : twee weerstanden in parallel

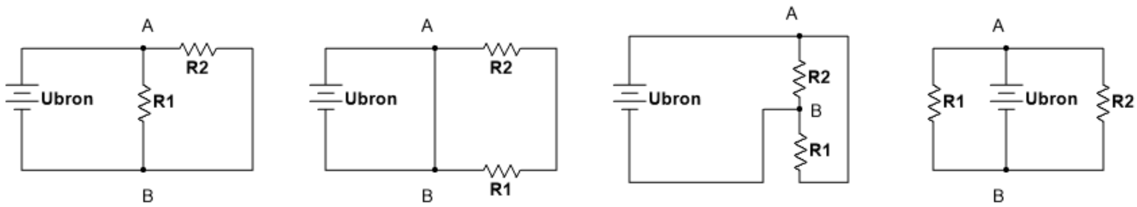
Op knooppunt A komen de stromen I_1 en I_2 samen toe en vormen ze terug de stroom I_T.

In figuur 1-8 is een parallelschakeling met vier weerstanden weergegeven. De totale stroom I_T vloeit vanaf de negatieve klem naar het knooppunt B. In dit knooppunt B splitst deze stroom zich in een stroom I_{1+2} die naar links vloeit en een stroom I_{3+4} die naar rechts vloeit. In het knooppunt C splitst de stroom I_{1+2} zich in een stroom I_1 en I_2. De stroom I_1 vloeit door R_1 en de stroom I_2 vloeit door R_2. In het knooppunt E komen beide stromen weer samen en vormen ze terug de stroom I_{1+2}. Vanaf het knooppunt B vloeit eveneens de stroom I_{3+4} naar rechts toe. Op analoge wijze splitst deze stroom zich in het knooppunt D in de stromen I_3 en I_4. Nadat deze stromen door respectievelijk R_3 en R_4 gaan komen zij terug samen in het knooppunt F. Uiteindelijk vormen de stromen I_{1+2} en I_{3+4} in het knooppunt A terug de totale stroom I_T die verder vloeit naar de positieve klem van de bron.



Figuur 1-8 : parallelschakeling met vier weerstanden

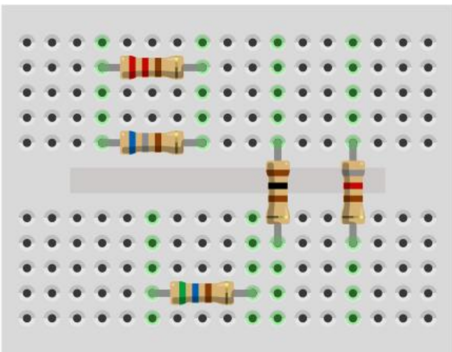
Figuur 1-9 laat verschillende voorbeelden zien hoe een parallelschakeling er uit kan zien. De stroom heeft tussen de knooppunten A en B steeds twee stroompaden. Alhoewel er in figuur 1-9 maar twee stroompaden zijn weergegeven, kunnen er in een parallelschakeling eender welk aantal in parallel voorkomen.



Figuur 1-9 : voorbeelden van verschillende vormen van parallelschakelingen

Voorbeeld 1-32

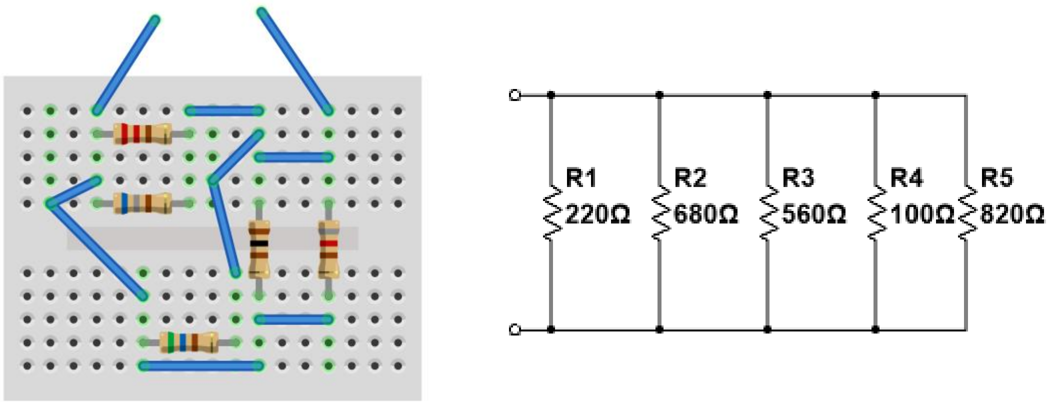
Vijf weerstanden staan op een breadboard. Plaats deze in parallel en teken het elektrisch schema.



Figuur 1-vb29

Oplossing

.



(a) *(b)*

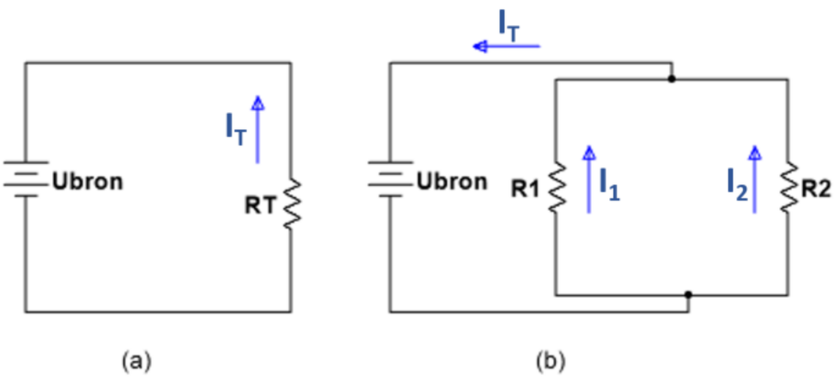
Figuur 1-vb30

Een voorbeeld van een mogelijke bedrading is weergegeven in figuur 1-vb30 (a). Figuur 1-vb30 (b) toont het elektrisch schema van de parallelschakeling. Merk op dat het elektrisch schema niet noodzakelijk de fysische weergave van de schakeling moet weergeven. Het schema toont hoe de componenten op elektrische wijze met elkaar verbonden zijn.

1.3.2 Vervangingsweerstand van een parallelschakeling

Als twee weerstanden in parallel staan daalt de totale weerstand in weerstandswaarde. De vervangingsweerstand R_T van een parallelschakeling is daarom steeds kleiner dan de kleinste parallelweerstand van een tak in de parallelschakeling.

1.3.2.1 Formule voor de totale weerstand R_T van een parallelschakeling



Figuur 1-10 : (a) vervangingsschema van de parallelschakeling in (b)

Figuur 1-10 (a) toont het vervangingsschema van de parallelschakeling van figuur 1-10 (b). Dit betekent dat door beide schema's dezelfde stroom I_T vloeit. Vermits in de schakeling van figuur 5-7 (b) geldt dat I_T gelijk is aan de som van de stromen I_1 en I_2 kunnen we schrijven :

$$I_T = I_1 + I_2$$

Via de wet van Ohm kan je de stromen omvormen naar verhoudingen van spanning op stroom. Dit levert volgend resultaat op:

$$\frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{U_{R1}}{R_1} + \frac{U_{R2}}{R_2}$$

De spanning over R_1 is gelijk aan de bronspanning U_{bron}. Dit geldt eveneens voor de spanning over R_2. Aldus wordt bekomen :

$$\frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{U_{bron}}{R_1} + \frac{U_{bron}}{R_2}$$

Wegdelen van U_{bron} levert het volgende op:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Of na herwerking naar R_T:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Meer algemeen voor n weerstanden in parallel geldt dat de vervangingsweerstand R_T als volgt kan worden gevonden :

$$\boldsymbol{R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}}}$$

Het bepalen van de vervangingsweerstand van twee weerstanden in parallel kan ook op volgende manier:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$R_T = \frac{1}{\frac{R_2}{R_1R_2} + \frac{R_1}{R_1R_2}} = \frac{1}{\frac{R_2+R_1}{R_1R_2}}$$

$$\boldsymbol{R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}}$$

Deze formule wordt ook wel eens de product over som formule genoemd.

Het omgekeerde van weerstand is geleiding. Geleiding wordt voorgesteld door G. Via geleiding kan je ook de vervangingsweerstand van een parallelschakeling bepalen. Door eerst de totale geleiding te bepalen kan je vervolgens de vervangingsweerstand bepalen op volgende manier :

$$R_T = \frac{1}{G_T}$$

Deze manier van werken is handig als je de vervangingsweerstand uitrekent met een rekenmachine. Stel bijvoorbeeld drie weerstanden R_1, R_2 en R_3 in parallel. De totale geleiding bereken je als volgt :

$$G_T = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Via het rekenmachine:

Figuur 5-8 : bepalen van de totale geleiding G_T met een rekenmachine

De totale geleiding kan je vinden door eerst R_1 in te geven, vervolgens op de *1/x-toets* te drukken. Hierdoor is de weerstandswaarde omgezet naar de geleidingswaarde G_1. Daarna druk je op de *+-toets* en geef je de weerstandswaarde van R_2 in. Dit herhaal je tot alle parallelgeschakelde weerstanden zijn ingegeven. Nadat de laatste weerstandswaarde is ingegeven druk je op de *1/x-toets* en vervolgens op de *=-toets*. Het resultaat is nu gelijk aan de totale geleiding G_T. De relatie tussen de totale geleiding en de totale weerstand van de parallelschakeling is als volgt:

$$R_T = \frac{1}{G_T}$$

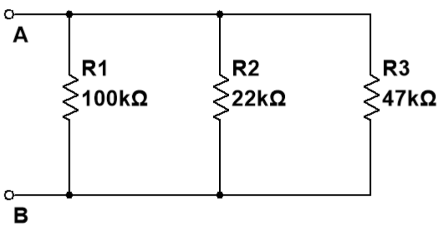
Via het rekenmachine:

Figuur 5-9: omzetten via rekenmachine van G_T naar R_T

Via figuur 5-8 en figuur 5-9 heb je een manier om zeer snel de vervangingsweerstand $R_T$van een parallelschakeling bestaande uit n weerstanden te bepalen.

Voorbeeld 1-33

Bereken de totale parallelschakelweerstand tussen de punten A en B van de schakeling in figuur 1-vb31



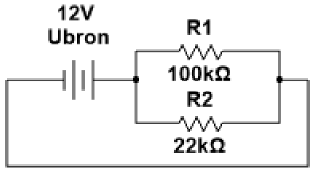
Figuur 1-vb31

Oplossing

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{100\ k\Omega} + \frac{1}{22\ k\Omega} + \frac{1}{47\ k\Omega}} = 13{,}03\ k\Omega$$

Voorbeeld 1-34

Bereken de totale parallelschakelweerstand over de spanningsbron van de schakeling in figuur 1-vb32.



Figuur 1-vb32

Oplossing

$$R_T = \frac{100\ k\Omega\ \times 22\ k\Omega}{100\ k\Omega + \ 22\ k\Omega} = 18{,}03\ k\Omega$$

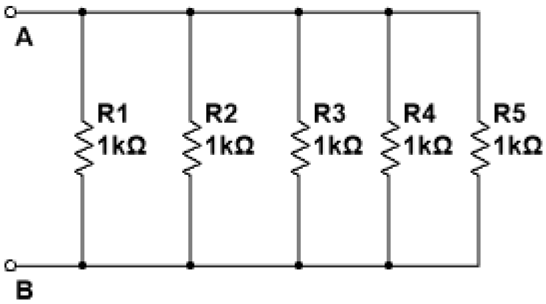
1.3.2.2 Bepalen vervangingsweerstand bij n gelijke weerstanden in parallel.

Indien er n gelijke weerstanden in parallel staan kan je de vervangingsweerstand als volgt vinden:

$$\boldsymbol{R_T = \frac{R}{n}}$$

Voorbeeld 1-35

Bereken de totale parallelschakelweerstand van de weerstanden in figuur 1-vb33.



Figuur 1-vb33

Oplossing

Alle vijf weerstanden hebben dezelfde weerstandswaarde. De vervangingsweerstand kan dan als volgt bepaald worden:

$$R_T = \frac{1\ k\Omega}{5} = 0{,}2\ k\Omega = 200\ \Omega$$

1.3.2.3 Notatie om een parallelschakeling aan te geven

Om een vervangingsweerstand van n weerstanden weer te geven kan je gebruik maken van de formule van vergelijking 5-1. Dit is dikwijls een omslachtige manier waarbij het overzicht soms zoek kan geraken. Daarom maakt men gebruik van het symbool "∥" om weerstanden in parallel aan te geven. De vervangingsweerstand van de parallelschakeling van figuur 5-11 kan men bijgevolg ook als volgt voorstellen:

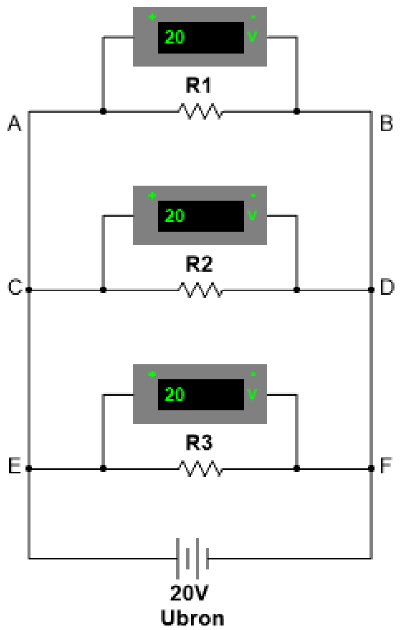
$$R_T = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$$

Stel dat een weerstand van $330\ \Omega$ parallel staat met een weerstand van $680\ \Omega$ dan kan je de vervangingsweerstand hiervoor als volgt noteren:

$$R_T = 330\ \Omega \parallel 680\ \Omega$$

1.3.3 De spanning in een parallelschakeling

De spanning over een bepaalde tak van een parallelschakeling is gelijk aan de spanning over elk van de andere takken die aanwezig zijn in deze parallelschakeling. Elk stroompad in een parallelschakeling wordt een tak (branch) genoemd.



Figuur 1-11 : de spanning over iedere tak van een parallelschakeling is gelijk aan de aangelegde spanning

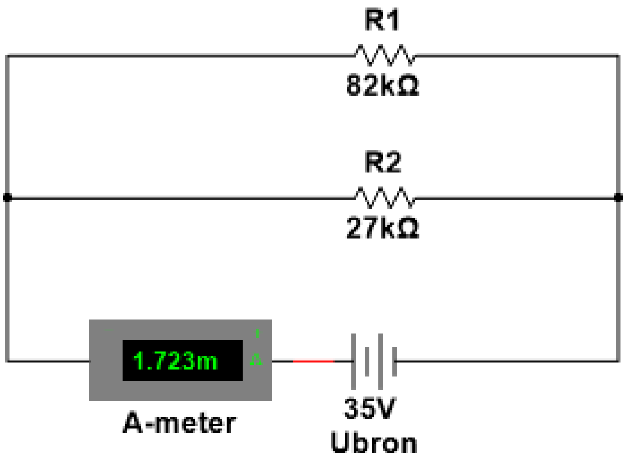
Figuur 1-11 geeft een parallelschakeling met drie weerstanden weer. De punten A, Cen E staan op hetzelfde potentiaal als de positieve klem van de spanningsbron U_{bron}. De punten B, D en E staan op een potentiaal gelijk aan de negatieve klem van U_{bron}. Over de drie weerstanden staat hetzelfde potentiaalverschil. In dit geval is dit gelijk aan het potentiaalverschil van U_{bron} en bedraagt dit $20\ V$.

1.3.4 De wet van Ohm toepassen op een parallelschakeling

De wet van Ohm kan bij analyse van een parallelschakeling worden toegepast. Dit wordt verduidelijkt aan de hand van een aantal rekenvoorbeelden.

Voorbeeld 1-36

Bereken de totale stroom die U_{bron} levert aan de parallelschakeling van figuur 1-vb34



Figuur 1-vb34

Oplossing

De totale stroom die door de schakeling vloeit is afhankelijk van de bronspanning en de vervangingsweerstand van de parallelschakeling. Bepalen we eerst R_T:

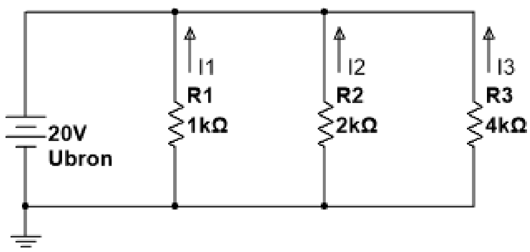
$$R_T = \frac{82\ k\Omega\ \times 27\ k\Omega}{82k\Omega +\ 27\ k\Omega} = 20{,}31\ k\Omega$$

Via de wet van Ohm kan dan de totale stroom I_T bepaald worden:

$$I_T = \frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{35\ V}{20{,}31\ k\Omega} = 1{,}723\ mA$$

Voorbeeld 1-37

Bepaal de stromen door de weerstanden van de parallelschakeling van figuur 1-vb35.



Figuur -1-vb35

Oplossing

De spanning over iedere tak van de parallelschakeling is hetzelfde en bedraagt in dit geval $20\ V$. De stromen door de weerstanden zijn als volgt te bepalen:

$$I_1 = \frac{U_{bron}}{R_1} = \frac{20\ V}{1\ k\Omega} = 20\ mA$$

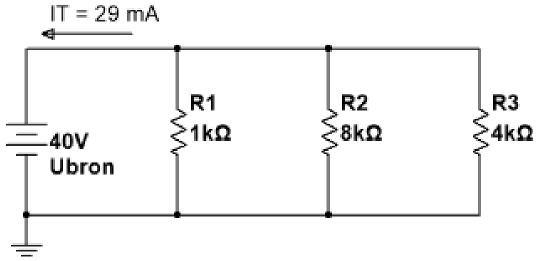
$$I_2 = \frac{U_{bron}}{R_2} = \frac{20\ V}{2\ k\Omega} = 10\ mA$$

$$I_3 = \frac{U_{bron}}{R_3} = \frac{20\ V}{4\ k\Omega} = 5\ mA$$

Merk op dat door de grootste weerstand de kleinste stroom vloeit en door de kleinste weerstand de grootste stroom.

Voorbeeld 1-38

Bepaal de bronspanning van de schakeling in figuur 1-vb36.



Figuur 1-vb36

Oplossing

$I_T = 29\ mA$. Als je de totale weerstand van de parallelschakeling kent dan kan je via de wet van Ohm de bronspanning bepalen.

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{1\ k\Omega} + \frac{1}{8\ k\Omega} + \frac{1}{4\ k\Omega}} = 727{,}27\ \Omega$$

De bronspanning is dan gelijk aan:

$$U_{bron} = I_T \times R_T = 29\ mA\ \times 727{,}27\ \Omega = 21{,}09\ \ V$$

Voorbeeld 1-39

In bepaalde gevallen is een directe meting van de weerstand niet praktisch. Bijvoorbeeld de lamphouders waarin gloeilampen worden vastgedraaid worden erg warm als de lampen branden. Deze warmte doet de weerstandswaarde stijgen. Een Ohmmeter kan enkel de weerstandswaarde van de lamp bepalen als ze in koude toestand is.

Stel dat je de equivalente weerstand wil weten van de twee koplampen en de twee achterlichten van je auto. De twee koplampen werken normaal op een spanning van $12{,}6\ V$ terwijl door elk van hun een stroom van $2{,}8\ A$ vloeit.

Gevraagd:

a) Wat is de totale equivalente weerstand als de twee koplampen branden?
b) Stel dat de totale stroom door de koplampen en achterlichten gelijk is aan $8\ A$ (als de vier lampen branden.) Wat is dan de equivalente weerstand van ieder achterlicht?

Oplossing

a) Via de wet van Ohm kan je de equivalente weerstand van één koplamp bepalen:

$$R_{kop} = \frac{U}{I} = \frac{12{,}6\ V}{2{,}8\ A} = 4{,}5\ \Omega$$

De twee koplampen zijn identiek en staan in parallel waardoor de totale equivalente weerstand gelijk is aan :

$$R_{Tkop} = \frac{R_{kop}}{n} = \frac{4{,}5\ \Omega}{2} = 2{,}25\ \Omega$$

b) De totale weerstand van de twee koplampen en twee achterlichten kan je als volgt bepalen:

$$R_T = \frac{12{,}6\ V}{8{,}0\ A} = 1{,}58\ \Omega$$

Via de formule van de parallelschakeling kan je de weerstanden van de achterlichten bepalen:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{Tkop}} + \frac{1}{R_{Tachter}}$$

$$\frac{1}{R_{Tachter}} = \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_{Tkop}} = \frac{1}{1{,}58\ \Omega} - \frac{1}{2{,}25\ \Omega} = 0{,}19047\ S$$

Hieruit halen we $R_{Tachter}$:

$$R_{Tachter} = \frac{1}{0{,}19047\ S} = 5{,}25\ \Omega$$

De twee achterlichten staan in parallel en hebben een identieke weerstand. Bijgevolg is de weerstand van een achterlicht gelijk aan $10{,}5\ \Omega$ $(R_{achter} = n \times R_{Tachter} = 2\ \times 5{,}25\ \Omega)$

1.3.5 De stroomwet van Kirchhoff

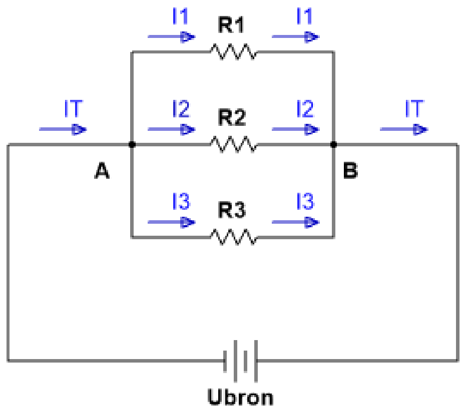
In sectie 1.2.5 is de spanningswet van Kirchhoff besproken. Deze handelt over spanningen in één enkel stroompad. De stroomwet van Kirchhoff handelt over stromen in meerdere stroompaden.

De stroomwet van Kirchhoff zegt dat de som van de stromen die in een bepaald knooppunt toekomen gelijk is aan de som van de stromen die dit knooppunt verlaten. De stroomwet geeft dus aan dat de ingangsstroom in een knooppunt gelijk is aan de totale uitgangsstroom van dit knooppunt. Een knooppunt of een node is eender welk punt of junctie in een schakeling waarbij twee of meer componenten met elkaar verbonden zijn.

Beschouw de schakeling in figuur 1-12. De totale stroom I_T vertrekt van de negatieve klem van de spanningsbron en stroomt binnen in knooppunt A. Vanuit knooppunt A vertrekken drie stromen I_1, I_2 en I_3. De stroomwet van Kirchhoff toepassen in knooppunt A levert volgende vergelijking op:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

In knooppunt B komen de stromen I_1, I_2 en I_3 toe. De stoom die knooppunt B verlaat is I_T. Voor knooppunt B kan je dan volgende vergelijking schrijven:



Figuur 1-12 : Stroom wet van Kirchhoff : de toekomende stromen in een knooppunt zijn gelijk aan de wegvloeiende stromen van dat knooppunt.

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_T$$

De stroomwet van Kirchhoff is toepasbaar op alle elektronische schakelingen. De algemene formule voor de stroomwet van Kirchhoff is:

$$\boldsymbol{I_{in(1)} + I_{in(2)} + \cdots + I_{in(n)} = I_{uit(1)} + I_{uit(2)} + \cdots I_{uit(m)}}$$

Een andere schrijfwijze van de stroomwet van Kirchhoff:

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0$$

Dit betekent : De algebraïsche som van alle stromen die in een knooppunt vloeien en wegvloeien is gelijk aan nul.

Voorbeeld 1-40

In voorbeeld 1-39 heb je de equivalente weerstand bepaald van koplampen en achterlichten van een auto. Vind door gebruik te maken van de stroomwet van Kirchhoff de stroom door ieder van de achterlichten als gegeven is dat de totale stroom gelijk is aan $8\ A$ en door iedere koplamp een stroom van $2{,}8\ A$ vloeit.

Oplossing

De stroom die van de batterij afkomstig is stroomt door de beide koplampen en beide achterlichten. Vermits per koplamp een stroom vloeit van $2{,}8\ A$, is de totale stroom door de koplampen gelijk aan:

$$I_{Tkop} = 2{,}8\ A + 2{,}8\ A = 5{,}6\ A$$

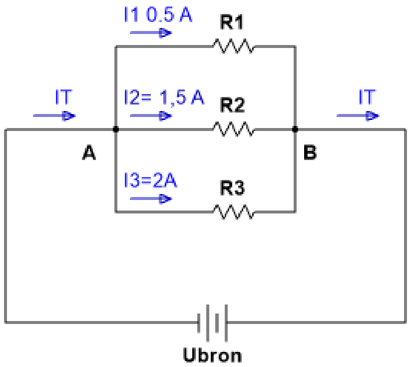
De stroom die door de achterlichten vloeit is dan als volgt te vinden:

$$I_{Tachter} = I_{batterij} - I_{Tkop} = 8{,}0\ A - 5{,}4\ A = 2{,}4\ A$$

Vermits de achterlichten identiek zijn, stroomt door ieder achterlicht $2{,}4\ A/2 = 1{,}2\ A$

Voorbeeld 1-41

In de schakeling van figuur 1-vb37 zijn de stromen door iedere tak weergegeven. Bepaal de totale stroom die knooppunt A binnenstroomt en de totale stroom die knooppunt B buitenstroomt.



Figuur 1-vb37

Oplossing

De totale stroom die knooppunt A instroomt is gelijk aan de som van de wegvloeiende stromen in de drie takken. In formulevorm:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = 0{,}5\ A + 1{,}5\ A + 2\ A = 4\ A$$

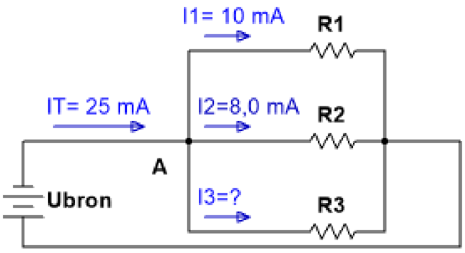
De totale stroom die binnenstroomt in knooppunt B is gelijk aan de som van de drie takstromen. De totale stroom die wegvloeit van knooppunt B is gelijk aan I_T. In formulevorm:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_T$$

$$0{,}5\ A + 1{,}5\ A + 2\ A = 4\ A$$

Voorbeeld 1-42

In de schakeling van figuur 1-vb38 zijn de stromen door iedere tak weergegeven. Behalve de stroom door de derde tak. Bepaal de stroom I_3.



Figuur 1-vb38

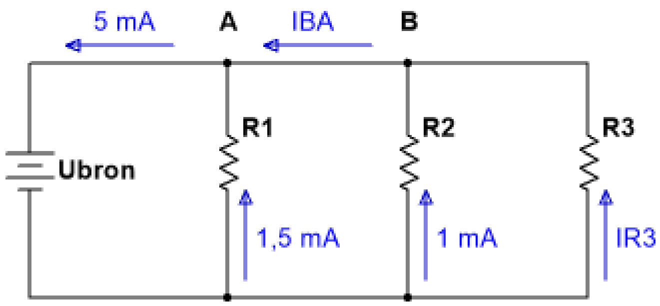
Oplossing

Door toepassing van de stroomwet op knooppunt A kan je de onbekende stroom I_3 vinden:

$$I_3 = I_T - I_1 - I_2 = 25\ mA - 10\ mA - 8\ mA = 7\ mA$$

Voorbeeld 1-43

Gebruik de stroomwet van Kirchhoff om de onbekende stromen te vinden van de schakeling in figuur 1-vb39.



Figuur 1-vb39

Oplossing

Voor knooppunt A kan je schrijven

$$I_T = I_{R1} + I_{BA}$$

Omvormen naar de onbekende stroom I_{BA} :

$$I_{BA} = I_T - I_{R1} = 5\ mA - 1{,}5\ mA = 3{,}5\ mA$$

Voor knooppunt B kan je schrijven:

$$I_{BA} = I_{R2} + I_{R3}$$

Omvormen naar de onbekende stroom I_{R3}:

$$I_{R3} = I_{BA} - I_{R2} = 3{,}5\ mA - 1\ mA = 2{,}5\ mA$$

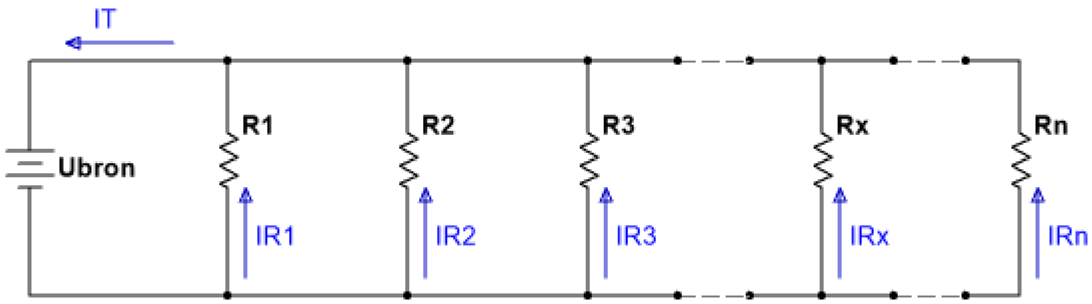
1.3.6 Stroomdelers

Een parallelschakeling gedraagt zich als een stroomdeler vermits de stroom die toekomt op het knooppunt van de verschillende in parallel staande stroomtakken zich verdeeld in deze verschillende in parallel staande stroomtakken.

Aangezien bij een parallelschakeling dezelfde spanning staat over de weerstanden die in parallel staan, verhouden de stromen door de takken zich in functie van de weerstandswaarden. Meer bepaald zal de totale stroom zich verdelen langs de parallelweerstanden in stromen die omgekeerd evenredig zijn met de weerstandswaarden. Dit betekent dat de takken met de grootste weerstanden de laagste stroom hebben en de takken met de laagste weerstand de grootste stroom. Als alle takken dezelfde weerstand hebben zijn de stromen in de takken aan elkaar gelijk.

1.3.6.1 Formule voor de stroomdeler

Via de wet van Ohm kan je de stroom bepalen over een willekeurige parallelweerstand. Stel U_{bron} is de spanning van de spanningsbron, I_x de stroom door een bepaalde parallelweerstand en R_x de weerstandswaarde van die bepaalde parallelweerstand.



Figuur 1-13: Een parallelschakeling met n takken

Voor figuur 1-13 geldt algemeen:

$$I_x = \frac{U_{bron}}{R_x}$$

De bronspanning U_{bron} is gelijk aan :

$$U_{bron} = I_T \times R_T$$

Met R_T de totale vervangingsweerstand van de parallelschakeling. Vullen we de vergelijking van U_{bron} in de vergelijking van I_x, dan verkrijgen we:

$$I_x = \frac{I_T \times R_T}{R_x}$$

Of :

$$\boldsymbol{I_x = \frac{R_T}{R_x} \times I_T}$$

De stroom I_x door een bepaalde tak is gelijk aan de verhouding van de totale parallelweerstand R_T op de weerstand R_x van de beschouwde tak, vermenigvuldigt met de totale stroom I_T die toekomt op het knooppunt van de paralleltakken.

As de parallelschakeling uit twee weerstanden bestaat, kan de stroomdelerformule als volgt bepaald worden :

$$I_1 = \frac{R_T}{R_1} . \ I_T = \frac{\frac{R_1 . R_2}{R_1 + R_2}}{R_1} . \ I_T$$

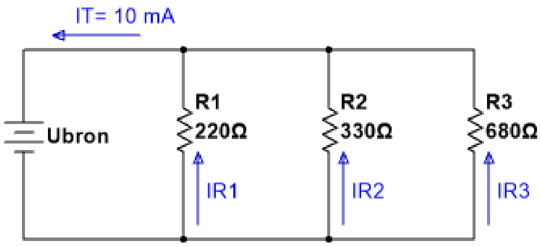
Verder uitwerken levert volgende formule op:

$$\boldsymbol{I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} . \ I_T}$$

$$\boldsymbol{I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} . \ I_T}$$

Voorbeeld 1-44

Bepaal de stroom door iedere weerstand van de schakeling in figuur 1-vb40



Figuur 1-vb40

Oplossing

Eerst bepalen we de totale vervangingsweerstand van de parallelschakeling:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{220\ \Omega} + \frac{1}{330\ \Omega} + \frac{1}{680\ \Omega}} = 111\ \Omega$$

Via de stroomdelerformule kan je vervolgens de stromen door de verschillende weerstanden berekenen:

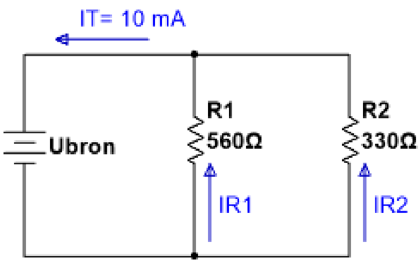
$$I_1 = \frac{R_T}{R_1} \times I_T = \frac{111\ \Omega}{220\ \Omega} \times 10\ mA = 5{,}05\ mA$$

$$I_2 = \frac{R_T}{R_2} \times I_T = \frac{111\ \Omega}{330\ \Omega} \times 10\ mA = 3{,}36\ mA$$

$$I_3 = \frac{R_T}{R_3} \times I_T = \frac{111\ \Omega}{680\ \Omega} \times 10\ mA = 1{,}63\ mA$$

Voorbeeld 1-45

Bepaal de stroom door iedere weerstand van de schakeling in figuur 1-vb41



Figuur 1-vb41

Oplossing

Door vergelijking 5-6 toe te passen kunnen de stromen gevonden worden.

$$I_{R1} = \frac{330\ \Omega}{560\ \Omega + 330\ \Omega} \times 10\ mA = 3{,}71\ mA$$

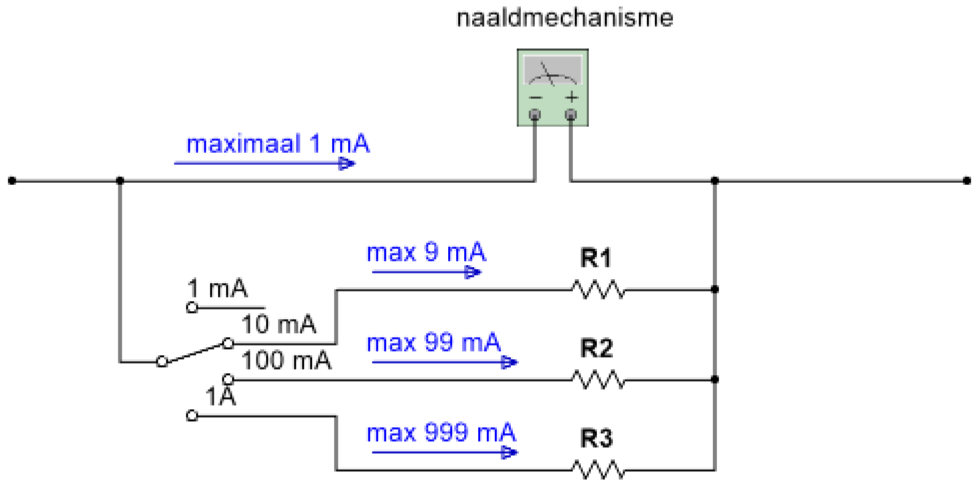
$$I_{R2} = \frac{560\ \Omega}{560\ \Omega + 330\ \Omega} \times 10\ mA = 6{,}29\ mA$$

1.3.6.2 Gebruik van een shunt

Veel systemen gebruiken ampèremeters in controlepanelen om een visuele indicatie van de stroom te kunnen weergeven. Veel ampèremeters zijn zodanig opgebouwd dat ze meer dan één schaal weergeven. Dikwijls is de meter gevoelig en wordt deze vernietigd als er grote stromen doorgaan. Het mechanisme dat de naald laat bewegen is dikwijls verbonden met een beweegbare spoel. Deze verdraaid in een magnetisch veld afhankelijk van de stroomdoorgang door de spoel.

Om toch grotere stromen te kunnen meten en weergeven wordt parallel aan het naaldmechanisme een weerstand geplaatst. Deze is zodanig gedimensioneerd dat bij grotere stromen het veruit de meeste stroom door deze weerstand gaat en zo het naaldmechanisme beschermd. De parallelweerstand vormt een aftakking of “shunt” op dit naaldmechanisme.

Stel dat bij een bepaalde ampèremeter het naaldmechanisme een weerstand heeft van $50\ \Omega$. Veronderstel eveneens dat de meter bij stroomdoorgang van $1\ mA$ volledig uitslaat en dus zijn maximale waarde weergeeft. Dit betekent dat de naald stromen tot 1 mA stroomdoorgang kan weergeven. Stel dat we deze meter willen aanpassen om stromen tot $10\ mA$ te kunnen weergeven. Dit kunnen we doen door een weerstand parallel (shunt) op het naaldmechanisme te plaatsen. Deze weerstand moet zodanig gedimensioneerd worden dat bij volle naalduitslag $9\ mA$ door deze shuntweerstand gaat en $1\ mA$ door het naaldmechanisme.



Figuur 1-14 : gebruik van shunt-weerstanden in een A-meter

De nodige weerstandswaarden voor de shuntweerstanden kunnen gevonden worden via de stroomdelerformule. Zo is voor een schaal van $10\ mA$ de maximale shuntstroom gelijk aan:

$$I_{\max(shunt)} = I_T - I_{meter} = 10\ mA - 1\ mA = 9\ mA$$

Om de shuntweerstand voor de schaal van $10\ mA$ te vinden moet je eerst de totale weerstand vinden van de parallelschakeling die is opgebouwd met naaldmechanisme en de schuntweerstand voor de schaal $10\ mA$. Deze kan je vinden via de stroomdelerformule:

$$\mathrm{I_x} = \frac{\mathrm{R_T}}{\mathrm{R_x}} \times \mathrm{I_T}$$

De gekende waarden invullen:

$$1\ mA = \frac{\mathrm{R_T}}{50\ \Omega} \times 10\ \mathrm{mA}$$

Omvormen naar $\mathrm{R_T}$:

$$R_T = \frac{1\ mA}{10\ mA} \times 50\ \Omega = 5\ \Omega$$

Nu R_T gekend is kan je deze invullen in de stroomdelerformule en $\mathrm{I_x}$ is nu de stroom door de shunt:

$$9\ mA = \frac{5\ \Omega}{\mathrm{R_{shunt(10\ mA)}}} \times 10\ \mathrm{mA}$$

$$\mathrm{R_{shunt(10\ mA)}} = \frac{10\ mA}{9\ mA} \times 5\ \Omega = 5{,}56\ \Omega$$

Voor de schaal van $100\ mA$ en $1\ A$ kan je analoge redenering volgen. Voor de schaal van $100\ mA$:

$$R_T = \frac{1\ mA}{100\ mA} \times 50\ \Omega = 0{,}5\ \Omega$$

$$\mathrm{R_{shunt(100\ mA)}} = \frac{100\ mA}{99\ mA} \times 0.5\ \Omega = 0{,}51\ \Omega$$

Voor de schaal van $1\ A$:

$$R_T = \frac{1\ mA}{1000\ mA} \times 50\ \Omega = 0{,}05\ \Omega$$

$$\mathrm{R_{shunt(1000\ mA)}} = \frac{1000\ mA}{999\ mA} \times 0.05\ \Omega = 0{,}05005\ \Omega$$

1.3.7 Vermogen in parallelschakelingen

Het totaal vermogen van een parallelschakeling kan gevonden worden door alle vermogens van de afzonderlijke weerstanden op te tellen. Dit is ook zo bij de serieschakeling.

Het totaal vermogen bepalen van n weerstanden in parallel kan met volgende vergelijking worden bepaald:

$$\boldsymbol{P_T = P_1 + P_2 + \cdots + P_n}$$

De volgende formules kan je gebruiken om het totale vermogen te berekenen:

$$P_T = U_{bron} \times I_T$$

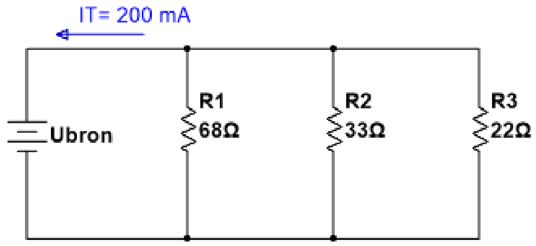
$$P_T = \frac{U_{bron}^2}{R_T}$$

$$P_T = I_T^2 \times R_T$$

Volgende rekenvoorbeelden geven je meer inzicht in het bepalen van het totale vermogen in een parallelschakeling.

Voorbeeld 1-46

Bepaal het totaal vermogen in de parallelschakeling van figuur 1-vb42



Figuur 1-vb42

Oplossing

$I_T = 200\ mA$ en de totale weerstand is gelijk aan:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{68\ \Omega} + \frac{1}{33\Omega} + \frac{1}{22\ \Omega}} = 11{,}05\ \Omega$$

Het totaal vermogen is dan het snelst op volgende wijze te bepalen:

$$P_T = I_T^2\ \times R_T = (200\ mA)^2 \times 11{,}1\ \Omega = 442\ mW$$

Je kan het totaal vermogen ook bepalen door het vermogen per weerstand te bepalen en dan de vermogens op te tellen. De spanning over iedere paralleltak is dezelfde en gelijk aan de aangelegde spanning. Deze is te vinden via de wet van Ohm:

$$U_{bron} = I_T \times R_T = 200\ mA\ \times 11{,}05\ \Omega = 2{,}21 V$$

Vervolgens bepaal je per weerstand het gedissipeerde vermogen:

$$P_{R1} = \frac{U_{bron}^2}{R_1} = \frac{(2{,}21\ V)^2}{68\ \Omega} = 71{,}83\ mW$$

$$P_{R2} = \frac{U_{bron}^2}{R_2} = \frac{(2{,}21\ V)^2}{33\ \Omega} = 148\ mW$$

$$P_{R3} = \frac{U_{bron}^2}{R_3} = \frac{(2{,}21\ V)^2}{22\ \Omega} = 222\ mW$$

Door de drie gevonden vermogens nu samen te tellen bekom je eveneens het totale vermogen:

$$P_T =\ P_{R1} + P_{R2} + P_{R2} = 71{,}83\ mW + 148\ mW + 222\ mW = 441{,}83\ mW$$

Het klein verschil tussen de twee totaal vermogens is te wijten aan afrondingsfouten.

Voorbeeld 1-47

Een luidsprekerkast bestaat uit twee luidsprekers. Een om de hoge tonen weer te geven en een om de lage tonen weer te geven. Stel dat beide luidsprekers een impedantie van $8\ \Omega$ hebben en de versterker een maximale amplitude van $15\ V$ naar de luidsprekers stuurt, hoeveel vermogen moet de versterker dan hebben om dit signaal aan de luidsprekers te kunnen leveren.

Oplossing

De twee luidsprekers staan parallel aangesloten. Het maximaal vermogen dat moet geleverd worden aan elke luidspreker is gelijk aan :

$$P_{max} = \frac{U_{max}^2}{R} = \frac{(15\ V)^2}{8\ \Omega} = 28{,}125\ W$$

Aan iedere luidspreker moet dit vermogen geleverd worden zodat het totaal vermogen dat de versterker moet leveren gelijk is aan :

$$P_T = P_{\max(Luidspreker1)} + P_{\max(Luidspreker2)}$$

$$P_T = 28{,}125\ W + 28{,}125\ W = 56,25\ W$$

1.4 Gemengde schakelingen

In elektronische systemen vind je dikwijls verschillende combinaties terug van serie- en parallelschakelingen. Zulke combinaties worden gemengde schakelingen genoemd. In dit hoofdstuk worden verschillende voorbeelden van dergelijke serie-en parallelcombinaties besproken en geanalyseerd. Een belangrijke schakeling is de brug van Wheatstone. Deze weerstandsbrug vind je terug in verschillende meetsystemen. Je leert eveneens hoe je complexe schakelingen kan vereenvoudigen met behulp van het theorema van Thevenin en het theorema van Norton. De maximale vermogensoverdrachtstelling wordt gebruikt in toepassingen waarbij het belangrijk is om voor een gegeven belasting het maximaal vermogen te voorzien. Via superpositie analyseren we schakelingen met meer dan één spanningsbron. Tenslotte wordt besproken hoe je fouten kan oplossen voor kortgesloten en open gemengde schakelingen.

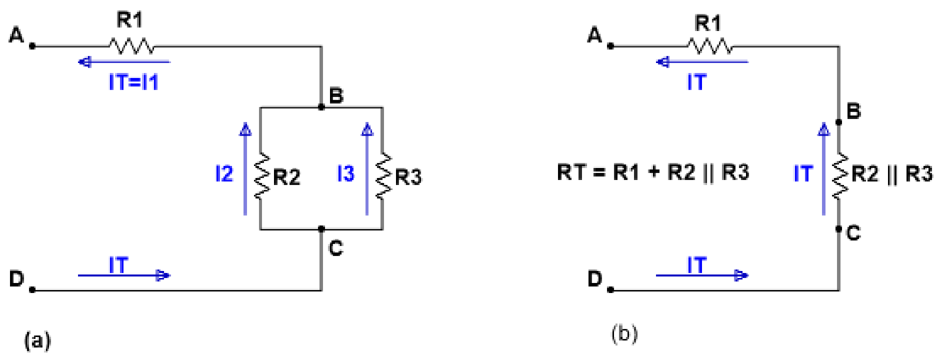
Wat is belangrijk?

- **Je herkent hoe iedere weerstand in een schakeling is geschakeld (in serie op in parallel) ten opzichte van andere weerstanden**
- **Je berekent de totale vervangingsweerstand van een gemengde schakeling.**
- **Je berekent alle stromen in een gemengde schakeling.**
- **Je berekent alle spanningen in een gemengde schakeling.**
- **Je bepaalt het effect van een resistieve belasting op een spanningsdelerschakeling.**
- **Je berekent de “bleeder”-stroom in een spanningsdeler.**
- **Je verklaart waarom een voltmeter het circuit kan belasten**
- **Je bepaalt wanneer een brug gebalanceerd is.**
- **Je bepaalt wanneer een brug ongebalanceerd is.**
- **Je bepaalt de weerstandswaarde van een onbekende weerstand met de brug van Wheatstone.**
- **Je verklaart hoe je een meting kan verrichten met een ongebalanceerde brug.**

1.4.1 Identificeren van serie-parallel relaties

Een gemengde schakeling bestaat uit een combinatie van serie- en parallelstroompaden. Het is belangrijk dat je kan identificeren dat een bepaalde component in een schakeling in serie of in parallel is geplaatst.

Figuur 1-15 geeft een voorbeeld weer van een eenvoudige gemengde schakeling.



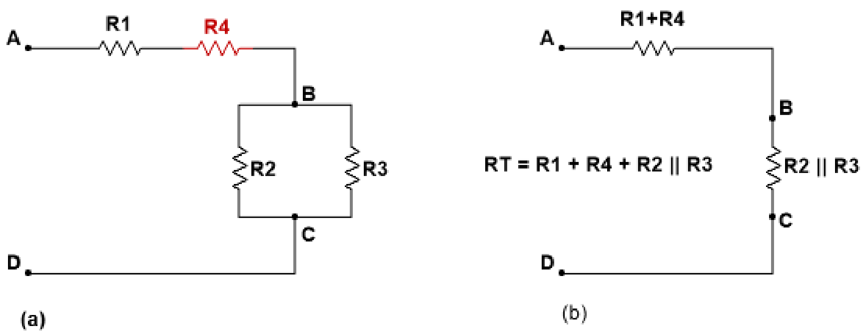
Figuur 1-15 : eenvoudige gemengde schakeling

Tussen de punten B en C staan de weerstanden R_2 en R_3 in parallel. De vervangingsweerstand vna de parallelschakeling kan weergegeven worden als R_2 R_3 (zoals besproken in hoofdstuk 5). De totale vervangingsweerstand van de gemengde schakeling is bijgevolg gelijk aan de serieschakeing van deze parallelweerstand met de weerstand R_1. In formulevorm:

$$R_T = R_1 + R_2 \,||R_3$$

Als de punten A en D verbonden zijn met een spanningsbron dan vloeit er een stroom I_T tussen de punten D en C. Eens de stroom door het knooppunt C vloeit, splitst deze stroom zich op in de stromen I_2 en I_3. I_2 vloeit door R_2 en I_3 door R_3. In het knooppunt B komen beide stromen terug samen en vormen ze terug de totale stroom I_T. Deze totale stroom vloeit door R_1 verder naar de bron. Vermits I_T door R_1 vloeit, kan je schrijven dat de stroom I_1 gelijk is aan I_T.

Figuur 1-16 toont een ander voorbeeld van een gemengde schakeling. Het verschil met figuur 6-1 is dat er nu twee weerstanden in serie staan.

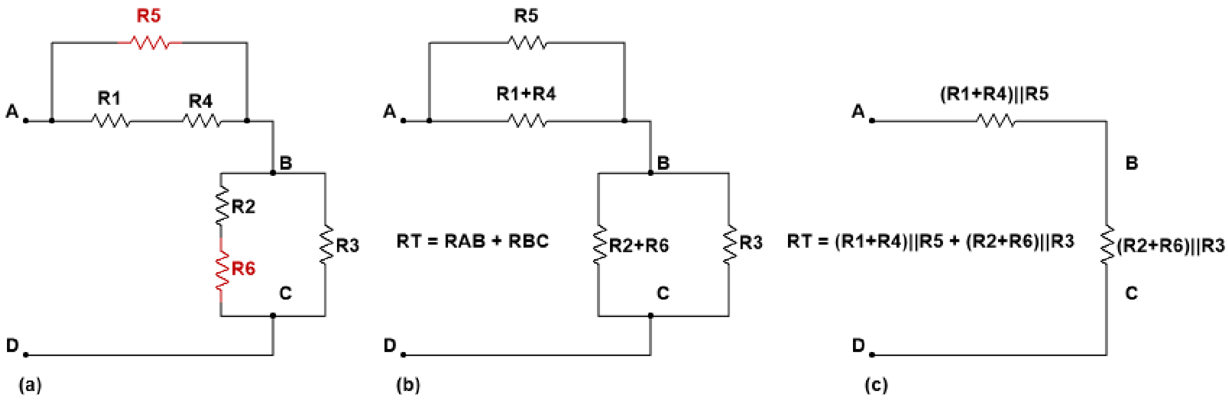


Figuur 1-16 : voorbeeld van een gemengde schakeling (2 weerstanden in serie gevolgd door een parallelschakeling van 2 weerstanden)

De vervangingsweerstand R_{AB} tussen de punten A en B is gelijk aan de vervangingsweerstand van de serieschakeling gevormd door de weerstanden R_1 en R_4. Deze stellen we voor als $R1 + R2$. De vervangingsweerstand R_{BC} tussen de punten B en C is gelijk aan de vervangingsweerstand van de parallelschakeling tussen R_2 en R_3. Deze stellen we voor als R_2 "||" R_3. De totale vervangings-weerstand tussen de punten A en B is gelijk aan de som van de vervangingsweerstand tussen de punten A en B met de vervangingsweerstand tussen de punten B en C. In formulevorm :

$$R_T = R_{AB} + R_{BC} = R_1 + R_4 + R_2 \,||\, R_3$$

Figuur 1-17 toont een meer geavanceerde parallelschakeling. De weerstand R_5 staat parallel met de serieschakelng van de weerstanden R_1 en R_4. Tussen de punten B en C zijn er twee parallel-takken. De eerste paralleltak bestaat uit de serieschakeling van de weerstanden R_2 en R_6. De tweede paralleltak bestaat uit de weerstand R_3.



Figuur 1-17 : bepalen van de totale vervangingsweerstand van een gemengde schakeling

Ook hier bestaat der totale vervangingsweerstand uit de serieschakeling van de vervangingsweer-stand R_{AB}, gelegen tussen de punten A en B, met de vervangingsweerstand R_{BC}, gelegen tussen de punten B en C. De vervangingsweerstand R_{AB} bestaat uit de serieschakeling van de weerstan-den R_1 en R_4 die samen parallel geschakeld zijn met R_5. In formulevorm:

$$R_{AB} = (R_1 + R_4) \,||\, R_5$$

De vervangingsweerstand R_{BC} bestaat uit de serieschakeling tussen R_2 met R_6 die samen parallel geschakeld zijn met R_3. In formulevorm:

$$R_{BC} = (R_2 + R_6) \,||\, R_3$$

De totale vervangingsweerstand van de schakeling is bijgevolg gelijk aan:

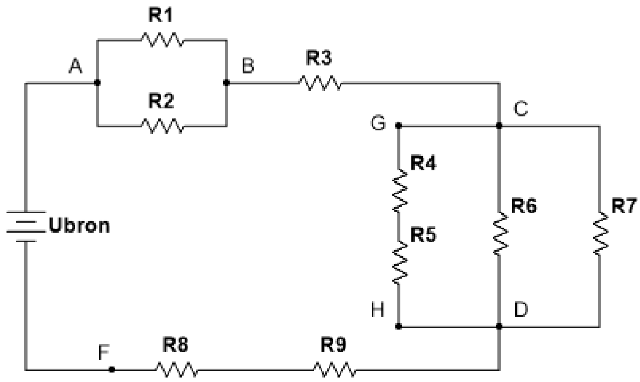
$$R_T = R_{AB} + R_{BC} = [(R_1 + R_4) \,||\, R_5] + [(R_2 + \text{R\_6}) \,||\, R_3]$$

Voorbeeld 1-48

Identificeer de serie- en parallelrelaties in de schakeling van figuur 1-vb43

Oplossing

- Tussen de punten A en B staat er een parallelschakeling van R_1 met R_2. Deze weer-stand is gelijk aan : $R_{AB} = R_1 \,||\, R_2$.
- Tussen de punten B en C staat de weerstand R_3 : $R_{BC} = R_3$



Figuur 1-vb43

- Tussen de punten G en H staat een serieschakeling van R_4 met R_5 : $R_{GH} = R_4 + R_5$.
- Tussen de punten C en D staat een parallelschakeling van de weerstanden R_{GH}, R_6 en R_7. We vinden bijgevolg tussen deze punten:
  $R_{CD} = R_{GH} || \, R_6 \, || \, R_7 = (R_4 + R_5) || \, R_6 \, || \, R_7$
- Tussen de punten F en C staan twee weerstanden in serie ; $R_{FC} = R_8 + R_9$
- DeStel de totale weerstand van de schakeling gelijk aan R_T. Deze bestaat uit de serieschakeling van de weerstanden $R_{AB},\ R_{BC}, R_{CD}$ en R_{FC}. In formulevorm :
-

$$R_T = R_{AB} + R_{BC} + R_{CD} + R_{FD}$$

$$R_T = [R_1 \, || \, R_2] + \ R_3 + [(R_4 + R_5) \, || \, R_6 \, || \, R_7] + \ \llbracket [R] \rrbracket_8 + R_9]$$

De totale stroom vloeit door de weerstanden R_3, R_8 en R_9. Als de totale stroom aan het knooppunt D toekomt, splitst deze zich in drie paralleltakstromen. Een paralleltakstroom stroomt door R_7, een tweede paralleltakstroom stroomt door R_6 en een derde paralleltakstroom stroomt door de serieschakeling van R_4 met R_5. In het punt C komen de drie deeltakstromen terug samen en vormen opnieuw de totale stroom. In knooppunt B splitst de totale stroom zich opnieuw op in een paralleltakstroom door R_1 en een paralleltakstroom door $\sqrt{R_2}$. In punt A komen ze terug samen en vormen ze terug de totale stroom die naar de spanningsbron verder stroomt.

1.4.2 Analyse van gemengde schakelingen

De analyse kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. Afhankelijk van welke informatie je nodig hebt of welke hoeveelheden van grootheden je kent in de schakeling, kies je voor een bepaalde analyse. De voorbeelden in deze paragraaf geven geen volledige dekking van de verschillende mogelijkheden maar ze geven je een goed beeld hoe je analyses aangaande gemengde schakelingen moet benaderen.

Om berekeningen aangaande gemengde schakelingen te kunnen maken heb je volgende kennis nodig:

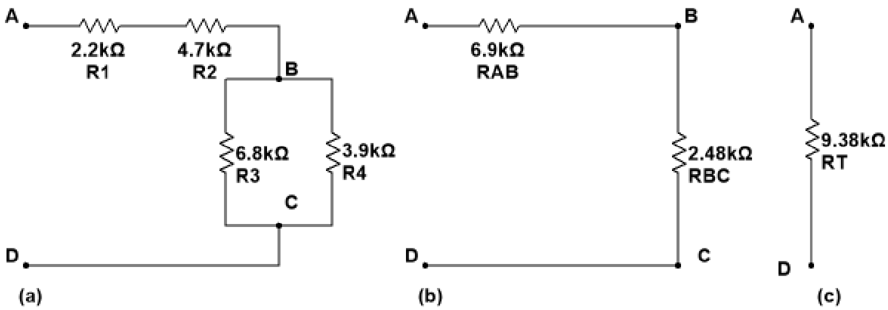
- De wet van Ohm.
- De twee wetten van Kirchhoff (spanningswet en stroomwet).
- De formule voor spanningsdeling.

- De formule voor stroomdeling.

Met bovenstaande formules ben je voldoende bewapend om zeer vel resistieve analyseproblemen aangaande gemengde schakelingen op te lossen.

Voorbeeld 1-49

Bepaal de totale weerstand van de schakeling in figuur 1-vb44 (a)



Figuur 1-vb44

Oplossing

De totale vervangingsweerstand van de schakeling van figuur 1-vb44 is de weerstand die je zou meten tussen de punten A en D. Deze weerstand bestaat uit vervangingsweerstand R_{AB} van de serieschakeling tussen de punten A en D. En de vervangingsweerstand R_{BC} van de parallelschakeling tussen de punten B en C. In formulevorm:

$$R_T = R_{AB} + R_{BC}$$

De weerstand R_{AB} bestaat uit de serieschakeling van R_1 met R_2. Deze vervangingsweerstand bedraagt:

$$R_{AB} = R_1 + R_2 = 2{,}2\ k\Omega + 4{,}7\ k\Omega\ =\ 6{,}9\ k\Omega$$

De weerstand R_{BC} bestaat uit de parallelschakeling tussen de punten B en C. Deze vervangingsweerstand bedraagt:

$$R_{BC} = R_3\ ||\ R_4 = \frac{6{,}8\ k\Omega\ \times 3{,}9\ k\Omega}{6{,}8\ \ k\Omega + 3.9\ k\Omega} = 2{,}48\ k\Omega$$

De weerstanden R_{AB} en R_{BC} vormen samen een vereenvoudigde serieschakeling (zie figuur 1-vb44 (b) van de schakeling van figuur 6-6 (a). De totale vervangingsweerstand is nu te vinden door de vervangingsweerstand te bepalen van de vereenvoudigde schakeling in figuur 1-vb44 (b).

$$R_T = R_{AB} + R_{BC} = 6{,}9\ k\Omega + 2{,}48\ k\Omega = 9{,}38\ k\Omega$$

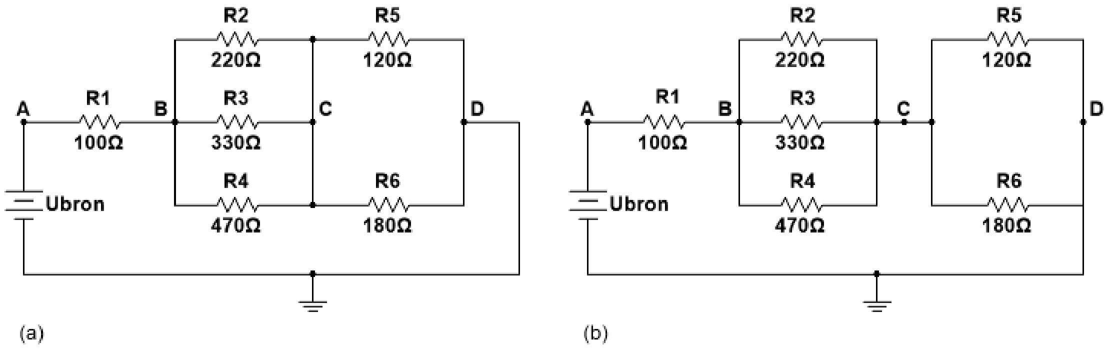
Dit is de totale vervangingsweerstand van de gemengde schakeling. De schakeling van figuur 6-6 (a) is uiteindelijk herleid tot de schakeling van figuur 1-vb44 (c).

1.4.2.1 De totale weerstand van een gemengde schakeling

In sectie leerde je de vervangingsweerstand van een serieschakeling te bepalen en in hoofdstuk vijf deze van een parallelschakeling. Om de totale weerstand te bepalen van een gemengde schakeling dien je vervangingsweerstanden te bepalen van deel serie- en parallelschakelingen in deze schakeling. Telkens je zo'n vervangingsweerstand hebt bepaald kan je de oorspronkelijke schakeling verder vereenvoudigen. Deze vereenvoudigingsstrategie blijf je toepassen tot er één totale vervangingsweerstand overblijft. Via een aantal rekenvoorbeelden zullen we nu een aantal totale vervangingsweerstanden van gemengde schakelingen bepalen.

Voorbeeld 1-50

Bepaal de totale weerstand van de schakeling in figuur 1-vb45(a)



Figuur 1-vb45

Oplossing

De gemengde schakeling van figuur 1-vb45 (a) toont een weerstand R_1 die in serie staat met twee parallelschakelingen. Om deze parallelschakelingen beter te kunnen waarnemen is de schakeling hertekend in figuur 1-vb45 (b). Hierin zijn de twee parallelschakelingen duidelijk te herkennen.
Om de totale vervangingsweerstand te bepalen rekenen we eerst de vervangingsweerstand van beide parallelschakelingen uit.
Voor de parallelschakeling tussen de punten B en C is de vervangingsweerstand R_{BC} gelijk aan:

$$R_{BC} = R_2 \,||\, R_3 \,||\, R_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{1/R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{220\ \Omega} + \frac{1}{330\ \Omega} + \frac{1}{470\ \Omega}} = 103\ \Omega$$

Op dezelfde wijze kan de vervangingsweerstand R_{CD} tussen de punten C en D bepaald worden:

$$R_{CD} = R_5 \,||\, R_6 = \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}} = \frac{1}{\frac{1}{120\ \Omega} + \frac{1}{180\ \Omega}} = 72$$

De totale vervangingsweerstand R_T van de gemengde schakeling is bijgevolg gelijk aan de som van de weerstandswaarden van de serieschakeling bestaande uit R_1, R_{BC} en R_{CD} :

$$R_T = R_1 + R_{BC} + R_{CD} = 100\ \Omega + 103\ \Omega + 72\ \Omega = 275\ \Omega$$

1.4.2.2 De stromen doorheen een gemengde schakeling

Van zodra je de totale weerstand kent en de aangelegde spanning kan je via de wet van Ohm de totale stroom berekenen. Beschouw de gemengde schakeling van figuur 1-vb45 (a) uit het voorbeeld 1-50. Stel dat de aangelegde bronspanning gelijk is aan $20\,V$ dan kan je de totale stroom I_T door de schakeling als volgt bepalen:

$$I_T = \frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{20\ V}{275\ \Omega} = 72{,}72\ mA$$

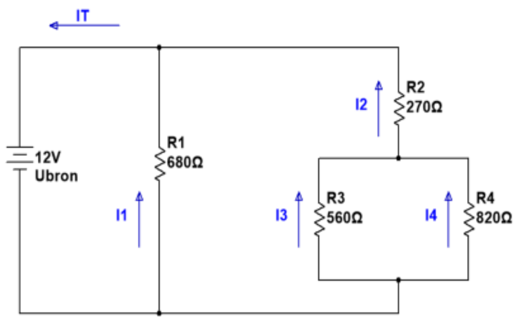
Over het algemeen kan je de stromen die in een gemengde schakeling vloeien bepalen aan de hand van volgende formules:

- De wet van Ohm.
- De formule van de stroomdeler.
- De stroomwet van Kirchhoff.

Via voorbeeld 1-51 wordt getoond hoe je stromen in een gemengde schakeling kan berekenen.

Voorbeeld 1-51

Bepaal de stromen door de vier weerstanden van figuur 1-vb46.



Figuur 1-vb46

Oplossing

Eerst bepalen we de stroom I_1 door de weerstand R_1. Deze is met de wet van Ohm te vinden:

$$I_1 = \frac{U_{bron}}{R_1} = \frac{12\ V}{680\ \Omega} = 17{,}6\ mA$$

Vervolgens proberen we de stroom door R_2 te bepalen. Hiervoor moeten we eerst de totale weerstand R_T van de ganse tak kennen. Deze is als volgt te vinden:

$$R_T = R_2 + R_3||R_4$$

$$R_T = 270\ \Omega + \frac{560\ \Omega\ \times 820\ \Omega}{560\ \Omega + 820\ \Omega} = 270\ \Omega + 332{,}8 = 602{,}8\ \Omega$$

De totale stroom I_2 door deze tak (eveneens de stroom door R_2) is via de wet van Ohm:

$$I_2 = \frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{12\ V}{602{,}8\ \Omega} = 19{,}9\ mA$$

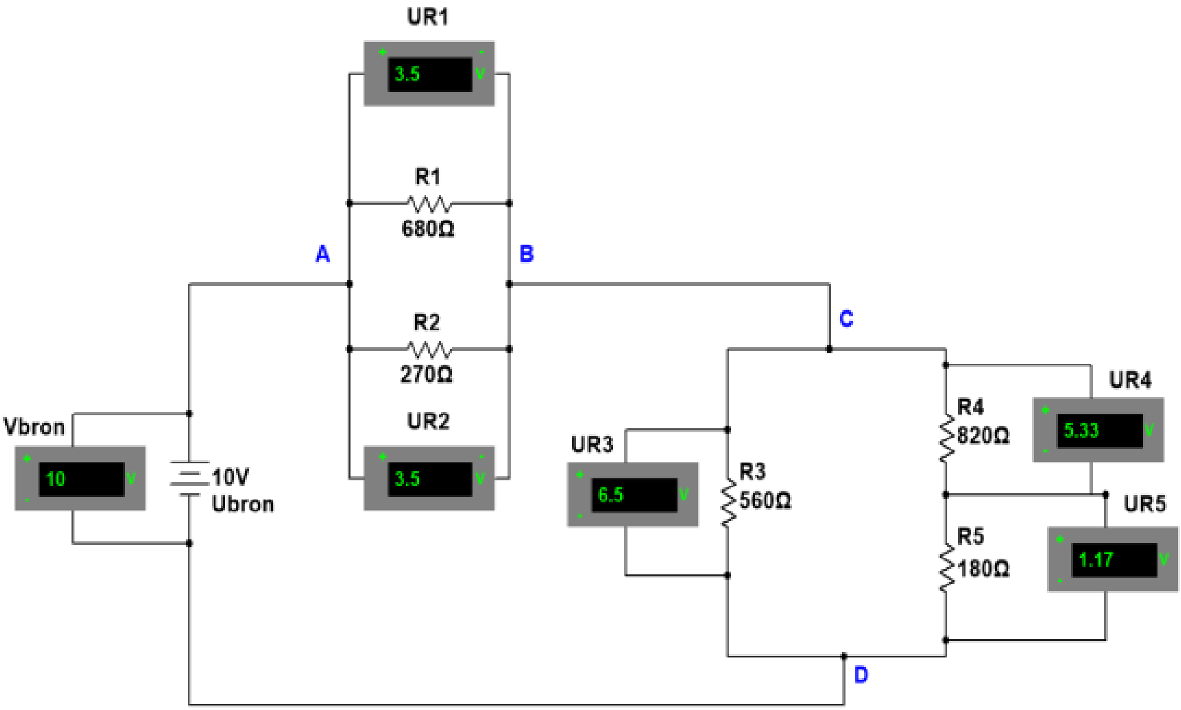
De stromen I_3 en I_4 zijn vervolgens met de stroomdelerformule te vinden en $R_2||R_3 = 332{,}8\ \Omega$:

$$I_3 = \frac{R_4||R_3}{R_3} \times I_2 = \frac{332{,}8\ \Omega}{560\ \Omega} \times 19{,}9\ mA = 11{,}8\ mA$$

$$I_4 = \frac{R_4||R_3}{R_4} \times I_2 = \frac{332{,}8\ \Omega}{820\ \Omega} \times 19{,}9\ mA = 8{,}1\ mA$$

1.4.2.3 De spanningsvallen in een gemengde schakeling

Beschouw de schakeling in figuur 1-18. De spanningsval U_{R1} over de weerstand R_1 en de spanningsval U_{R2} over de weerstand R_2 zijn gelijk vermits beide weerstanden in parallel staan.



Figuur 1-18 : overzicht van de spanningsrelaties in een gemengde schakeling

Om dezelfde reden kan je zeggen dat de spanningsval V_{R3} over de weerstand R_3 dezelfde is als de som van de spanningsvallen U_{R4} en U_{R5} (over de weerstanden R_4 respectievelijk R_5). Immers de vervangingsweerstand van de parallelschakeling tussen de punten B en C is gelijk aan R_3 "||"$(R\_4 + R\_5)$ waardoor:

$$U_{R3} = U_{R4} + U_{R5}$$

Of :

$$6{,}5\ V = 5{,}33\ V + 1{,}17\ V$$

Uit de figuur 1-18 is ook af te leiden dat U_{R5} ongeveer $0{,}22\ U_{R4}$ is. Dit komt omdat R_5 evenzeer $0{,}22\ R_4$ is. Volgens de spanningswet van Kirchhoff is de som der deelspanningen gelijk aan de aangelegde spanning. In de schakeling van figuur 1-18 zie je dat de som van de spanning tussen de punten A en B en de spanning tussen de punten van C en D gelijk is aan de bronspanning. In formulevorm:

$$U_{bron} = U_{AB} + U_{CD}$$

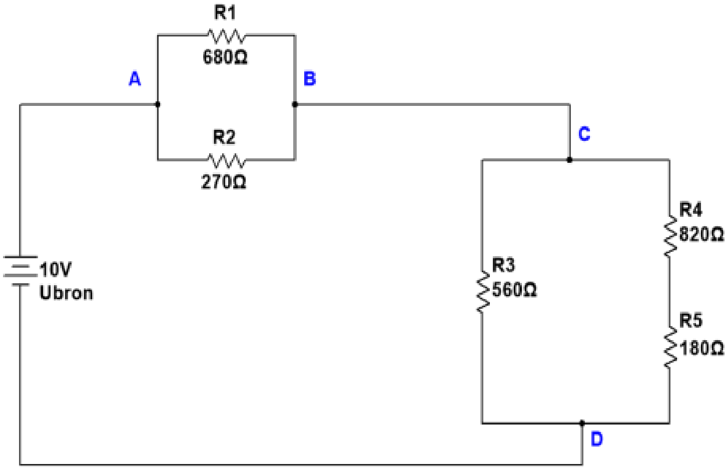
Of :

$$10\ V = 3{,}5\ V + 6{,}5\ V$$

Voorbeeld 1-51 toont je hoe je de spanningsvallen kan bepalen in een gemengde schakeling.

Voorbeeld 1-51

Bepaal de spanningsvallen in onderstaande schakeling van figuur 1-vb47



Figuur 1-vb47

Oplossing

De schakeling bestaat uit een serieschakeling van de parallelschakeling tussen de punten A en B met de parallelschakeling tussen de punten C en D. Door de totale weerstand van beide parallelschakelingen uit te rekenen en vervolgens de spanningsdelerformule te gebruiken vind je de spanningsvallen over deze parallelketens. Eerst wordt de totale weerstand R_{AB} van de paralelschakeling tussen de punten A en B bepaald:

$$R_{AB} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{680\Omega \times 270\Omega}{680\Omega + 270\Omega} = 193{,}3\ \Omega$$

De totale weerstand R_{CD} van de parallelschakeling tussen punten C en D :

$$R_{CD} = \frac{R_3 \times (R_4 + R_5)}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{560\Omega \times (820 + 180\Omega)}{560\Omega + 820\Omega + 180\Omega} = 359\ \Omega$$

Via de spanningsdelerformule vinden we de spanningen over beide parallelschakelingen. De spanning over R_{AB}:

$$U_{RAB} = \frac{R_{AB}}{R_{AB} + R_{CD}} \times U_{bron} = \frac{193{,}3\ \Omega}{193{,}3\ \Omega + 359\ \Omega} \times 10\ V = 3{,}5\ V$$

Deze spanning staat over de parallelschakeling van R_1 met R_2. Dit betekent dat beide spanningsvallen gelijk aan elkaar zijn of :

$$U_{RAB} = U_{R1} = U_{R2} = 3{,}5\ V$$

De spanning over de tweede parallelschakeling is op analoge manier te vinden:

$$U_{RCD} = \frac{R_{CD}}{R_{AB} + R_{CD}} \times U_{bron} = \frac{359\ \Omega}{193{,}3\ \Omega + 359\ \Omega} \times 10\ V = 6{,}5\ V$$

Deze spanning is eveneens de spanning over R_3 en de som van de spannigsvallen over R_4 en R_5:

$$U_{RCD} = U_{R3} = U_{R4} + U_{R5} = 6{,}5\ V$$

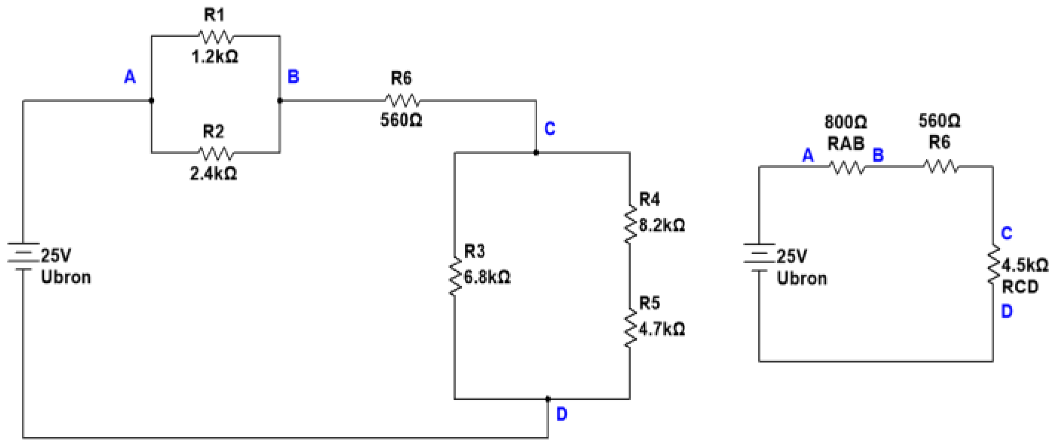
De spanningen over R_4 en R_5 zijn eveneens met de formule van de spanningsdeler te vinden:

$$U_{R4} = \frac{R_4}{R_4 + R_5} \times U_{RCD} = \frac{820\Omega}{820\Omega + 180\Omega} \times 6{,}5\ V = 5{,}33\ V$$

$$U_{R5} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \times U_{RCD} = \frac{180\Omega}{820\Omega + 180\Omega} \times 6{,}5\ V = 1{,}17\ V$$

Voorbeeld 1-52

Bepaal de spanningsvallen in onderstaande schakeling van figuur 1-vb48 (a).



(a) (b)

Figuur 1-vb48

Oplossing

De schakeling kan herleid worden naar een serieschakeling van drie weerstanden zoals te zien is in figuur 1-vb48 (b). R_{AB} en R_{CD} zijn de vervangingsweerstanden van de parallelschakelingen tussen de punten A en B en C en D van figuur 1-vb48 (a). Via de spanningsdelerformule kan je dan de spanningen over deze drie weerstanden bepalen.

$$R_{AB} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1{,}2\ k\Omega \times 2{,}4\ k\Omega}{1{,}2\ k\Omega + 2{,}4\ k\Omega} = 800\ \Omega$$

$$R_{CD} = \frac{R_3 \times (R_4 + R_5)}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{6{,}8\ k\Omega \times (8{,}2\ k\Omega\ + 4{,}7\ k\Omega)}{6{,}8\ k\Omega + 8{,}2\ k\Omega\ + 4{,}7\ k\Omega} = 4{,}5\ k\Omega$$

Toepassen van de spanningsdelerformule :

$$U_{RAB} = \frac{R_{AB}}{R_{AB} + R_6 +\ R_{CD}} \times U_{bron} = \frac{800\ \Omega}{800\ \Omega +\ 560\ \Omega + 4{,}5\ k\Omega} \times 25\ V = 3{,}4\ V$$

$$U_{R6} = \frac{R_6}{R_{AB} + R_6 +\ R_{CD}} \times U_{bron} = \frac{560\Omega}{800\ \Omega +\ 560\ \Omega + 4{,}5\ k\Omega} \times 25\ V = 2{,}4\ V$$

$$U_{RCD} = \frac{R_{CD}}{R_{AB} + R_6 +\ R_{CD}} \times U_{bron} = \frac{4{,}5\ k\Omega}{800\ \Omega +\ 560\ \Omega + 4{,}5\ k\Omega} \times 25\ V = 19{,}2$$

Verder is :

$$U_{RAB} = U_{R1} = U_{R2} = 3{,}4\ V$$

En

$$U_{RCD} = U_{R3} = U_{R4} + U_{R5} = 19{,}2\ V$$

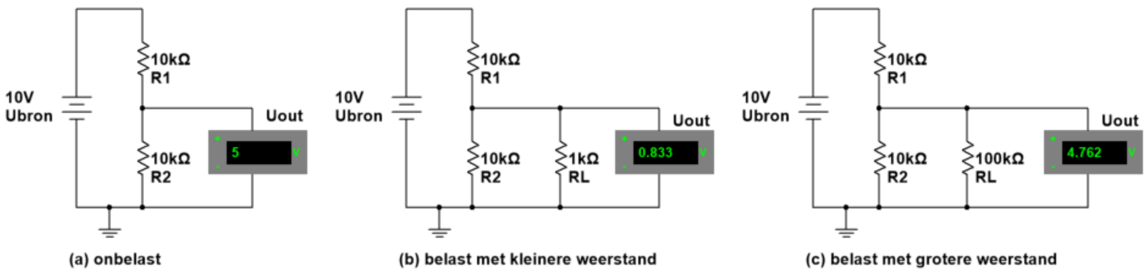
De spanningen over R_4 en R_5 zijn eveneens met de formule van de spanningsdeler te vinden:

$$U_{R4} = \frac{R_4}{R_4 + R_5} \times U_{RCD} = \frac{8{,}2\ k\Omega}{8{,}2\ k\Omega + 4{,}7\ k\Omega} \times 19{,}2\ V = 12{,}2\ V$$

$$U_{R5} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \times U_{RCD} = \frac{4{,}7\ k\Omega}{8{,}2\ k\Omega + 4{,}7\ k\Omega} \times 19{,}2\ V = 7\ V$$

1.4.3 Spanningsdelers met resistieve belasting

Bij de serieschakeling is het begrip spanningsdeler besproken. Tot nu toe hebben we een spanningsdeler steeds onbelast beschouwd. Hier bekijken we wat het effect is als een spanningsdeler resistief wordt belast.



Figuur 1-19: invloed van een belasting (R_L) op een spanningsdeler

In figuur 1-19 is een spanningsdeler weergegeven. Deze bestaat uit de weerstanden R_1 en R_2. De verlaagde spanning als gevolg van de spanningsdeling wordt over de weerstand R_2 afgetakt. Als beide weerstanden gelijk zijn, zoals in figuur 1-19 (a) is te zien, verdeelt de spanning zich in twee gelijke delen over de weerstanden R_1 en R_2. De uitgangsspanning U_{out}, gelijk aan de spanning over R_2, is als volgt te bepalen:

$$U_{out} = U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{bron} = \frac{10\ k\Omega}{10\ k\Omega + 10\ k\Omega} \times 10\ V = 5\ V$$

Deze U_{R2} is in ons voorbeeld eveneens de uitgangsspanning.
Wat gebeurt er als we deze spanningsdeler zouden belasten met een weerstand? Stel dat we de spanningsdeler zouden gebruiken om een spanning van $5\ V$ te plaatsen over een weerstand van $1\ k\Omega$. Deze weerstand van $1\ k\Omega$ vormt een belasting (loading) op de spanningsdeler. Dit is weergegeven in figuur 1-19 (b). Vermits de $1\ k\Omega$-weerstand de spannigsdelerschakeling gaat belasten noemen we deze weerstand R_{Load} of simpelweg R_L. Door het feit dat we R_L parallel plaatsen op R_2 wordt de totale weerstandswaarde op die positie kleiner dan de kleinste weerstandswaarde van de gevormde parallelschakeling. Dit betekent dat de weerstandswaarde verlaagt tot volgende waarde;

$$R_{R2||RL} = \frac{R_2 \times R_L}{R_2 + R_L} = \frac{10\ k\Omega\ \times 1\ k\Omega}{10\ k\Omega + 1\ k\Omega} = 909\ \Omega$$

Het gevolg hiervan is dat de spanningsdeler nu wordt gevormd door R_1 in serie met $R_{R2||RL}$. Deze weerstanden zijn nu niet meer gelijk waardoor de uitgangsspanning verschillend van $5\ V$ zal worden. De uitgangsspanning in deze situatie kan als volgt worden bepaald:

$$U_{out} = \frac{R_{R2||RL}}{R_1 + R_{R2||RL}} \times U_{bron} = \frac{909\ \Omega}{10\ k\Omega + 909\ \Omega} \times 10\ V = 0{,}833\ V$$

De uitgangsspanning is door het plaatsen van de belastingsweerstand R_L van $1\ k\Omega$ gedaald van $5\ V$ naar 0,833 V. Een bijkomend effect van deze weerstand R_L is dat er meer stroom uit de spanningsbron wordt getrokken omdat de totale weerstand is verlaagd ten gevolge van de parallelschakeling van R_2 met R_L.
Wat gebeurt er als we de spanningsdeler zouden belasten met een weerstandswaarde van $100\ k\Omega$? Deze situatie doet zich voor in figuur 1-19 (c). Vermits R_L in deze situatie veel groter is dan R_2 zal

de vervangingsweerstand $R_{R2||RL}$ iets kleiner zijn dan R_2. De vervangingsweerstand is in dit geval gelijk aan :

$$R_{R2||RL} = \frac{R_2 \times R_L}{R_2 + R_L} = \frac{10\ k\Omega\ \times 100\ k\Omega}{10\ k\Omega + 100\ k\Omega} = 9{,}09\ k\Omega$$

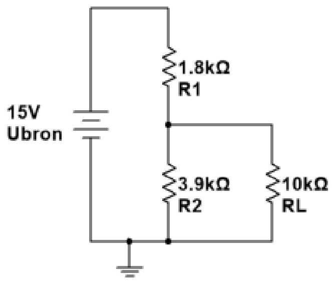
De uitgangsspanning in deze situatie is gelijk aan:

$$U_{out} = \frac{R_{R1||RL}}{R_1 + R_{R2||RL}} \times U_{bron} = \frac{9{,}09\ \Omega}{10\ k\Omega + 9{,}09\ \Omega} \times 10\ V = 4{,}762\ V$$

Je kan hieruit besluiten dat als R_L veel groter is dan R_2 er een klein effect optreedt. De uitgangsspanning daalt lichtjes en in veel situaties is de spanningsdelerschakeling dan bruikbaar om een bepaalde lagere spanningswaarde te bekomen. Als de belastingsweerstand minstens tien groter is dan de weerstanden die gebruikt worden in de spanningsdeler bekomt men een stabiele schakeling. Ook nu zal er meer stroom vloeien door het plaatsen van de belastingsweerstand, doch minder dan in de situatie wanneer R_L kleiner is dan R_2.

Voorbeeld 1-53

Bepaal de onbelaste en belaste uitgangsspanning van de schakeling in figuur 1-vb49.



Figuur 1-vb49

Oplossing

De onbelaste uitgangsspanning U_{out} is de spanning over R_2 wanneer R_L nog niet is aangesloten. Via de spanningsdelerformule kan je deze bepalen:

$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 15\ V = \frac{3{,}9\ k\Omega}{1{,}8\ k\Omega +\ 3{,}9\ k\Omega} \times 15\ V = 10{,}2\ V$$

De belaste uitgangsspanning is de spanning over R_2 (en over R_L) wanneer de belasting R_L is aangesloten. Om deze te vinden bepaal je eerst de parallelweerstand $R_{R2||RL}$:

$$R_{R2||RL} = \frac{R_2 \times R_L}{R_2 + R_L} = \frac{3{,}9\ k\Omega\ \times 10\ k\Omega}{3{,}9\ k\Omega + 10\ k\Omega} = 2{,}81\ k\Omega$$

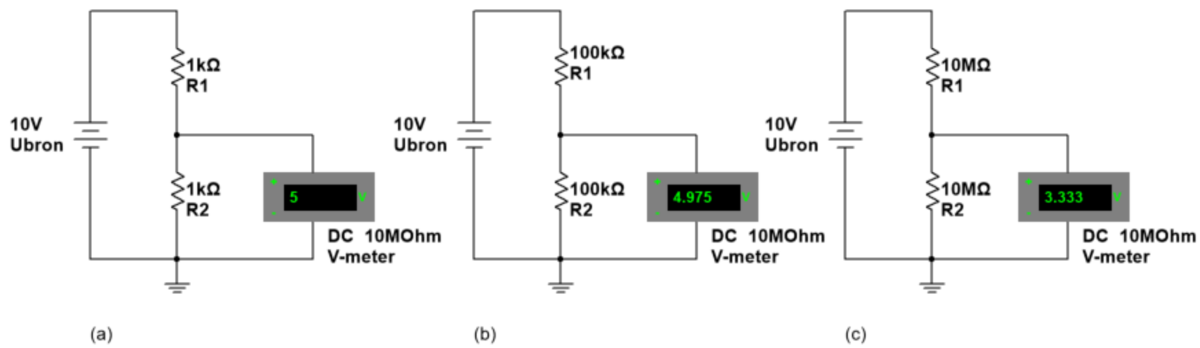
De belaste spanning U_{out} is de spanning over R_2 (of R_L) met R_L aangesloten:

$$U_{out} = \frac{R_{R2||RL}}{R_1 + R_{R2||RL}} \times 15\ V = \frac{2{,}81\ k\Omega}{1{,}8\ k\Omega +\ 2{,}81\ k\Omega} \times 15\ V = 9{,}14\ V$$

1.4.4 Belastingseffect van een voltmeter

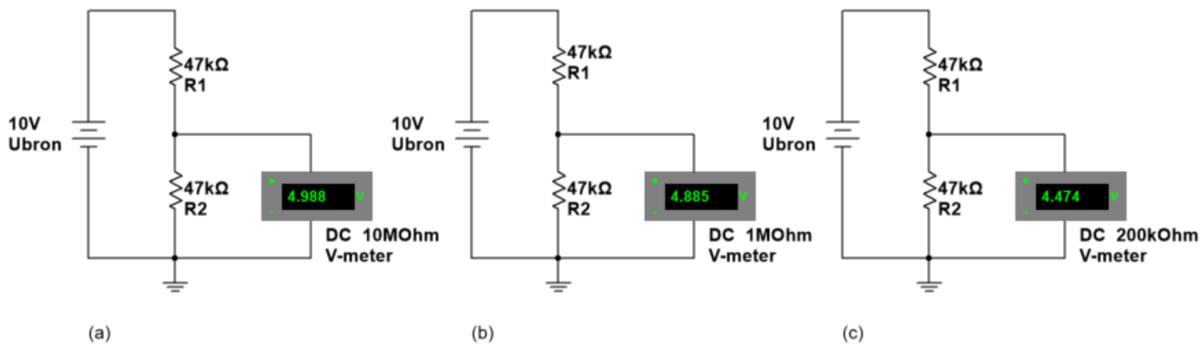
Van zodra je in een schakeling spanning meet met een voltmeter verschijnt zijn inwendige weerstand parallel op de weerstand waarover spanning wordt gemeten. Als de inwendige weerstand van de voltmeter heel wat groter is dan de weerstand waarover de spanning wordt gemeten, beïnvloedt de voltmeter de schakeling maar weinig en is de afwijking van meting klein. Is echter de inwendige weerstand van de voltmeter gelijk aan de weerstand in de schakeling waarover de spanning wordt gemeten, dan ontstaat er een grote afwijking van de gemeten spanningswaarde ten opzichte van de werkelijke spanningswaarde. Een typische digitale voltmeter in draagbare multimeters heeft een inwendige weerstand van $10\ M\Omega$. Een typische analoge voltmeter heeft een inwendige weerstand die afhankelijk is van het schaalbereik. Deze is bedraagt meestal zo'n $20000\frac{\Omega}{V}$. Dit levert een inwendige weerstand van $20000\,\Omega$ op de $1\,V$ -schaal en $2000000\,\Omega$ op de $10\,V$-schaal.

Figuur 1-20 geeft je een idee wat de invloed is van een typische digitale voltmeter op een aantal spanningsmetingen. In de figuur zijn drie schakelingen te zien met telkens twee dezelfde weerstanden. In de figuur 1-20 (a) zijn de weerstanden gelijk aan $1\ k\Omega$. In figuur 1-20 (b) zijn de weerstanden $100\ k\Omega$ en in figuur 1-20 (c) $10\ M\Omega$. Telkens wordt de spanning over de onderste weerstand gemeten met een voltmeter met inwendige weerstand $10\ M\Omega$. ($DC\ 10\ MOhm$ bij de voltmeters in figuur 1-20 slaat op een inwendige weerstand op DC van $10\ M\Omega$). Door het feit dat de inwendige weerstand telkens een parallelschakeling vormt met R_2 is het niet moeilijk om in te zien dat hoe groter R_2 is, hoe groter de afwijking wordt in het meetresultaat (zie hiervoor de spanningsdeler met resistieve belasting).



Figuur 1-20 : hoe hoger de weerstand waarover spanning wordt gemeten, hoe onnauwkeuriger het meetresultaat

In figuur 1-21 is weergegeven wat het effect is van de inwendige weerstand van de voltmeter op het meetresultaat. Telkens is bij een schakeling met twee gelijke weerstanden een voltmeter aangelegd met verschillende inwendige weerstanden.



Figuur 1-21: hoe lager de inwendige weerstand van de voltmeter, hoe onnauwkeuriger het meetresultaat

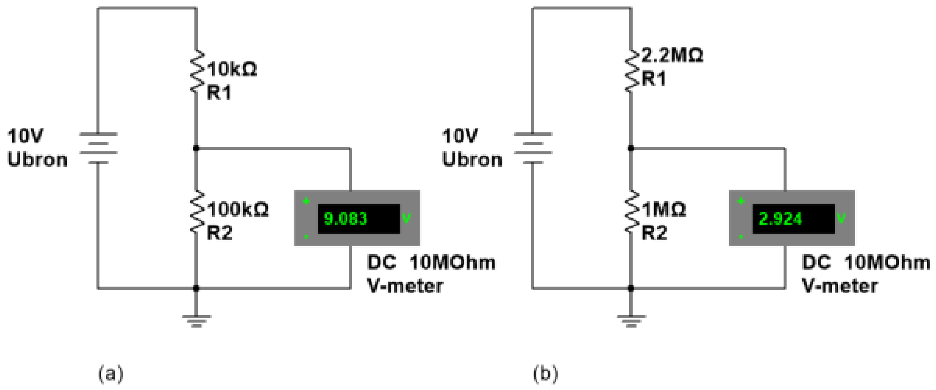
In de meetresultaten van de voltmeters in figuur 1-21 is duidelijk te zien dat hoe kleiner de inwendige weerstand van de voltmeter is, hoe onnauwkeuriger het meetresultaat is. Immers hoe lager de inwendige weerstand van de voltmeter is, hoe meer de vervangingsweerstand van de parallelschakeling $R_2 \,||\, R_{Vmeter}$ gaat afwijken van R_2 waardoor er minder spanning gemeten wordt.

Hieruit kan je besluiten dat als je gelijkspanning moet meten je best gebruik maakt van een digitale multimeter met een zo groot mogelijke inwendige weerstand voor spanningsmeting.

Voorbeeld 1-54 geeft weer hoe je de invloed van de voltmeter op de spanningsmeting kan berekenen.

Voorbeeld 1-54

Wat is de invloed van de digitale voltmeter in iedere schakeling van figuur 6-18? Stel dat de meter een inwendige weerstand heeft van $10\ M\Omega$.



Figuur 1-vb50

Oplossing

Eerst wordt de spanning bepaald zonder invloed van de voltmeter. Voor de schakeling van figuur 6-18 (a) wordt bekomen:

$$U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{bron} = \frac{100\ k\Omega}{10\ k\Omega + 100\ k\Omega} \times 10\ V = 9{,}091\ V$$

Voor de schakeling van figuur 6-18(b) wordt bekomen:

$$U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{bron} = \frac{1 M\Omega}{2{,}2\ M\Omega + 1\ M\Omega} \times 10\ V = 3{,}125\ V$$

Voor schakeling (a): Om de invloed te kunnen bepalen, bereken je eerst de totale parallelweertand uit van de parallelschakeling R_2 met de inwendige weerstand van de voltmeter $R_{V-meter}$.

$$R_{R2||RV-meter} = \frac{R_2 \times R_{V-meter}}{R_2 + R_{V-meter}} = \frac{100\ k\Omega\ \times 10\ M\Omega}{100\ k\Omega + 10\ M\Omega} = \ 99{,}01\ k\Omega$$

De spanningswaarde van U_{R2} wordt hierdoor:

$$U_{R2||\text{RV-meter}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{bron} = \frac{99{,}01 k\Omega}{10\ k\Omega + 99{,}01 k\Omega} \times 10\ V = 9{,}083\ V$$

De afwijking bedraagt dan :

$$\Delta U_{R2} = U_{R2} - U_{R2||\text{RV-meter}} = 9{,}091\ V - 9{,}083 = 0{,}008\ V$$

Dit betekent dat de voltmeter $0{,}008\ V$ te weinig meet in de schakeling van figuur 6-18(a).

Voor schakeling (b): De invloed van de voltmeter in de schakeling van figuur 6-18(b) kan op dezelfde manier gevonden worden:

$$R_{R2||RV-meter} = \frac{R_2 \times R_{V-meter}}{R_2 + R_{V-meter}} = \frac{1\ M\Omega\ \times 10\ M\Omega}{1\ M\Omega + 10\ M\Omega} = 909{,}09\ k\Omega$$

$$U_{R2||\text{RV-meter}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{bron} = \frac{909{,}09k\Omega}{2{,}2\ M + 909{,}01k\Omega} \times 10\ V = 2{,}924\ V$$

Voor de schakeling in figuur 6-18(b) bedraagt de afwijking:

$$\Delta U_{R2} = U_{R2} - U_{R2||\text{RV-meter}} = 3{,}125\ V - 2{,}924 = 0{,}201\ V$$

Dit betekent dat de voltmeter in deze schakeling 0,201 V te weinig meet ten opzichte van de werkelijke spanningswaarde.

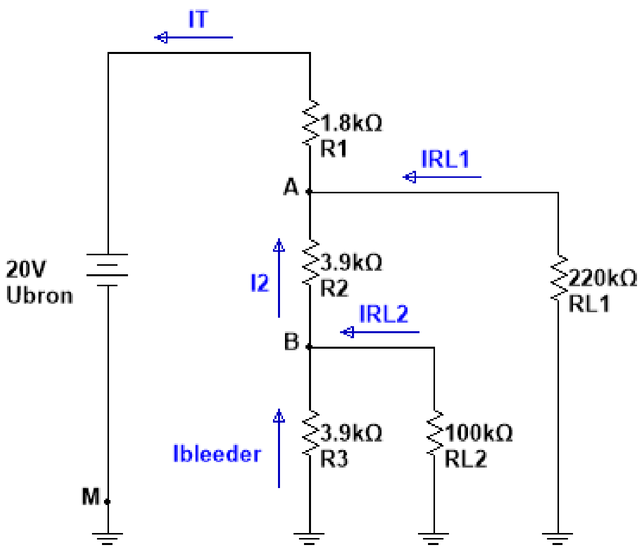
1.4.5 Belastingstroom en bleederstroom

Wanneer je te maken hebt met een spanningsdeler met meerdere aftakkingen bestaat de totale stroom die dan vloeit uit twee soorten stromen. Het eerste soort stroom wordt belastingsstroom genoemd en is de stroom die door een bepaalde aangesloten belasting vloeit. De andere soort stroom is de bleederstroom. De bleederstroom is de stroom die overblijft nadat alle belastingsstromen van de verschillende aftakkingen zijn afgetrokken van de totale stroom. In formulevorm:

$$I_{bleeder} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2} - \cdots - I_{RLn}$$

In figuur 1-22 is een voorbeeld weergegeven van een spanningsdeler waarbij twee aftakkingen zijn voorzien. De eerste aftakking is aanwezig in het punt A en hierop is de belasting R_{L1} op aangesloten. Het tweede aftakpunt is aanwezig in het punt B waaraan de belasting R_{L2} is aangesloten. Door de belastingen vloeien de belastingsstromen I_{RL1} respectievelijk I_{RL2}. De bleederstroom is de stroom die door de weerstand R_3 vloeit. In formulevorm:

$$\boldsymbol{I_{bleeder} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2}} \qquad (6-1)$$



Figuur 1-22 : de stromen in een spanningsdeler met twee aftakkingen

Voorbeeld 1-54

Bereken de belastingsstromen en de bleederstroom van de schakeling in figuur 1-vb51 (a)

Oplossing

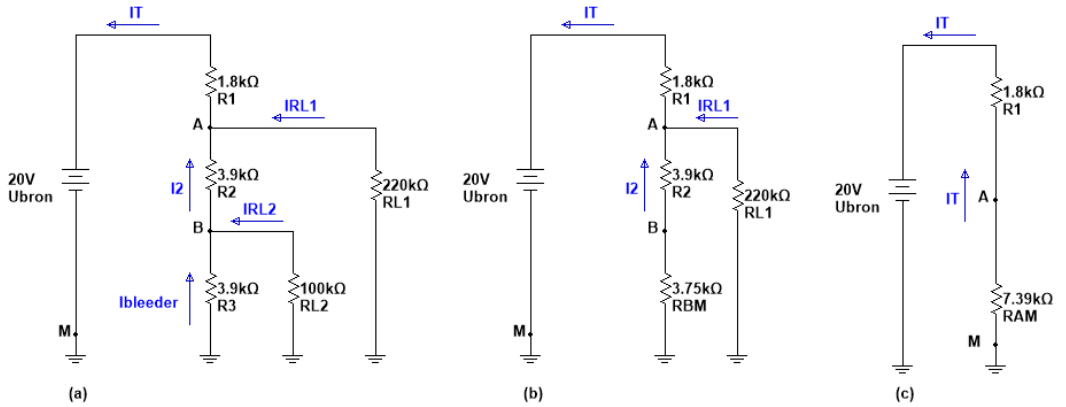
Om de stromen te kunnen berekenen moet je eerst de vervangingsweerstand R_{AM} tussen de punten A en de massa kennen. Vooraleer je die kan bepalen moet je de vervangingsweerstand R_{BM} tussen de punten B en de massa kennen. Eerst berekenen we R_{BM} :

$$R_{BM} = \frac{R_3 \times R_{L2}}{R_3 + R_{L2}} = \frac{3{,}9\ k\Omega\ \times 100\ k\Omega}{3{,}9\ k\Omega + 100\ k\Omega} = 3{,}75\ k\Omega$$

Als R_{BM} gevonden is kan je de figuur 1-160 (a) vereenvoudigen met de figuur 1-22 (b). Vervolgens bereken je R_{AM} aan de hand van figuur 1-22 (b).

$$R_{AM} = \{R_2 + (R_3||R_{L2})\}||R_{L1} = \{R_2 + R_{BM}\}||R_{L1}$$

$$R_{AM} = \frac{(R_2 + R_{BM})\ \times R_{L1}}{R_2 + R_{BM} + R_{L1}} = \frac{(3{,}9\ k\Omega + 3{,}75\ k\Omega) \times 220\ k\Omega}{3{,}9\ k\Omega + 3{,}75\ k\Omega + 220\ k\Omega} = 7{,}39\ k\Omega$$



Figuur 1-vb51

Nu je de vervangingsweerstand R_{AM} kent, kan je de schakeling verder vereenvoudigen tot de schakeling in figuur 1-160 (c). Va de spanningsdelerformule kan je nu de spanning over R_{AM} bepalen (zie hiervoor ook figuur 1-160 (c).

$$U_{RAM} = \frac{R_{AM}}{R_1 + R_{AM}} \times U_{bron} = \frac{7{,}39\ \ k\Omega}{1{,}8\ \ k\Omega +\ 7{,}39\ \ k\Omega} \times 20\ V = 16{,}08\ V$$

U_{AM} is de spanning die staat over R_{L1} en eveneens over de serieschakeling $R_1 + R_{BM}$. Dit betekent dat je via de wet van Ohm de stromen I_{RL1} en I_2 kan bepalen.

$$I_{RL1} = \frac{U_{AM}}{R_{L1}} = \frac{16{,}08\ V}{220\ k\Omega} = 73{,}09\ \mu A$$

$$I_2 = \frac{U_{AM}}{R_2 + R_{BM}} = \frac{16{,}08\ V}{3{,}9\ k\Omega + 3{,}75\ k\Omega} = 2{,}1\ mA$$

Via de stroomdelerformule kan je $I_{bleeder}$ en I_{RL2} bepalen. De totale stroom door de parallelschakeling tussen de punten B en massa M is gelijk aan I_2.

$$I_{bleeder} = \frac{R_{BM}}{R_3} \times I_2 = \frac{3.75\ k\Omega}{3.9\ k\Omega} \times 2.1\ mA = \ \ 2{,}02\ mA$$

$$I_{RL2} = \frac{R_{BM}}{R_{L2}} \times I_2 = \frac{3.75\ k\Omega}{100\ k\Omega} \times 2.1\ mA = \ \ 79\ \mu A\ mA$$

1.4.6 De brug van Wheatstone

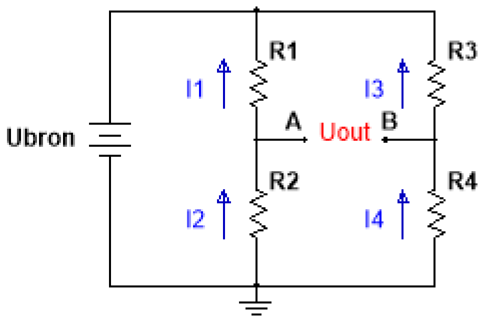
Een brug van Wheatstone bestaat uit vier weerstanden en kan gebruikt worden om weerstanden heel nauwkeurig te meten. Daarnaast kan deze ook gebruikt worden om fysische grootheden zoals temperatuur, druk, .. te meten. De verandering van de fysische grootheid wordt gemeten met een transducer die deze verandering omzet in weerstandsverandering.

Figuur 1-23 toont een brug van Wheatstone. Deze bestaat uit vier weerstanden en een spanningsbron die verbonden is tussen de boven- en onderzijde van de brug. De uitgangsspanning wordt afgenomen tussen de punten A en B van de schakeling. De brug bestaat in feite uit twee spanningsdelers die parallel geschakeld staan met elkaar.

1.4.6.1 De gebalanceerde Wheatstonebrug

Een Wheatstonebrug is gebalanceerd of in evenwicht als de uitgangsspanning U_{out} tussen de uitgangspunten A en B gelijk is aan $0\,V$. Als U_{out} gelijk is aan $0\,V$ betekent dit dat de spanningen over R_1 en R_3 aan elkaar gelijk zijn en ook dat de spanningen over R_2 en R_4 aan elkaar gelijk zijn. In formulevorm: $U_{R_1} = U_{R3}$ en $U_{R2} = U_{R4}$. Dit betekent eveneens dat:

$$\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{U_{R3}}{U_{R4}}$$



Figuur 1-23 : Brug van Wheatstone

Vervangen we de spanningsvallen door hun wet van Ohm equivalenten:

$$\frac{I_1 \times R_1}{I_3 \times R_2} = \frac{I_2 \ \times R_3}{I_4 \times R_4}$$

Vermits $I_1 = I_2$ en $I_3 = I_4$ kunnen de stromen in bovenstaande vergelijking weggedeeld worden en kan deze vereenvoudigd worden tot :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Of :

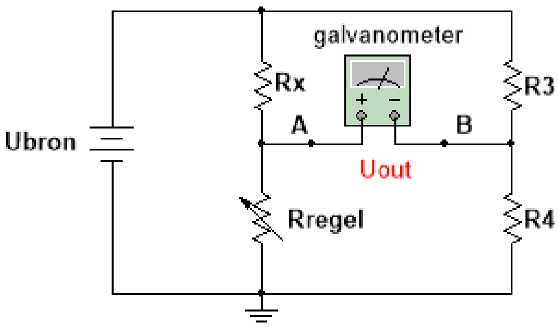
$$R_1 \times R_4 = \ R_2 \times R_3$$

Dit houdt in dat de brug in evenwicht is als het product van de schuin tegenover elkaar staande weerstanden aan elkaar gelijk is. De vergelijking is gemakkelijk om te vormen naar een vergelijking waarin je een onbekende weerstand in de brug te vinden in functie van de andere weerstandswaarden. Stel dat R_1 deze onbekende weerstand is dan kan je deze vinden via volgende formule:

$$R_1 = \frac{R_2 \times R_3}{R_4} = R_2 \times \frac{R_3}{R_4}$$

Hoe ga je nu praktisch te werk om deze onbekende weerstand te bepalen? Beschouw hiervoor de schakeling van figuur 1-24. R_x is de onbekende weerstand die gemeten wordt. R_{regel} is de weerstandswaarde van de regelbare weerstand om de brug in balans te brengen. Tussen de punten A en B aan de uitgang van de brug in figuur 1-23 plaats je een galvanometer. Dit is een ouder type meetinstrument waarmee gemakkelijk zeer kleine stromen gemeten kunnen worden. Wanneer er geen stroom meer vloeit tussen de punten A en B betekent dit dat de spanning op beide punten dezelfde is. Door de weerstand R_2 regelbaar te maken kan je de brug afregelen zodat de meter $0\ \mu A$ aangeeft waardoor U_{out} gelijk is aan $0\ V$. De verhouding van de weerstanden R_3 op R_4 vormt een schaalfactor. Wanneer je via schakelaars telkens andere weerstandswaarden kan schakelen voor R_3 en/of R_4 vergroot je het meetbereik van de brugschakeling. Hoe nauwkeuriger de weerstanden, hoe nauwkeuriger de onbekende weerstand in waarde kan gemeten worden. De onbekende weerstand kan dan gevonden worden met volgende formule:

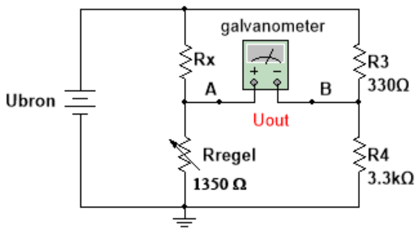
$$R_x = R_{regel} \times \frac{R_3}{R_4}$$



Figuur 1-24 : principeschakeling meten onbekende weerstand met Wheatstonebrug

Voorbeeld 1-55

Bepaal de onbekende weerstand en de schaalfactor in de gebalanceerde brug van figuur 1-164. De brug is in balans gebracht ($U_{out} = 0\ V$) als R_{regel} gelijk is aan $1350\ \Omega$.



Figuur 1-vb52

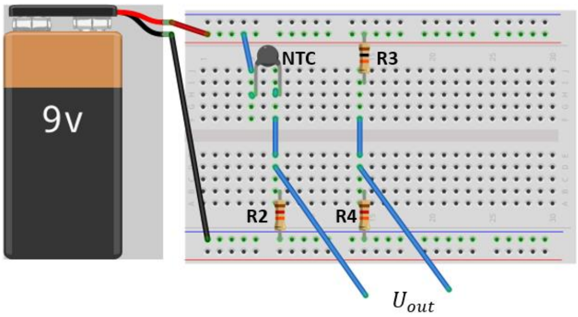
Oplossing

De schaalfactor is gelijk aan: $\frac{R_3}{R_4} = \frac{330\ \Omega}{3,3\ k\Omega} = 0,1$

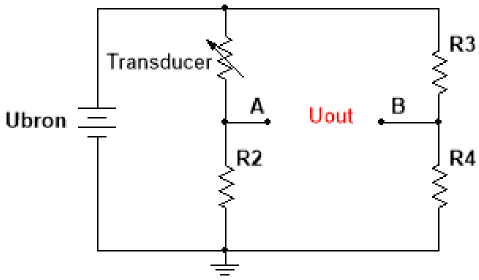
De onbekende weerstand R_x: $R_x = R_{regel} \times \frac{R_3}{R_4} = 1350\ \Omega \times \frac{330\ \Omega}{3,3\ k\Omega} = 135\ \Omega$

1.4.6.2 De ongebalanceerde Wheatstonebrug

Een ongebalanceerde brug is een brug waarbij de uitgangsspanning U_{out} niet gelijk is aan $0\ V$. Dit type brug wordt gebruikt om verschillende typen fysische grootheden zoals mechanische sterkte, temperatuur, druk, … te meten. In figuur 1-25 (b) is een voorbeeld van een ongebalanceerde Wheatstonebrug weergegeven. De transducer is een component die een fysische grootheid omzet naar een elektrische grootheid. Bijvoorbeeld een NTC. Dit is een **N**egatieve **T**emperatuurs- **C**oëfficiëntweerstand waarbij de weerstandswaarde daalt bij stijgende temperatuur.



(a) Ongebalanceerde brug met NTC



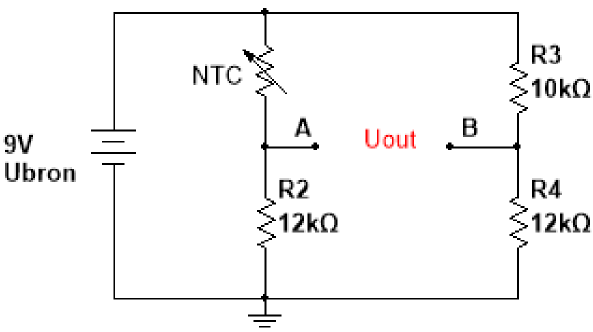
(b) Schema ongebalanceerde brug

Figuur 1-25 : voorbeeld van een ongebalanceerde brug met NTC als transducer om temperatuur in spanning om te zetten

Figuur 1-25 stelt een ongebalanceerde Wheatstonebrug voor om temperatuur te meten. In dit voorbeeld is een NTC als thermistor (temperatuursafhankelijke weerstand) gebruikt. De weerstandswaarde van de NTC verandert op een voorspelbare manier als de temperatuur verandert. Een verandering in temperatuur veroorzaakt een verandering in thermische weerstand waardoor de uitgangsspanning zal veranderen. Deze uitgangsspanning kan met een voltmeter worden afgelezen. Deze spanning kan ook versterkt worden met een versterker en dan omgevormd worden via een ADC naar een digitale waarde. Een brug om temperatuur te meten is zodanig ontworpen dat ze in balans is bij een referentietemperatuur. Bijvoorbeeld de brug is in evenwicht bij $25°C$. Dit betekent dat de NTC een gekende weerstandswaarde heeft bij deze temperatuur.

Voorbeeld 1-56

Bepaal U_{out} van de brug voor temperatuursmeting bij $19°C$ (zie figuur 1-vb53). Stel dat de NTC een weerstand heeft van $10\ k\Omega$ bij $25°C$ en een weerstand van 14 kΩ bij $19°C$.



Figuur 1-vb53

Oplossing

De spanning op punt B heeft steeds dezelfde waarde, ongeacht de temperatuur en kan via de spanningsdelerformule gevonden worden:

$$U_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times U_{bron} = \frac{12\ k\Omega}{10\ k\Omega + 12\ k\Omega} \times 9\ V = 4{,}9\ V$$

Bij een temperatuur van $19°C$ is de weerstand van de NTC gelijk aan $14\ k\Omega$. De spanning op punt A is dan bijgevolg:

$$U_A = \frac{R_2}{R_2 + R_{NTC}} \times U_{bron} = \frac{12\ k\Omega}{12\ k\Omega + 14\ k\Omega} \times 9\ V = 4{,}15\ V$$

De spanning $U_{out} = U_A - U_B = 4{,}15\ V - 4{,}9\ V = -0{,}75\ V$

Merk op dat bij $25°C$ de brug in evenwicht is en $U_{out} = 0\ V$.

Een ander type weerstandsbrug is een brug die bestaat uit rekstrookjes. Rekstrookjes worden gebruikt om krachten te meten. Wanneer een rekstrookje een kracht ondervindt, wordt de weerstandsdraad ofwel uitgetrokken ofwel samengeduwd waardoor de weerstandswaarde verandert. Rekstrookjes worden in brug geplaatst. De brug is normaal in evenwicht. Naargelang de sterkte van de kracht op het rekstrookje verandert de weerstandswaarde en komt de brug uit evenwicht. Rekstrookjes zijn zeer delicaat en moeten voorzichtig behandeld worden. Een “load cell” is een transducer die rekstrookjes gebruikt om mechanische kracht om te vormen in een elektrisch signaal. Om gewicht te wegen is een load cell typisch in een S-vorm opgebouwd. Toepassingen van een brug met rekstrookjes vind je terug bij onder andere systemen die een reiskoffer wegen of de weegbrug voor vrachtwagens.

1.5 Bijlangrijke formules

1-1	**Lading**	$\boldsymbol{Q = \dfrac{aantal\ elektronen}{6{,}25 \times 10^{18} elektronen/C}}$
1-2	**Spanning in functie van energie (arbeid) (in Joule) en lading**	$\boldsymbol{U = \dfrac{W}{Q}}$
1-3	**Stroom in functie van lading en tijd**	$\boldsymbol{I = \dfrac{Q}{t}}$
1-4	**Geleiding (in Siemens) in functie van weerstand**	$\boldsymbol{G = \dfrac{1}{R}}$
1-5	**Wet van Ohm voor stroomberekening**	$\boldsymbol{I = \dfrac{U}{R}}$
1-6	**Wet van Ohm voor spanningsberekening**	$\boldsymbol{U = I \times R}$
1-7	**Wet van Ohm voor weerstandsberekening**	$\boldsymbol{R = \dfrac{U}{I}}$

1-8	**De totale weerstand van n weerstanden in serie**	$R_T = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$
1-9	**De totale weerstand van n gelijke weerstanden in serie**	$R_T = nR$
1-10	**Spanningswet van Kirchhoff in een serieschakeling**	$U_{bron} = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$
1-11	**Spanningswet van Kirchhoff algemeen**	$0 = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$
1-12	**Spanningsdelerformule**	$U_x = \frac{R_x}{R_T} \times U_{bron}$
1-13	**Totale parallelweerstand**	$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}}$
1-14	**Parallelschakeling van 2 weerstanden**	$R_T = \frac{R_1 . R_2}{R_1 + R_2}$
1-15	**Parallelschakeling n gelijke weerstanden**	$R_T = \frac{R}{n}$
1-16	**stroomwet van Kirchhoff algemeen**	$I_{IN1} + I_{IN1} + I_{IN2} + \cdots + I_{INn} = I_{OUT1} + I_{OUT2} + \cdots + I_{OUTm}$
1-17	**Algemene formule voor stroomdeler**	$I_x = \frac{R_T}{R_x} . I_T$
1-18	**Stroomdelerformule voor 2 takken in parallel**	$I_1 = \frac{R_2}{R_1+R_2} . I_T;\ I_2 = \frac{R_1}{R_1+R_2} . I_T$
1-19	**Algemene formule bepalen bleederstroom**	$I_{BLEEDER} = I_T - I_{RL1} - IR_{L2} - \cdots - I_{RLn}$
1-20	**Onbekende weerstand in wheatstonebrug**	$R_x = R_v \times \frac{R_2}{R_4}$

2 Vermogen - Elektrische vervangingsschema's

2.1 Energie en vermogen

Wanneer er stroom door een weerstand vloeit wordt er elektrische energie omgezet in warmte of een andere vorm van energie zoals licht. Een bekend voorbeeld hiervan is de gloeilamp. Wanneer er elektrische stroom door een gloeilamp vloeit, wordt deze warm en na een tijdje te warm om nog vast te nemen. Naast warmte produceert diezelfde stroom door de gloeidraad van de lamp ook nog licht.

Wat is belangrijk?

- **Je definieert energie en vermogen met je eigen woorden.**
- **Je drukt het vermogen uit in termen van energie en tijd.**
- **De eenheid van vermogen opnoemen.**
- **Je noemt de gemeenschappelijke eenheden van vermogen en energie.**
- **Je voert berekeningen uit aangaande energie en vermogen.**
- **Je berekent het vermogen in een schakeling.**
- **Je bepaalt het vermogen als je de stroom en weerstand kent.**
- **Je bepaalt het vermogen als je de spanning en stroom kent.**

- **Je bepaalt het vermogen als je de spanning en weerstand kent**.

Energie is de mogelijkheid om arbeid te verrichten en vermogen is het tempo waarin de energie wordt gebruikt. Met andere woorden: het vermogen *P* is een bepaalde hoeveelheid energie (arbeid) *W* die in een bepaalde tijd *t* wordt uitgevoerd. In formulevorm :

$$\boldsymbol{P = \frac{W}{t}}$$

Hierbij is *P* het vermogen in watt (W). *W* is de energie in joule en *t* is de tijd in seconden (*s*). Merk op dat de arbeid met een cursief (italic *W* wordt gebruikt om energie te vertegenwoordigen. Een non-italic W wordt gebruikt om de eenheid van vermogen aan te duiden.

De joule is de SI-eenheid voor energie. Energie in joules (*J)* gedeeld door de tij in seconden (*s*) geeft het vermogen in watt (W). Wordt er bijvoorbeeld *80 J* energie verbruikt in *4 s* dan is het vermogen gelijk aan :

$$\boldsymbol{P = \frac{W}{t} = \frac{80\,J}{4\,s} = 20\ \mathrm{W}}$$

Kleine hoeveelheden vermogen minder dan een watt zijn gebruikelijk in verschillende gebieden van de elektronica. Net zoals bij kleine stroom- en spanningswaarden worden ook bij het vermogen metrische voorvoegsels gebruikt om de kleine hoeveelheden van vermogen aan te duiden. Zo worden milliwatt (mW) en microwatt (µW) vaak gebruikt bij elektronische berekeningen. Op het gebied van elektrische nutsbedrijven komen hoeveelheden vermogen in kilowatt (kW) en megawatt (MW) vaak voor. Radio en TV-stations gebruiken ook grote hoeveelheden vermogen om signalen te verzenden. Elektromotoren worden ook vaak in paardenkracht (*pk*) uitgedrukt waarbij *1 pk* gelijk is aan *746* W.

Vermits vermogen de verhouding is waarmee energie wordt gebruikt per tijdseenheid, wordt vermogen gebruikt gedurende een bepaalde tijdsperiode. Bijgevolg wanneer je vermogen in W vermenigvuldigt met de tijd in seconden bekom je de hoeveelheid energie in joules. In formulevorm:

$$\boldsymbol{W = P \times t}$$

Voorbeeld 2-1

Een hoeveelheid energie gelijk aan *50 J* wordt gebruikt gedurende *4 s*. Hoeveel bedraagt het vermogen in W?

Oplossing:

$$P = \frac{energie}{tijd} = \frac{50\,J}{4\,s} = 12{,}5\ \mathrm{W}$$

2.1.1 Eenheid van energie : de kilowattuur (kWh)

Zoals reeds is vermeld is joule de SI-eenheid voor energie of arbeid. Er is ook een andere manier om energie uit te drukken, namelijk de kilowattuur (kWh). Wanneer een elektrische factuur wordt betaald is het bedrag afhankelijk van de hoeveelheid verbruikte energie. Vermits energiebedrijven werken met enorme hoeveelheden energie is de kWh een veel praktischer eenheid dan de joule. *1* kilowattuur aan energie is het equivalent van *1000* W vermogen gedurende *1* uur. Stel bijvoorbeeld een TV die die 20 uur staat te spelen en *50* W verbruikt. De totale verbruikte energie is dan gelijk aan het product van vermogen met tijd of *50* W *x 20* uur, wat gelijk is aan *1000* Wh of 1 kWh energie.

Voorbeeld 2-2

Bepaal het aantal kWh voor elk van volgende verbruiken:

(a) *200* W gedurende 1 uur (b) *2500* W gedurende *2* uur (c) 500 W gedurende 15 minuten

Oplossing:

a) *200* W komt overeen met *0,2* kW
$W = P \times t = 0{,}2\ kW \times 1\ h = 0{,}2\ kWh$

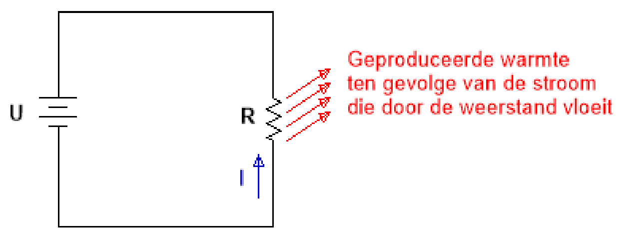
b) 2500 W komt overeen met 2,5 kW
$W = P \times t = 2{,}5\ kW \times 2\ h = 5\ kWh$

c) 500 W komt overeen met 0,5 kW en 15 minuten met 0,25 h
$W = P \times t = 0{,}5\ kW \times 0{,}25\ h = 0{,}125\ kWh$

2.1.2 Vermogen in een elektrische schakeling

In een elektrische schakeling is de warmteontwikkeling, die optreedt wanneer elektrische energie wordt omgezet in warmte, vaak een ongewenst bijproduct van stroom die door een weerstand vloeit. In sommige gevallen is deze warmteontwikkeling juist het primaire doel van een schakeling. Denk maar aan elektrische verwarming. Wanneer deze verwarming wordt aangeschakeld zal er een stroom vloeien door een weerstand waardoor er warmte ontstaat. Of deze warmte nu gewenst is of niet, je zal dikwijls met deze energie moeten omgaan in elektrische- en elektronische schakelingen.

Als er stroom door een weerstand vloeit, wordt er warmte ontwikkeld in deze weerstand. Dit komt door de "botsingen" van elektronen in het weerstandsmateriaal als de stroom hierdoor vloeit. Dit houdt in dat in een weerstand elektrische energie wordt omgezet in thermische energie (warmte). Zie hiervoor figuur 2-1.



Figuur 2-1 : Warmteontwikkeling in een weerstand ten gevolge van elektrische stroom

De hoeveelheid vermogendissipatie in een elektrische schakeling is afhankelijk van de hoeveelheid weerstand en de hoeveelheid stroom aanwezig in de beschouwde schakeling. In formulevorm:

$$\boldsymbol{P = I^2 \times R}$$

Hierbij is *P* het vermogen in watt (W), *R* de weerstand in ohm en *I* de stroom in ampère. Het vermogen is ook uitdrukbaar in functie van de spanning over de weerstand en de stroom door de weerstand. Volgens de wet van Ohm is:

$$U = I \times R$$

Vullen we dit in de formule van het vermogen (vergelijking 3-5) dan wordt bekomen:

$$P = I^2 \times R = I \times I \times R$$

$$\boldsymbol{P = I \times U}$$

Ten slotte kan je het vermogen ook nog uitdrukken in functie van spanning en weerstand. Via de wet van Ohm kan je de stroom bepalen in functie van spanning en weerstand. Dit op volgende manier:

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

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

$$\boldsymbol{P = \frac{U^2}{R}}$$

Voorbeeld 2-3

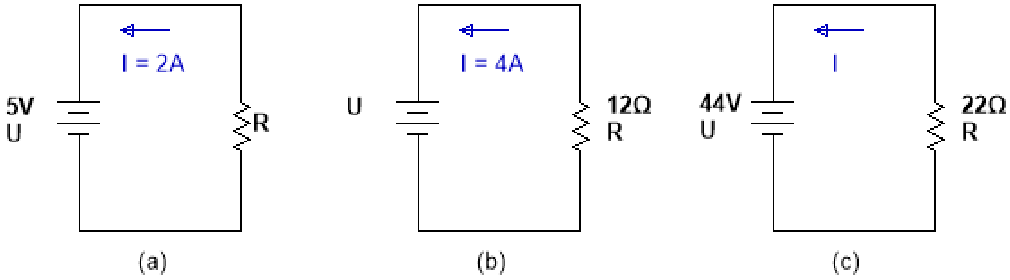
Een elektrische straalkachel heeft een vermogen van *2000* W. Als dit toestel aan een spanning van *230 V* wordt aangesloten, bepaal dan de stroom die door deze straalkachel gaat.

Oplossing:

$$\boldsymbol{I = \frac{P}{U} = \frac{2200\ W}{230\ V} = 9{,}57\ A}$$

Voorbeeld 2-4

Bepaal het vermogen in elk van onderstaande figuren.



Figuur 2-vb01

Oplossing:

(a) In schakeling (a) is de stroom en spanning gekend :

$$P = U \times I = 5V \times 2A = 10\ W$$

(b) In schakeling (b) zijn de weerstand en stroom gekend:

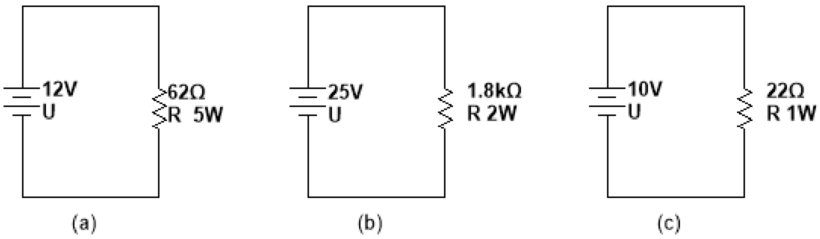
$$P = I^2 \times R = (4\ A)^2 \times 12\ \Omega = 192\ W$$

(c) In schakeling (c) zijn weerstand en spanning gekend:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(44\ V)^2}{22\ \Omega} = 88\ W$$

Voorbeeld 2-5

Bepaal van de schakelingen in figuur 3-16 of de weerstand oververhit wordt of niet.



Figuur 2-vb02

Oplossing:

(a) $P = \frac{U^2}{R} = \frac{(12\ V)^2}{62\ \Omega} = 2{,}32\ W$

Het maximaal vermogen dat de weerstand kan dissiperen is 5 W. De weerstand van de schakeling (a) wordt niet oververhit.

(b) $P = \frac{U^2}{R} = \frac{(25\ V)^2}{1{,}8\ k\Omega} = 0{,}35\ W$
Het maximaal vermogen dat de weerstand kan dissiperen is *2* W. De weerstand van de schakeling (b) wordt niet oververhit.

(c) $P = \frac{U^2}{R} = \frac{(10\ V)^2}{22\ \Omega} = 4{,}55\ W$
Het maximaal vermogen dat de weerstand kan dissiperen is 1 W. Vermits in de schakeling de weerstand 4,55 W moet dissiperen wordt deze oververhit. De kans is groot dat de weerstand in deze schakeling zal verbranden waardoor deze stuk gaat en een open keten zal vormen.

2.1.3 Het rendement van een spanningsbron

Het rendement η of efficiëntie is de verhouding van het uitgangsvermogen van de spanningsbron op het ingangsvermogen. In formulevorm :

$$\eta = \frac{\boldsymbol{P_{OUT}}}{\boldsymbol{P_{IN}}}$$

Het rendement wordt dikwijls uitgedrukt in een percentage. Als bijvoorbeeld het ingangsvermogen gelijk is aan *100* W en het uitgangsvermogen gelijk is aan *75* W, dan is het rendement gelijk aan :

$$\eta = \frac{\boldsymbol{P_{OUT}}}{\boldsymbol{P_{IN}}} = \frac{\mathbf{75\ W}}{100\ W} = \mathbf{0{,}75\ of\ 75}\ \%$$

Alle elektronische voedingen zijn energieomzetters en vereisen dat er vermogen wordt ingebracht om een bepaald vermogen uit te halen. Zo kan een elektronische gelijkspanningsvoeding via een stopcontact vermogen van het net gebruiken als ingangsvermogen. Het uitgangsvermogen wordt meestal geleverd via een ingestelde gelijkspanning. Het uitgangsvermogen is steeds minder dan het opgenomen vermogen uit de netspanning. Omdat een deel van de totale stroom intern wordt gebruikt voor de stroomvoorziening van de interne schakelingen, ontstaat er een intern energieverlies. Dit intern energieverlies wordt het vermogenverlies genoemd. Het uitgangsvermogen is bijgevolg gelijk aan het ingangsvermogen waarbij dit vermogenverlies wordt afgetrokken. Als het vermogenverlies wordt voorgesteld door P_{LOSS} kan het uitgangsvermogen als volgt bepaald worden:

$$\boldsymbol{P_{OUT} = P_{IN} - P_{LOSS}}$$

Een hoog rendement betekent dat er heel weinig vermogen wordt gedissipeerd in de voeding zelf. Hierdoor wordt er een hoger hoeveelheid uitgangsvermogen geleverd bij een gegeven ingangsvermogen.

Voorbeeld 2-6

Een spanningsbron heeft *64* W ingangsvermogen nodig vanuit het net om een uitgangsvermogen van 40 W te kunnen leveren.

a) Wat is het rendement van deze spanningsbron?
b) Wat is het intern vermogenverlies van deze spanningsbron?

Oplossing:

a) Rendement : $\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{40\ W}{64\ W} = 0{,}625 \text{ of } 62.5\ \%$

b) Intern vermogenverlies : $P_{LOSS} = P_{IN} - P_{OUT} = 64\ W - 40\ W = 24\ W$

2.1.4 Het begrip ampère-uur (Ah) bij batterijen

Batterijen zetten opgeslagen chemische energie om in elektrische energie. Ze worden veel gebruikt voor het leveren van stabiele gelijkstroom aan kleine systemen zoals laptops en smartphones. De batterijen in deze kleine systemen zijn gewoonlijk oplaadbaar. Bij een oplaadbare batterij kan de chemische reactie worden omgekeerd via een externe spanningsbron. De capaciteit van een batterij wordt uitgedrukt in ampère-uur (*Ah*). Op een batterij staat het aantal ampère-uur vermeld. Voor een oplaadbare batterij is het vermelde ampère-uur de maximale capaciteit die kan worden afgegeven alvorens deze opnieuw moet opgeladen worden. De ampère-uur-waarde van een batterij bepaald hoelang een batterij een bepaalde hoeveelheid stroom kan leveren gedurende één uur. Bijvoorbeeld een batterij met vermelding *1500 mAh* kan een stroom leveren van *1500 mA* of *1,5 A* gedurende *1* uur aan een belasting. Dit betekent dat diezelfde batterij een stroom van *3 A* kan leveren gedurende een half uur. Analoog kan deze batterij een stroom leveren van *750 mA* gedurende twee uren. Hoe meer stroom de batterij moet leveren, hoe korter de levensduur van de batterij en omgekeerd. In de praktijk is de batterij gewoonlijk geschikt voor een bepaald stroomniveau en uitgangsspanning. Bijvoorbeeld een *12 V* autobatterij kan worden beoordeeld voor *70 Ah* bij een stroomsterkte van *3,5 A*. Dit betekent dat deze batterij een gemiddelde stroom van *3,5 A* kan leveren gedurende *20* uur bij de nominale spanning.

Voorbeeld 2-7

Hoeveel uur kan een batterij van *40 Ah* een stroom van *2,5 A* leveren?

Oplossing:

Het aantal ampère-uur is gelijk aan de geleverde stroom vermenigvuldigt met het aantal uren dat deze stroom kan geleverd worden gedurende één uur. Om het aantal uren te vinden stellen we het aantal uur voor door *x*.

$$40\ Ah = 2{,}5\ A\ \times\ x\ uur$$

$$x\ uur\ = \frac{40\ Ah}{2{,}5\ A} = 16\ uur$$

2.1.5 Vermogen in serie- en parallelschakeling

Het vermogen dat gedissipeerd wordt door één weerstand in een serieschakeling draagt bij tot de totale vermogendissipatie in de schakeling. De individuele vermogendissipaties van de weerstanden in de schakeling kunnen worden opgeteld om het totale vermogen te bekomen.

Wat is belangrijk?

- **Je berekent het vermogen in een serieschakeling.**
- **Je berekent het vermogen in een parallelschakeling**
- **Je past de vermogenformules toe**

2.1.5.1 Vermogen in een serieschakeling

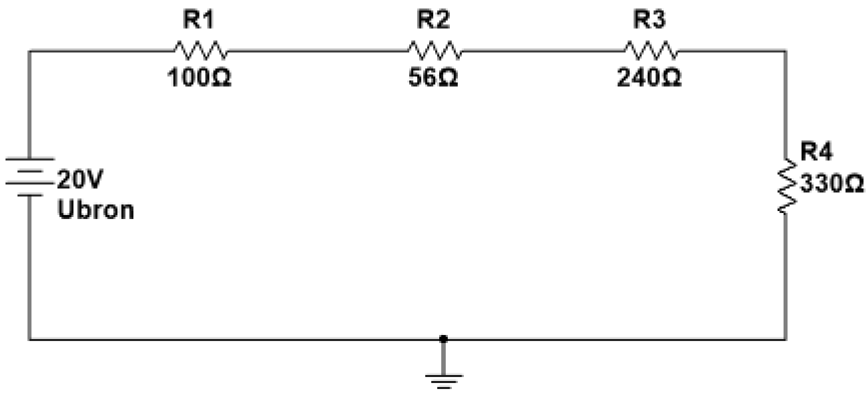
Het totale vermogen P_T in een serieschakeling van weerstanden is gelijk aan de som van de vermogens in iedere weerstand in deze serieschakeling. In formulevorm:

$$\boldsymbol{P_T = P_1 + P_2 + \cdots + P_n}$$

De vermogenformules die in vorige paragraaf besproken zijn, zijn ook hier geldig.

Voorbeeld 2-8

Bepaal het totale vermogen in de serieschakeling van figuur 2-vb03



Figuur 2-vb03

Oplossing

Eerst wordt de totale weerstand bepaald :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 100\ \Omega + 56\ \Omega + 240\ \Omega + 330\ \Omega = 726\ \Omega$$

Omdat de bronspanning en de totale weerstand nu gekend zijn, kan je het totaal vermogen berekenen met de formule $P_T = \frac{U_{bron}^2}{R_T}$.

$$P_T = \frac{(20\ V)^2}{726\ \ \Omega} = 551\ mW$$

Je kan ook het totale vermogen vinden door het vermogen van iedere weerstand te bepalen en deze vervolgens op te tellen. Eerst wordt de totale stroom bepaald:

$$I_T = \frac{U_{bron}}{R_T} = \frac{20\ V}{726\ \Omega} = 27{,}55\ mA$$

Het totale vermogen is dan bijgevolg :

$$P_T = I_T^2 \times R_1 + I_T^2 \times R_2 + I_T^2 \times R_3 + I_T^2 \times R_4$$

$$P_T = (27{,}55\ mA)^2 \times 100\ \Omega + (27{,}55\ mA)^2 \times 56\ \Omega + (27{,}55\ mA)^2 \times 240\ \Omega + 27{,}55\ mA)\text{^}2\ \times 330\Omega$$

P_T = 75,9 mW + 42,5 mW + 182,16 mW + 250,47 mW

$$P_T = 551\ mW$$

2.1.6 Vermogen in parallelschakelingen

Het totaal vermogen van een parallelschakeling kan gevonden worden door alle vermogens van de afzonderlijke weerstanden op te tellen. Dit is ook zo bij de serieschakeling.

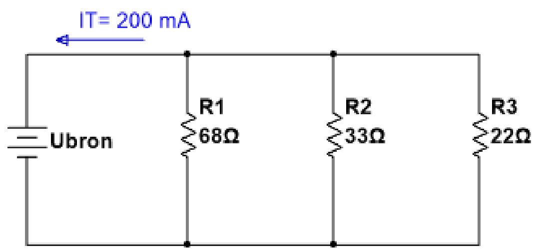
Het totaal vermogen bepalen van n weerstanden in parallel kan met volgende vergelijking worden bepaald:

$$\boldsymbol{P_T = P_1 + P_2 + \cdots + P_n}$$

Volgende rekenvoorbeelden geven je meer inzicht in het bepalen van het totale vermogen in een parallelschakeling.

Voorbeeld 2-9

Bepaal het totaal vermogen in de parallelschakeling van figuur vb-04.



Figuur 2-vb04

Oplossing

$I_T = 200\ mA$ en de totale weerstand is gelijk aan:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{68\ \Omega} + \frac{1}{33\Omega} + \frac{1}{22\ \Omega}} = 11{,}05\ \Omega$$

Het totaal vermogen is dan het snelst op volgende wijze te bepalen:

$$P_T = I_T^2\ \times R_T = (200\ mA)^2 \times 11{,}1\ \Omega = 442\ mW$$

Je kan het totaal vermogen ook bepalen door het vermogen per weerstand te bepalen en dan de vermogens op te tellen. De spanning over iedere paralleltak is dezelfde en gelijk aan de aangelegde spanning. Deze is te vinden via de wet van Ohm:

$$U_{bron} = I_T \times R_T = 200\ mA\ \times 11{,}05\ \Omega = 2{,}21V$$

Vervolgens bepaal je per weerstand het gedissipeerde vermogen:

$$P_{R1} = \frac{U_{bron}^2}{R_1} = \frac{(2{,}21\ V)^2}{68\ \Omega} = 71{,}83\ mW$$

$$P_{R2} = \frac{U_{bron}^2}{R_2} = \frac{(2{,}21\ V)^2}{33\ \Omega} = 148\ mW$$

$$P_{R3} = \frac{U_{bron}^2}{R_3} = \frac{(2{,}21\ V)^2}{22\ \Omega} = 222\ mW$$

Door de drie gevonden vermogens nu samen te tellen bekom je eveneens het totale vermogen:

$$P_T = \ P_{R1} + P_{R2} + P_{R2} = 71{,}83\ mW + 148\ mW + 222\ mW = 441{,}83\ mW$$

Het klein verschil tussen de twee totaal vermogens is te wijten aan afrondingsfouten.

Voorbeeld 2-10

Een luidsprekerkast bestaat uit twee luidsprekers. Een om de hoge tonen weer te geven en een om de lage tonen weer te geven. Stel dat beide luidsprekers een impedantie van $8\,\Omega$ hebben en de versterker een maximale amplitude van $15\,V$ naar de luidsprekers stuurt, hoeveel vermogen moet de versterker dan hebben om dit signaal aan de luidsprekers te kunnen leveren.

Oplossing

De twee luidsprekers staan parallel aangesloten. Het maximaal vermogen dat moet geleverd worden aan elke luidspreker is gelijk aan :

$$P_{max} = \frac{U_{max}^2}{R} = \frac{(15\,V)^2}{8\,\Omega} = 28{,}125\,W$$

Aan iedere luidspreker moet dit vermogen geleverd worden zodat het totaal vermogen dat de versterker moet leveren gelijk is aan :

$$P_T = P_{\max(Luidspreker1)} + P_{\max(Luidspreker2)}$$

$$P_T = 28{,}125\,W + 28{,}125\,W = 56{,}25\,W$$

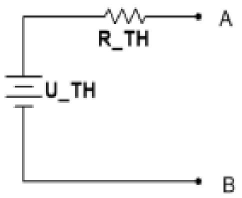
2.2 Theorema van Thevenin

Het theorema van Thevenin of de stelling van Thevenin levert een methode om een schakeling te vereenvoudigen. In veel gevallen kan deze stelling gebruikt worden om de analyse van gemengde schakelingen te vereenvoudigen.

Wat is belangrijk?

- **Je past het theorema van Thevenin toe op een schakeling.**
- **Je beschrijft de vorm van een Thevenin equivalente schakeling.**
- **Je bepaalt de spanningswaarde van de Thevenin equivalente spanningsbron.**
- **Je bepaalt de weerstandswaarde van de Thevenin equivalente weerstand.**
- **Je past het theorema van Thevenin toe op een gedeelte van een schakeling.**

Het Thevenin-equivalent van een twee-terminal resistieve schakeling bestaat uit een equivalente spanningsbron U_{TH} en een equivalente weerstand R_{TH}. De waarden van U_{TH} en R_{TH} zijn afhankelijk van de waarde van componenten in de oorspronkelijke schakeling. Men kan bijgevolg een twee terminal schakeling vereenvoudigen via Thevenin ongeacht zijn complexiteit.

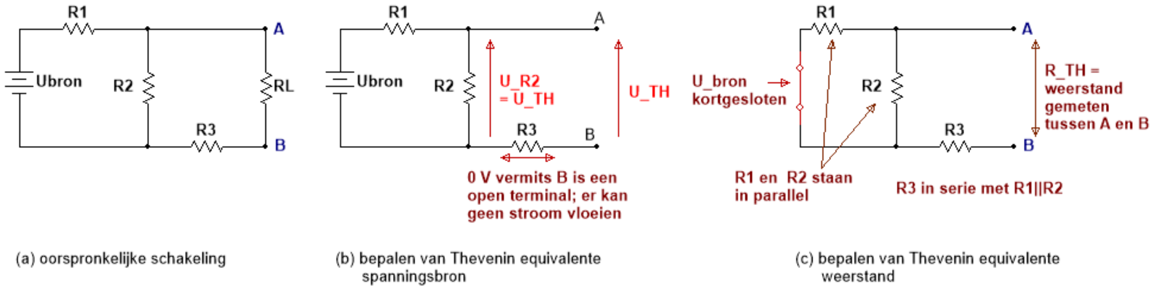


Figuur 2-2 : Voorstelling van de algemene vorm van een Thevenin equivalent.

De Thevenin equivalente spanning U_{TH} is gelijk aan de open circuit (geen belasting) spanning tussen de gespecificeerde terminals van een schakeling. De Thevenin equivalente weerstand R_{TH} is gelijk aan de totale weerstand die zich voordoet tussen deze twee gespecificeerde terminals van een schakeling. Figuur 2-2 geeft een voorbeeld van de opbouw van een Thevenin equivalente schakeling.

Een Thevenin equivalent is niet hetzelfde als de originele schakeling maar het gedraagt zich in termen van stroom en spanning exact hetzelfde als de schakeling die hiermee vervangen wordt. Bij éénzelfde belasting door beide schakelingen worden dezelfde stroom- en spanningswaarden gemeten. Deze conditie wordt soms ook benoemd als terminal equivalentie.

Hoe kan je het Thevenin equivalent bepalen? Stel de schakeling van figuur 2-3 (a). Het is de bedoeling dat de schakeling die zich links bevindt van de punten A en B te vervangen door zijn Thevenin equivalent.



Figuur 2-3: Procedure voor het bepalen van het Thevenin equivalent van een schakeling

Figuur 2-3 (b) geeft weer hoe je de Thevenin equivalente spanning kan bepalen tussen de punten A en B. Eerst wordt de belasting R_L verwijderd (indien aanwezig) zodat de terminals open zijn. De Thevenin equivalente spanning kan je nu vinden door de spanning te berekenen die tussen de vermelde punten staat. Daar R_L werd verwijderd is de stroomkring voor R_3 onderbroken. Dit heeft als gevolg dat er nu geen stroom door deze weerstand kan vloeien waardoor er ook geen spanningsval over R_3 kan staan ($U\_R3 = 0\ V$) De spanning die je normaal zou meten tussen de punten A en B in dit voorbeeld is gelijk aan de som van de spanningsval U_{R2} over de weerstand R_2 met de spanningsval U_{R3} over de weerstand R_3. Daar, zoals reeds vermeld, U_{R3} gelijk is aan $0\ V$ is de Thevenin equivalente spanning U_{TH} gelijk aan U_{R2}. Deze spanning is te vinden door de spanningsdelerformule toe te passen op R_1 en R_2:

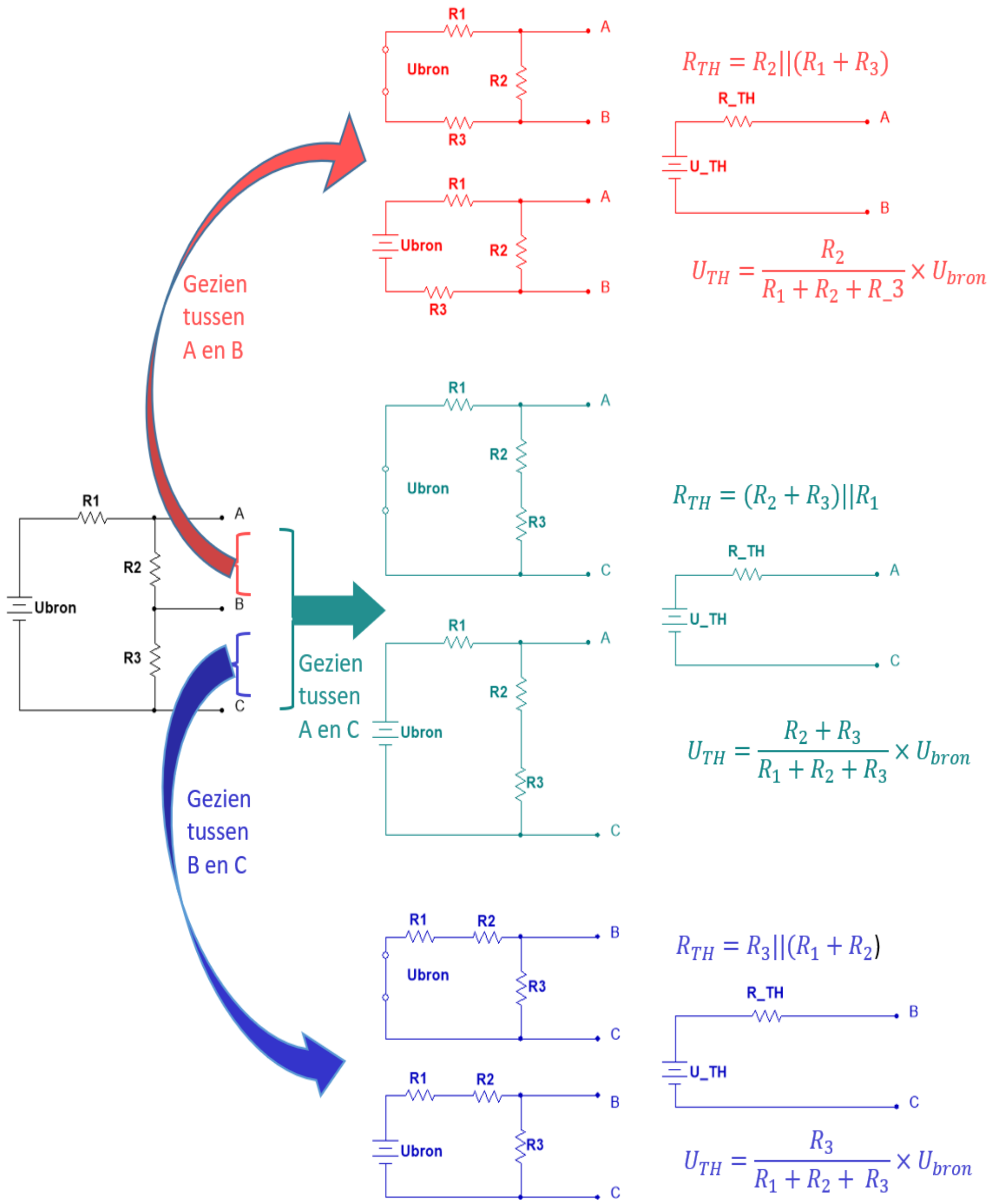
$$U_{TH} = U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{bron}$$

In figuur 2-3 (c) zie je hoe je de Thevenin equivalente weerstand kan bepalen. Ook nu wordt eerst de belastingsweerstand $R_L$uit de schakeling verwijderd. Vervolgens wordt de spanningsbron U_{bron} kortgesloten. Dit is voorgesteld met een gesloten schakelaar in figuur 2-3 (c). De Thevenin equivalente weerstand vind je nu door de weerstandswaarde te berekenen die zich tussen de punten A en B bevind. Doordat de bron U_{TH} werd kortgesloten, staan de weerstanden R_1 en R_2 in parallel. De Thevenin equivalente weerstand R_{TH} tussen de punten A en B is dan gelijk aan :

$$R_{TH} = R_{AB} = R_3 + (R_1||R_2)$$

Van zodra U_{TH} en R_{TH} gekend zijn kan de schakeling van figuur 2-3 (a) vervangen worden door de schakeling van figuur 2-2.

De Thevenin equivalentie is afhankelijk van de punten waartussen gekeken wordt. Bekijk hiervoor figuur 2-4 . Je kan het Thevenin equivalent bepalen tussen de punten A en B, B en C of A en C.

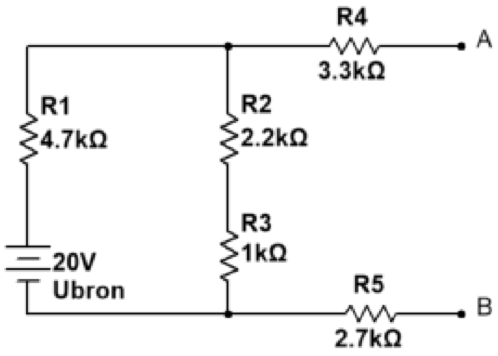


Figuur 2-4: Het Thevenin equivalent is afhankelijk van tussen welke punten naar de schakeling wordt gekeken

Het Thevenin equivalent gezien tussen de punten A en B levert andere waarden voor U_{TH} en R_{TH} op dan gezien tussen de punten B en C. In figuur 2-4 zie je de uitwerking van het Thevenin equivalent telkenmale je tussen twee andere punten het equivalent bepaalt.

Voorbeeld 2-11

Bepaal het Thevenin equivalent tussen de punten A en B van de schakeling in figuur 2-vb05.



Figuur 2-vb05

Oplossing

Bepalen van U_{TH}:

Tussen A en B is de keten onderbroken. Er vloeit dus geen stroom door R_4 en R_5 waardoor de spanningsvallen over deze weerstanden gelijk is aan $0\ V$. Blijft nog over de spanningsvallen over de serieschakeling $R_2 + R_3$:

$$U_{TH} = U_{AB} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \times U_{bron} = \frac{2{,}2\ k\Omega + 1\ k\Omega}{4{,}7\ k\Omega + 2{,}2k\Omega + 1k\Omega} \times 20\ V = 8{,}1\ V$$

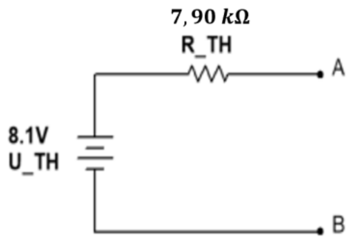
Bepalen van R_{TH}:

De spanningsbron wordt nu als een kortsluiting aanzien. R_{TH} is gelijk aan de totale weerstandswaaarde tussen de punten A en B waarbij U_{bron} is kortgesloten:

$$R_{TH} = R_4 + \{R_1 || (R_2 + R_3)\} + R_5$$

$$R_{TH} = 3{,}3\ k\Omega + \frac{4{,}7\ k\Omega\ \times 3{,}2k\ \Omega}{4{,}7\ k\Omega + 3{,}2\ k\Omega} + 2{,}7\ k\Omega = 7{,}90\ k\Omega$$

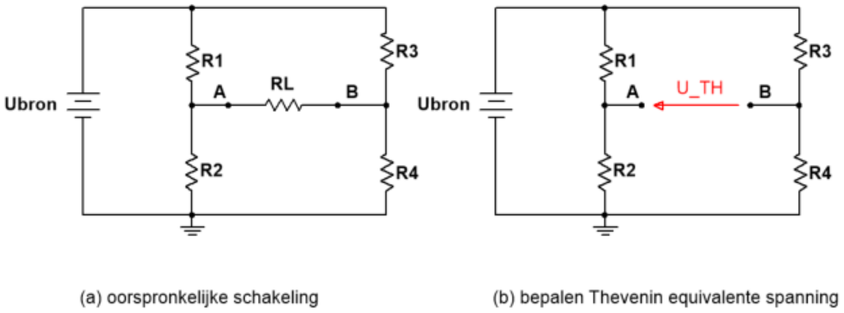
De Thevenin equivalente schakeling van figuur 6-31 is weergegeven in figuur 2-vb06.



Figuur 2-vb06

2.2.1 Thevenin equivalent van een brugschakeling

Figuur 2-5 toont een brugschakeling met een bepaalde belasting R_L tussen de punten A en B. lAls je het Thevenin equivalent bepaalt tussen deze twee punten, vervang je de ganse brugschakeling door een schakeling met één spanningsbron U_{TH} en een weerstand R_{TH}. Hierdoor wordt het gemakkelijker in te zien en te bepalen welke spanning exact over R_L staat en hoeveel stroom er door vloeit. Ook kan je dit Thevenin equivalent gebruiken om te bepalen bij welke belasting maximaal vermogensoverdracht plaatsvind. Later meer hierover.

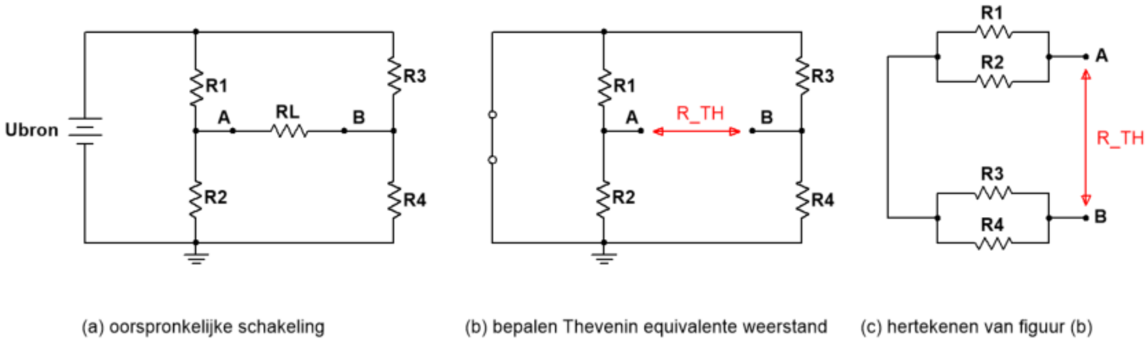


Figuur 2-5 : Bepalen van Thevenin equivalente spanning bij een brugschakeling met belasting

Om het Thevenin equivalent te bepalen verwijder je eerst de weerstand R_L tussen de punten A en B. Wat overblijft is een parallelschakeling van twee spanningsdelers. Dit is weergegeven in de schakeling van figuur 2-5 (b). De Thevenin equivalente spanning is de spanning die tussen deze twee punten staat. Deze kan je bepalen door het verschil te nemen tussen de spanning op punt A met de spanning op punt B. In formulevorm:

$$U_{TH} = U_A - U_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{bron} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times U_{bron}$$

$$U_{TH} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \times U_{bron}$$



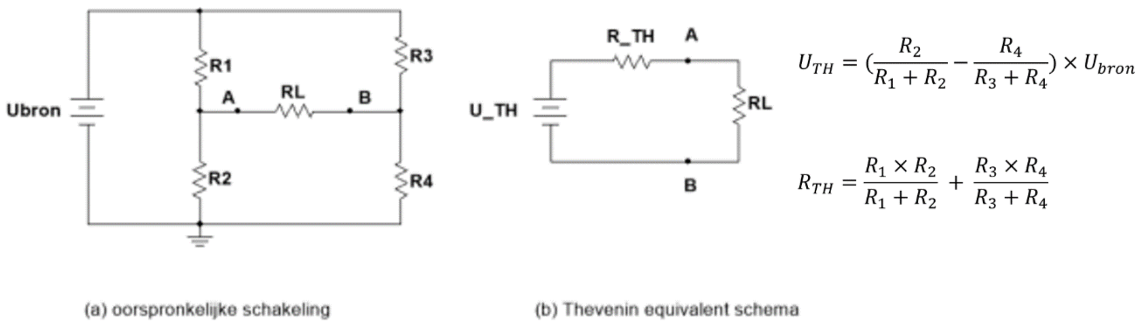
Figuur 2-6 : Bepalen van Thevenin equivalente weerstand bij een brugschakeling met belasting

Figuur 2-6 toont het stappenverloop om de Thevenin equivalente weerstand R_{TH} te bepalen. Om deze weerstand te bepalen wordt eerst $R_L$verwijdert. Vervolgens wordt de spanningsbron kortgesloten en daarna kan je de weerstandswaarde tussen de punten A en B bepalen. In figuur 2-6 (c) is de brug hertekent zodat je gemakkelijk kan inzien dat Thevenin equivalente weerstand tussen A en B bestaat uit een serieschakeing van twee parallelschakelingen. De waarde van R_{TH} is dan als volgt te bepalen:

$$R_{TH} = R_{AB} = R_1||R_2 + R_3||R_4$$

$$R_{TH} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4}$$

Figuur 2-7 geeft het uiteindelijke Thevenin equivalent weer van de brugschakeling. De belasting van dit equivalent schema is de belasting R_L die in de oorspronkelijke brugschakeling tussen de punten A en B stond.



Figuur 2-7 : Thevenin equivalent van een brugschakeling

2.2.2 Samenvatting Theorema van Thevenin

De stappen die je doorloopt om een Thevenin equivalent van een schakeling te bepalen zijn de volgende:

- Stap 1 : verwijder de belasting tussen de twee punten (terminals) vanwaar je het Thevenin equivalent wil bepalen.
- Stap 2 : Bepaal de Thevenin equivalente spanning U_{TH} tussen de twee open punten.
- Stap 3 : Bepaal de Thevenin equivalente weerstand R_{TH} met alle bronnen vervangen door hun inwendige weerstand. Bronnen die ideaal verondersteld kunnen worden hebben een inwendige weerstand gelijk aan $0\ \Omega$.
- Stap 4 : Verbind U_{TH} en R_{TH} in serie met elkaar om het volledige Thevenin equivalent te creëren die de oorspronkelijke schakeling vervangt.
- Stap 5 : Plaats de belasting, die in stap 1 verwijdert was, terug op zijn plaats tussen de twee beschouwde punten. Je kan nu de stroom en spanning berekenen door de belasting via de wet van Ohm. De gevonden stroom- en spanningswaarde aangaande de belasting zijn dezelfde waarden als deze die je via de oorspronkelijke schakeling had berekend.

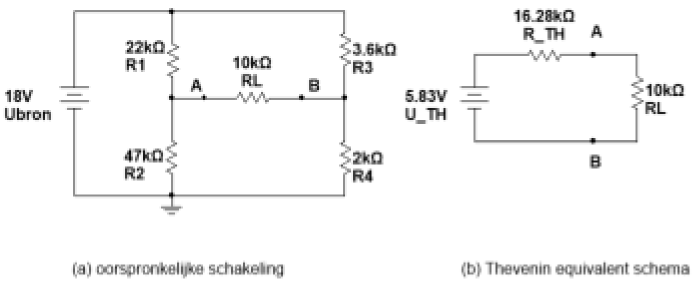
Praktisch bepalen van het Thevenin equivalent van een schakeling:

- Haal de belasting van de schakeling.
- U_{TH} is de spanning die je meet tussen de twee beschouwde punten.
- R_{TH} kan je vinden door een potentiometer tussen de beschouwde punten te plaatsen en deze zodanig te regelen totdat de spanning hierover is gedaald tot de helft van de oorspronkelijke waarde. De weerstand die dan gemeten wordt is de Thevenin equivalente weerstand.

Het Theorema van Thevenin is een nuttige manier om lineaire circuitelementen te vervangen door een equivalente schakeling die kan worden gebruikt voor onderzoek van de invloed van diverse belastingen op het circuit. De eis dat de te vervangen elementen door een Thevenin circuit lineair moeten zijn, plaatsen enkele beperkingen op het gebruik van dit Theorema. Desondanks, als de

Voorbeeld 2-12

Bepaal de spanning over en stroom door R_L van de schakeling in figuur 2-vb07.



Figuur 2-vb07

Oplossing

Stap 1 : verwijder R_L uit de schakeling.

Stap 2: bepalen van de Thevenin equivalente spanning (zie hiervoor ook figuur 2-5) :

$$U_{TH} = (\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}) \times U_{bron}$$

$$U_{TH} = \left(\frac{47\ k\Omega}{22\ k\Omega + 47\ k\Omega} - \frac{2\ k\Omega}{3{,}6\ k\Omega + 2\ k\Omega}\right) \times 18V = 5{,}83\ V$$

Stap 3: bepalen van de Thevenin equivalente weerstand (zie hiervoor ook figuur 2-6)

$$R_{TH} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4}$$

$$R_{TH} = \frac{22\ k\Omega\ \times 47\ k\Omega}{22\ k\Omega + 47\ k\Omega} + \frac{3{,}6\ k\Omega \times 2\ k\Omega}{3{,}6\ k\Omega + 2\ k\Omega} = 16{,}28\ k\Omega$$

Stap 4 : tekenen van Thevenin equivalent schema met aansluiting van R_L (zie figuur 6-36 (b)

Stap 5 : bepalen van U_{RL} :

$$U_{RL} = \frac{R_L}{R_{TH} + R_L} \times U_{TH} = \frac{10\ k\Omega}{16{,}28\ k\Omega + 10\ k\Omega} \times 5{,}83\ V = 2{,}22\ V$$

Stap 6: bepalen van I_{RL}:

$$I_{RL} = \frac{U_{RL}}{R_L} = \frac{2{,}22\ V}{10\ k\Omega} = 222\ \mu A$$

te vervangen schakeling ongeveer lineair is, is Thevenin 's Theorema nuttig om te gebruiken. Dit is het geval voor veel versterkercircuits die we later zullen onderzoeken.

2.2.3 Het maximaal vermogenoverdrachttheorema

Het maximaal vermogenoverdrachttheorema is belangrijk wanneer je moet weten bij welke weerstandswaarde van de belasting de spanningsbron het meeste vermogen levert.

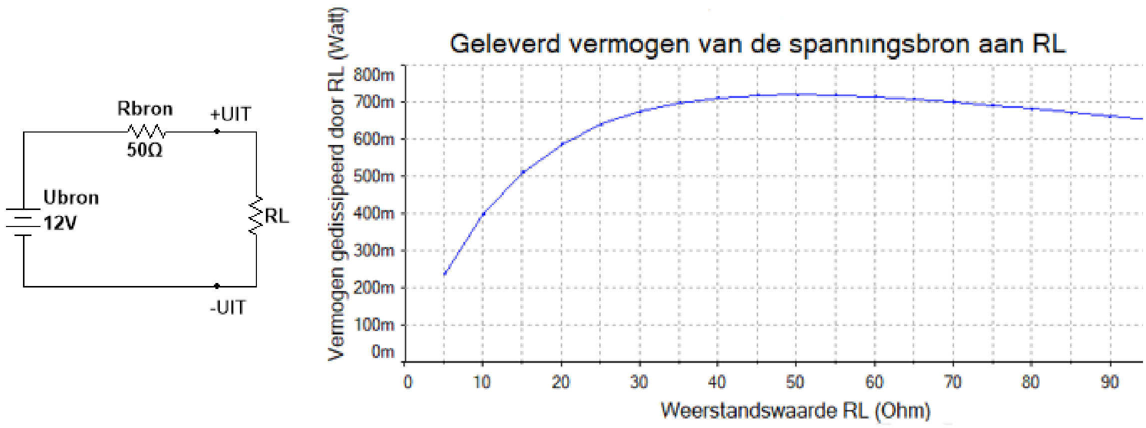
Wat is belangrijk?

- **Je omschrijft wat wordt verstaan onder het vermogenoverdrachttheorema.**
- **Je bepaalt de waarde van de belastingsweerstand waarvoor maximaal vermogen wordt overgebracht vanuit een gegeven schakeling.**

Voor een gegeven bronspanning wordt het maximaal vermogen overgedragen van de bron naar de belasting als de belastingsweerstand even groot is als de bronweerstand. Gezien vanaf de uitgangsterminals van de spanningsbron is de bronweerstand R_{bron} gelijk aan de Thevenin equivalente weerstand van de spanningsbron. Als R_{bron} gelijk is aan R_L dan is er maximaal vermogenoverdracht van de spanningsbron naar de belasting toe.

Bij audioversterkers, radio's, … is de belasting de luidspreker. De schakeling die de luidspreker aanstuurt is een vermogenversterker. Om zoveel mogelijk rendement te verkrijgen van de vermogenversterker moet de uitgangsimpedantie van de vermogenversterker gelijk zijn aan de luidsprekerimpedantie.

Stel een spanningsbron met inwendige weerstand U_{bron} gelijk aan $50\ \Omega$. Hierop wordt een regelbare belasting R_L aangesloten met maximale weerstandswaarde $100\ \Omega$. In figuur 2-8 is de schakeling weergegeven en eveneens een grafiek die het vermogen over R_L weergeeft in functie van zijn weerstandswaarde. Hier is duidelijk te zien dat bij een weerstandswaarde van $50\ \Omega$ de vermogenoverdracht het grootst is.



Figuur 2-8 : Vermogen geleverd aan de belasting is het grootst als de belasting gelijk is aan de Thevenin equivalent weerstand van de spanningsbron/

Om aan te tonen dat het vermogen het grootst is als R_L gelijk is aan R_{bron} bepalen we het vermogen bij belasting gelijk aan $40\ \Omega$, $50\ \Omega$ en $60\ \Omega$:

- Vermogen bij $R_L = 40\ \Omega$:

$$I = \frac{U_{bron}}{R_{bron} + R_L} = \frac{12\ V}{50\Omega + 40\ \Omega} = 0{,}13\ A$$

$$P_{40\Omega} = I^2 \times R_L = (0{,}13\ A)^2 \times 40\ \Omega = 711\ mW$$

- Vermogen bij $R_L = 50\ \Omega$:

$$I = \frac{U_{bron}}{R_{bron} + R_L} = \frac{12\ V}{50\Omega + 50\ \Omega} = 0{,}12\ A$$

$$P_{40\Omega} = I^2 \times R_L = (0{,}12\ A)^2 \times 50\ \Omega = 720\ mW$$

- Vermogen bij $R_L = 60\ \Omega$:

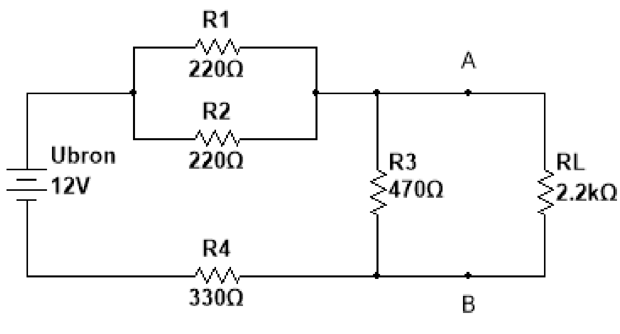
$$I = \frac{U_{bron}}{R_{bron} + R_L} = \frac{12\ V}{50\Omega + 60\ \Omega} = 0{,}11\ A$$

$$P_{40\Omega} = I^2 \times R_L = (0{,}11\ A)^2 \times 60\ \Omega = 714\ mW$$

Voor de weerstandswaarden die verder liggen wordt het gedissipeerde vermogen nog lager (zie grafiek figuur 2-8).

2.2.4 Test jezelf: Theorema van Thevenin

1. **Welke zijn de twee componenten van een Thevenin equivalent schema?**
2. **Definieer R_{TH}.**
3. **Definieer U_{TH}.**
4. **Teken een algemeen schema van een Thevenin equivalent.**
5. **Bepaal het Thevenin equivalent schema van de schakeling van figuur 2-test1.**



Figuur 2-test1

6. **Definieer het theorema voor maximale vermogenoverdracht.**
7. **Wanneer wordt er maximaal vermogen geleverd aan de belasting?**
8. **Een bepaalde versterker heeft een uitgangsimpedantie van 8 Ω. Hoe groot moet de impedan-tie van de luidspreker zijn voor maximale vermogenoverdracht van de versterker naar de luidspreker toe**?

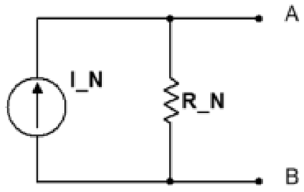
2.3 Het Theorema van Norton

Naast het Thevenin equivalent schema, dat bestaat uit een serieschakeling van een spanningsbron en een weerstand, wordt ook gebruik gemaakt van een equivalent schema dat bestaat uit een parallelschakeling van een stroombron met een weerstand. Deze equivalente schakeling wordt het theorema van Norton genoemd.

Wat is belangrijk?

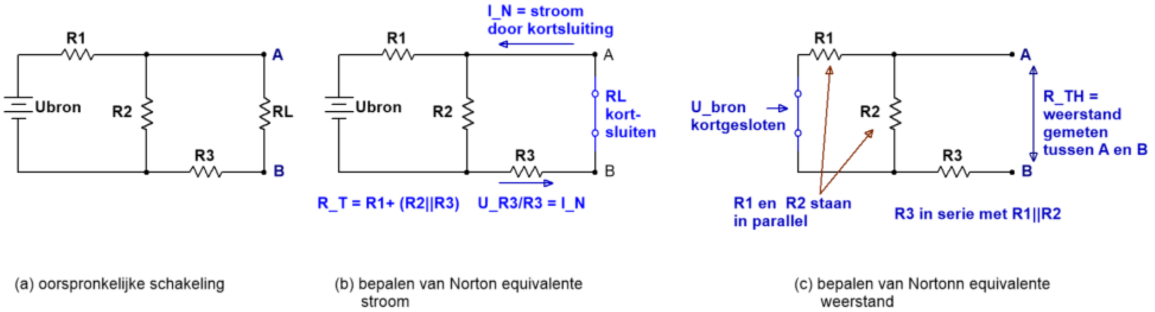
- **Je tekent het Norton equivalent schema en benoemd de componenten ervan.**
- **Je bepaalt van een Norton equivalent schema van een schakeling gezien vanaf twee bepaalde punten.**

Het theorema van Norton gebruikt een parallelweerstand en een stroombron als equivalent schema. Dit is weergegeven in figuur 2-9.



Figuur 2-9 : equivalent schema van Norton

De Norton equivalente weerstand wordt op dezelfde manier gevonden als de Thevenin equivalente weerstand. Je haalt de belasting R_L weg tussen de beschouwde punten, sluit de aanwezige spanningsbron(nen) kort en bepaalt de weerstandswaarde tussen de punten waarop de belasting R_L was aangesloten. Om de waarde van de equivalente Nortonstroom te vinden wordt de belastingsweerstand R_L vervangen door een kortsluiting. De kortsluitstroom is de equivalente Nortonstroom.



Figuur 2-10: Procedure voor het bepalen van het Norton equivalent van een schakeling

In figuur 2-10 is weergegeven hoe een Norton equivalent bepaald kan worden tussen twee punten A en B. Om de Nortonstroom te vinden verwijder je de belasting R_L (zie figuur 2-10 (b)) en sluit je de punten A en B kort. De stroom die door de kortsluiting vloeit, is eveneens de stroom die door de weerstand R_3 vloeit. Deze stroom kan je vinden door de totale weerstand $R\_(R2"||"R3)$ van de parallelschakeling bestaande uit R_2 en R_3 te berekenen. Vervolgens vind je de spanning over R_3 via de spanningsdelerformule. In formulevorm:

$$R_{R2||R3} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3}$$

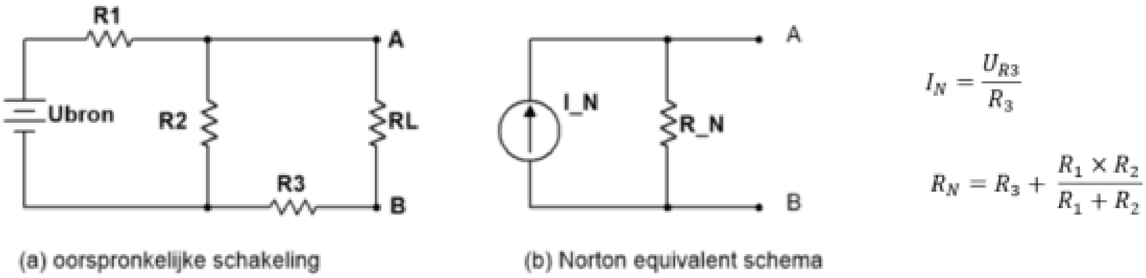
$$U_{R3} = U_{R_{R2||R3}} = \frac{R_{R2||R3}}{R_1 + R_{R2||R3}} \times U_{bron}$$

$$I_N = I_{R3} = \frac{U_{R3}}{R_3}$$

Zoals reeds vermeld worde de Norton equivalent weerstand R_N op dezelfde manier bepaald als de Thevenin equivalent weerstand R_{TH}. In figuur 2-10 (c) is weergegeven hoe je deze weerstand bepaald. Je verwijdert R_L en sluit de spanningsbron U_{bron} kort. Vervolgens bepaal je de totale weerstand tussen de punten A en B. In formulevorm vind je de Norton equivalent weerstand R_N dan als volgt:

$$R_N = R_{AB} = R_3 + (R_1||R_2)$$

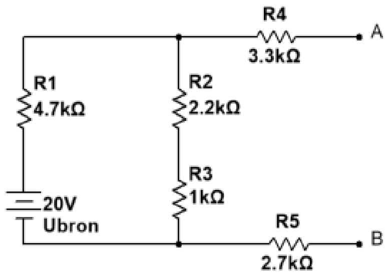
Figuur 2-11 toont het uiteindelijke Norton equivalent schema van de schakeling van figuur 2-10 (a).



Figuur 2-11: (b) is het Norton equivalent schema van de schakeling in (a)

Voorbeeld 2-13

Bepaal het Norton equivalent tussen de punten A en B van de schakeling in figuur 2-vb08.



Figuur 2-vb08

Oplossing

Bepalen van R_N:

De spanningsbron wordt als een kortsluiting aanzien. De Norton equivalent weerstand R_N is in deze situatie de totale weerstand tussen de punten A en B.

$$R_N = R_4 + \{R_1||(R_2 + R_3)\} + R_5$$

$$R_{TH} = 3{,}3\ k\Omega + \frac{4{,}7\ k\Omega\ \times (2{,}2\ k\ \Omega + 1\ k\Omega)}{4{,}7\ k\Omega + 2{,}2\ k\ \Omega + 1\ k\Omega} + 2{,}7\ k\Omega = 7{,}90\ k\Omega$$

Bepalen van I_N:

De punten A en B worden kortgesloten en I_N is de stroom die hierdoor vloeit. Door de punten met elkaar te verbinden is er een verbinding tussen R_4 en R_5. De stroom door deze weerstanden is de Norton equivalent stroom I_N. Door de kortsluiting staat de serieschakeling $R_4 + R_5$ parallel met de serieschakeling $R_2 + R_3$. Bepalen van deze parallelweerstand:

$$R_{parallel} = \frac{(R_4 + R_5) \times (R_2 + R_3)}{(R_4 + R_5) + (R_2 + R_3)} = \frac{(3{,}3\ k\Omega + 2{,}7\ k\Omega) \times (2{,}2\ k\Omega + 1\ k\Omega)}{(3{,}3\ k\Omega + 2{,}7\ k\Omega) + (2{,}2\ k\Omega + 1\ k\Omega)} = 2.09\ k\Omega$$

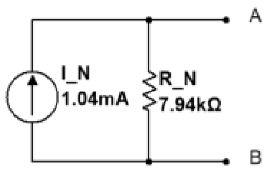
De spanning over deze parallelschakeling:

$$U_{parallel} = U_{R4+R5} = \frac{R_{parallel}}{R_1 + R_{parallel}} \times U_{bron} = \frac{2{,}13\ k\Omega}{4{,}7\ k\Omega + 2{,}13\ k\Omega} \times 20\ V = 6{,}16\ V$$

De Norton equivalente stroom is dan gelijk aan:

$$I_N = \frac{U_{parallel}}{R_4 + R_5} = \frac{6{,}24\ V}{3{,}3\ k\Omega + 2{,}7\ k\Omega} = \ 1{,}04\ mA$$

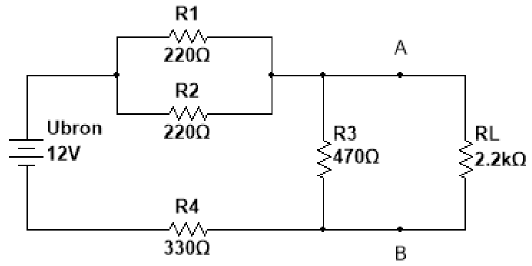
Het Norton equivalent schema is in figuur 2-vb09 weergegeven.



Figuur 2-vb09

2.3.1 Test jezelf : Het theorema van Norton

1. **Welke zijn de twee componenten van een Norton equivalent schema?**
2. **Definieer R_N.**
3. **Definieer I_N.**
4. **Teken een algemeen schema van een Norton equivalent.**
5. **Bepaal het Norton equivalent schema van de schakeling van figuur 2-test2**



Figuur 2-test2

2.4 Superpositietheorema

Bepaalde systemen werken met meer dan één bron. Denk maar aan versterkers waar zowel een AC-bron (bv. audio) als een DC-bron aanwezig zijn. Wanneer er meerdere bronnen gebruikt worden in een schakeling is superpositie een middel om de analyse uit te voeren.

Wat is belangrijk?

- **Je past superpositie toe op schakelingen met meerdere spanningsbronnen.**
- **Je verklaart de verschillende stappen om superpositie toe te passen.**

Wat is superpositie? Superpositie is een manier om stromen te bepalen in een circuit wanneer er meerdere bronnen aanwezig zijn . Hoe?   Door afwisselend één bron in het circuit te laten en de andere te vervangen door hun inwendige weerstanden (deze is $0\,\Omega$ als de bron ideaal kan beschouwd worden) . Het totale resultaat (stromen in de verschillende deelketens) wordt gevonden door de resultaten van iedere bron op te tellen.

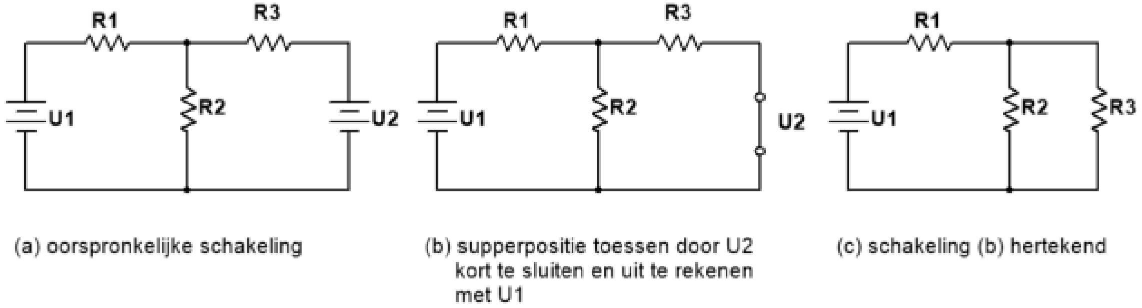
De stappen voor analyse met superpositie :

- ***Stap 1:*** Laat één spanningsbron (of stroombron) in het circuit en vervang alle andere bronnen door hun inwendige weerstand. Voor bronnen die ideaal beschouwd mogen worden is hun inwendige weerstand 0 ohm (kortsluiting). Indien het om een stroombron gaat die ideaal mag worden verondersteld, dan is deze inwendige weerstand gelijk aan oneindig (open keten)

- ***Stap 2:*** Bepaal de specifieke stroom of spanning die je wil weten in het circuit (met één bron in het circuit) Dit is een component van de totale stroom of spanning waarnaar je op zoek bent.

- ***Stap 3:*** Neem de volgende bron in het circuit en herhaal de eerste twee stappen. Doe dit voor elke bron die aanwezig is in het circuit.
- ***Stap 4:*** Om de werkelijke stroom te weten van de stroom die je zoekt, hoef je nu nog algebraïsch de som maken van alle gevonden resultaten met één bron in de schakeling. Eens je de stroom kent, kan je via de wet van Ohm de spanning bepalen

Merk op dat DC-bronnen doorgaans als ideaal zijn te beschouwen. Echter de meeste AC-bronnen zijn dat niet. Vooral functiegeneratoren hebben een inwendige weerstand van 50 Ω of 600 Ω. Stroombronnen zijn doorgaans ook niet ideaal. In het geval van transistoren moeten ze door hun equivalente inwendige weerstand worden vervangen. In figuur 2-12 (a) is een voorbeeldschakeling weergegeven met twee spanningsbronnen en drie weerstanden. Het is de bedoeling om de stroom door R_2 te bepalen. De eerste stap die genomen wordt is één van de spanningsbronnen kortsluiten en vervolgens de stroom bepalen door R_2. Dit is weergegeven is figuur 2-12 (b). Figuur 2-12 (c) toont een hertekend schema van de schakeling van figuur 2-12 (b).



Figuur 2-12 : Superpositie toepassen door eerst spanningsbron U_2 als kortsluiting te aanzien

De volgende stap die genomen wordt is nu met de spanningsbron U_1 de stroom te bepalen die door de weerstand R_2 vloeit. Hiervoor bepaal je eerst de totale weerstand $R_{parallel1}$ van de parallelschakeling met de weerstanden R_2 en R_3. Deze is gelijk aan:

$$R_{parallel1} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3}$$

Van zodra je $R_{parallel1}$ kent, kan je spanning over deze parallelschakeling bepalen via de spanningsdelerformule:

$$U_{Rparallel1} = U_{R2} = \frac{R_{parallel1}}{R_1 + R_{parallel1}} \times U_1$$

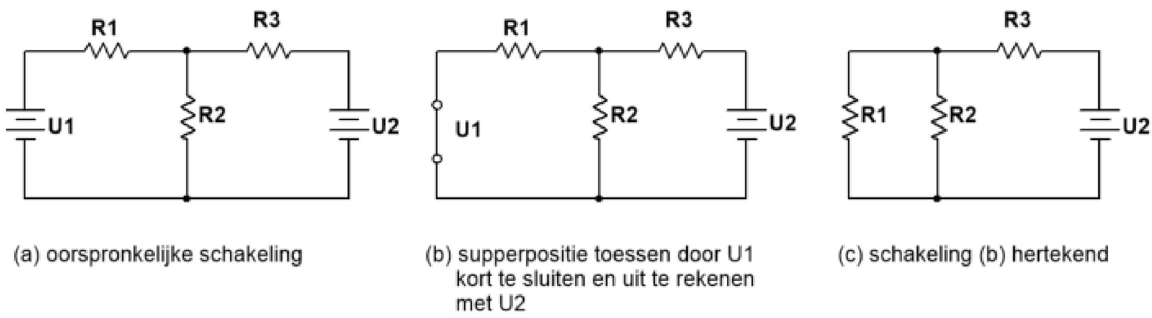
De stroom door de weerstand R_2 kan nu bepaald worden. We noemen deze stroom I_{R2-1} :

$$I_{R2-1} = \frac{U_{Rparallel1}}{R_2}$$

Nu moet je de vorige berekeningen herhalen voor de tweede spanningsbron U_2. Dit wil zeggen je sluit de spanningbron U_1 kort, hertekend het schema voor de duidelijkheid en maakt de noodzakelijke berekeningen om de stroom I_{R2-2} te bepalen. Deze is de stroom die door R_2 vloeit ten gevolge van de spanningsbron U_2. In figuur 2-13 stelt het schema voor met bron U_1 kortgesloten.

Via figuur 2-13 (c) kan zie je dat de schakeling nu bestaat uit een parallelschakeling van de weerstanden R_1 en R_2. De totale weerstand van deze parallelschakeling wordt voorgesteld als $R_{parallel2}$. Deze is gelijk aan:

$$R_{parallel2} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$



Figuur 2-13: Superpositie toepassen door de spanningsbron U_1 als kortsluiting te aanzien

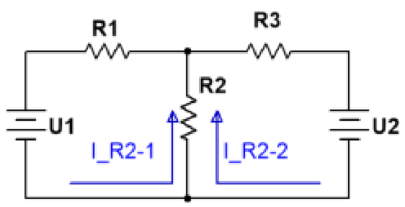
Van zodra je $R_{parallel2}$ kent, kan je spanning over deze parallelschakeling bepalen via de spanningsdelerformule:

$$U_{Rparallel2} = U_{R2} = \frac{R_{parallel2}}{R_3 + R_{parallel1}} \times U_2$$

De stroom door de weerstand R_2 kan nu bepaald worden :

$$I_{R2-2} = \frac{U_{Rparallel2}}{R_2}$$

De laatste stap is de optelling van beide stromen door R_2. Hiervoor dien je ook de zin van de stromen na te gaan. Passen we de elektronenzin toe dan zie je dat beide stromen door R_2 in dezelfde zin vloeien. Dit is weergegeven in figuur 2-14.



Figuur 2-14: De wijze hoe de twee deelstromen, gevonden door toepassing superpositie, door R_2 vloeien

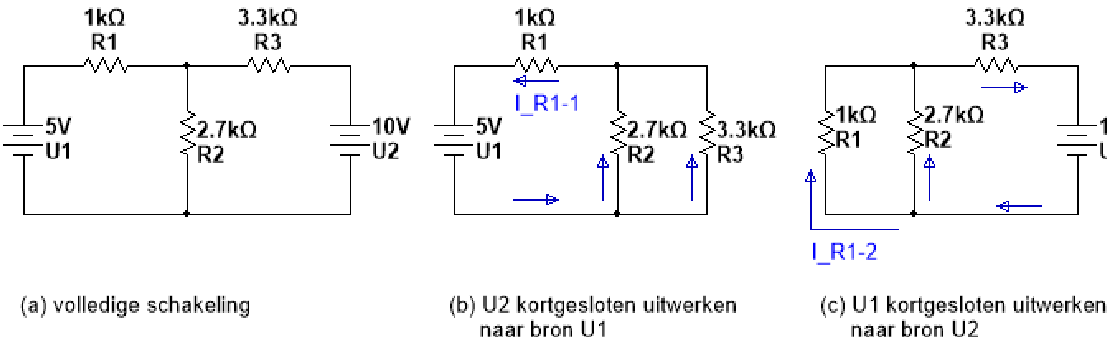
Beide stromen vloeien in dezelfde zin, dus kan je ze optellen. Indien beide stromen tegengesteld vloeien, moet je ze van elkaar aftrekken. Kom je een negatief getal uit dan weet je dat de stroom in de omgekeerde richting vloeit. In dit voorbeeld is de totale stroom I_{R2} door R_2 gelijk aan:

$$I_{R2} = I_{R2-1} + I_{R2-2}$$

$$I_{R2} = \frac{U_{Rparallel1}}{R_2} + \frac{U_{Rparallel2}}{R_2}$$

Voorbeeld 2-14

Gebruik het superpositietheorema om in de schakeling van figuur 2-vb10 (a) de stroom door R_1 te vinden en de spanning over deze weerstand.



Figuur 2-vb10

Oplossing

Stap 1 : De bron U_2 wordt kortgesloten. De totale weerstand die dan vanaf de bron U_1 wordt gezien is gelijk aan :$R_1 + R_2||R_3$.
Uitrekenen van de totale parallelweerstand $R_{parallel1}$:

$$R_{parallel1} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} = \frac{2{,}7\ k\Omega\ \times 3{,}3\ k\Omega}{2{,}7\ k\Omega\ + 3.3\ k\Omega} = 1{,}49\ k\Omega$$

De spanningsval over R_1 kan gevonden worden via de spanningsdelerformule:

$$U_{R1-1} = \frac{R_1}{R_1 + R_{parallel1}} \times U_1 = \frac{1\ k\Omega}{1\ k\Omega\ + 1{,}49\ k\Omega} \times 5\ V = 2\ V$$

De stroom I_{R1-1} door R_1 ten gevolge van U_1:

$$I_{R1-1} = \frac{U_{R1-1}}{R_1} = \frac{2\ V}{1\ k\Omega} = 2\ mA$$

Stap 2 : De bron U_1 wordt kortgesloten. De totale weerstand die vanaf bron U_2 wordt gezien is gelijk aan :$R_3 + R_1||R_2$.

Uitrekenen van de totale parallelweerstand $R_{parallel2}$:

$$R_{parallel2} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_3} = \frac{1k\Omega\ \times 2{,}7\ k\Omega}{1\ k\Omega\ + 2{,}7\ k\Omega} = 730\ \Omega$$

De spanningsval over R_1 kan gevonden worden via de spanningsdelerformule:

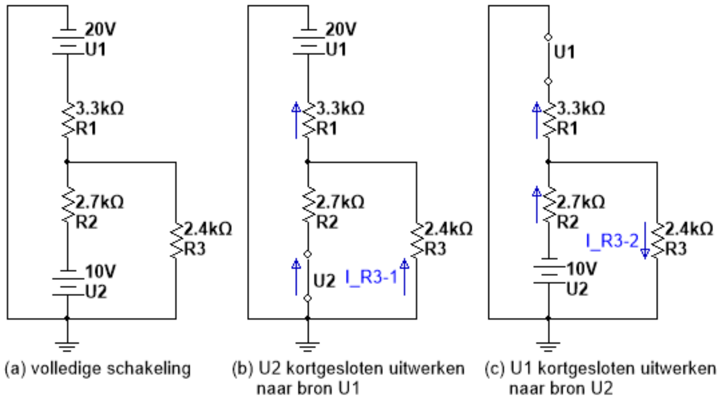
$$U_{R1-2} = U_{Rparallel2} = \frac{R_{parallel2}}{R_{parallel2} + R_3} \times U_2 = \frac{730\ \Omega}{730\ \Omega\ + 3{,}3\ k\Omega} \times 10\ V = 1{,}81\ V$$

De stroom I_{R1-2} door R_1 ten gevolge van U_1:

$$I_{R1-2} = \frac{U_{R1-2}}{R_1} = \frac{1.81\ V}{1\ k\Omega} = 1{,}81\ mA$$

Voorbeeld 2-15

Gebruik het superpositietheorema om in de schakeling van figuur 2-vb11 (a) de stroom door R_3 te vinden en de spanning over deze weerstand.



Figuur 2-vb11

Oplossing

Stap 1 :

De bron U_2 wordt kortgesloten. De totale weerstand $R_{T(U1)}$die vanaf de bron U_1 wordt gezien is gelijk aan :$R_1 + R_2||R_3$. Uitrekenen van de totale parallelweerstand:

$$R_{T(U1)} = R_1 + \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} = 3{,}3\ k\Omega + \frac{2{,}7\ k\Omega\ \times 2{,}4\ k\Omega}{2{,}7\ k\Omega\ + 2{,}4\ k\Omega} = 4{,}57\ k\Omega$$

De totale stroom $I_{T(U1)}$ kan via de wet van Ohm bepaald worden:

$$I_{T(U1)} = \frac{U_1}{R_{T(U1)}} = \frac{20\ V}{4{,}57\ k\Omega} = 4{,}38\ mA$$

De stroom I_{R3-1} kan dan via de stroomdelerformule bepaald worden:

$$I_{R3-1} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \times I_{T(U1)} = \frac{2{,}7\ \ k\Omega}{2{,}7\ k\Omega + 2{,}4\ \ k\Omega} \times 4{,}38\ mA = 2{,}32\ mA$$

Stap 2 :

De bron U_1 wordt kortgesloten. De totale weerstand $R_{T(U2)}$ die vanaf bron U_2 wordt gezien is als volgt te bepalen: :

$$R_{T(U2)} = R_2 + \frac{R_1 \times R_3}{R_1 + R_3} = 2{,}7\ \ k\Omega + \frac{3{,}3\ \ k\Omega\ \times 2{,}4\ \ k\Omega}{3{,}3\ \ k\Omega + 2{,}4\ \ k\Omega} = \ \ 4{,}09\ \ k\Omega$$

De totale stroom $I_{T(U2)}$ kan via de wet van Ohm bepaald worden:

$$I_{T(U2)} = \frac{U_2}{R_{T(U2)}} = \frac{10\ V}{4{,}09\ k\Omega} = 2{,}44\ mA$$

De stroom I_{R3-2} kan dan via de stroomdelerformule bepaald worden:

$$I_{R3-2} = \frac{R_1}{R_1 + R_3} \times I_{T(U1)} = \frac{3{,}3\ \ k\Omega}{3{,}3\ k\Omega + 2{,}4\ \ k\Omega} \times 2{,}44\ mA = 1{,}41\ mA$$

Stap 3 :

Uit de figuren 6-48 (b) en 6-48 (c) valt op te maken dat de stromen I_{R3-1} en I_{R3-2} tegengesteld vloeien door R_3. Als verondersteld wordt dat I_{R3-1} positief is, is de totale stroom I_{R3} door de weerstand R_3 gelijk aan :

$I_{R3} = I_{R3-1} + (-I_{R3-2}) = I_{R3-1} - I_{R3-2} = 2{,}32\ mA - 1{,}41\ mA = 0{,}91\ mA$

De spanning over R_3 kan via de wet van Ohm bepaald worden:

$$U_{R3} = I_{R3} \times R_3 = 0{,}91\ mA \times 2{,}4\ k\Omega = 2{,}18\ V$$

2.4.1 Test jezelf: Superpositietheorema

1. Leg uit wat het superpositietheorema inhoud.
2. Waarom is het superpositietheorema zinvol om te gebruiken voor analyse van schakelingen met meerdere bronnen?
3. Waarom wordt een ideale spanningsbron korgesloten als je superpositie toepast?
4. Als bij superpositie twee stromen in tegengestelde richting vloeien, in welke richting zal dan de uiteindelijke stroom vloeien (resultaat van superpositiebewerkingen)?

2.5 Belangrijke formules

Bepalen van vermogen in functie van energie en tijd	$\boldsymbol{P = \frac{W}{t}}$
Bepalen van vermogen in functie van stroom en weerstand	$\boldsymbol{P = I^2 \times R}$
Bepalen van vermogen in functie van spanning en stroom	$\boldsymbol{P = U \times I}$
Bepalen van vermogen in functie van spanning en weerstand	$\boldsymbol{P = \frac{U^2}{R}}$
Bepalen rendement van een voeding	$\boldsymbol{\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}}$
Bepalen van het uitgaand vermogen van een voeding	$\boldsymbol{P_{OUT} = P_{IN} - P_{LOSS}}$
Totaal vermogen	$\boldsymbol{P_T = P_1 + P_2 + \cdots P_n}$

Maximaal vermogen overdracht $R_L = R_{TH}\ schakeling$

Superpositie :

- ***Stap 1:*** Laat één spanningsbron (of stroombron) in het circuit en vervang alle andere bronnen door hun inwendige weerstand. Voor bronnen die ideaal beschouwd mogen worden is hun inwendige weerstand 0 ohm (kortsluiting). Indien het om een stroombron gaat die ideaal mag worden verondersteld, dan is deze inwendige weerstand gelijk aan oneindig (open keten)

- ***Stap 2:*** Bepaal de specifieke stroom of spanning die je wil weten in het circuit (met één bron in het circuit) Dit is een component van de totale stroom of spanning waarnaar je op zoek bent.

- ***Stap 3:*** Neem de volgende bron in het circuit en herhaal de eerste twee stappen. Doe dit voor elke bron die aanwezig is in het circuit.

Thevenin-equivalent

- **Stap 1** : Verwijder de belasting tussen de beschouwde punten
- **Stap 2** : U_{TH} is de spanningsval die je via berekening bepaalt tussen de beschouwde punten
- **Stap 3** : R_{TH} is de weerstandswaarde tussen de beschouwde punten nadat je de aanwezige spanningsbronnen in de schakeling hebt kortgesloten.

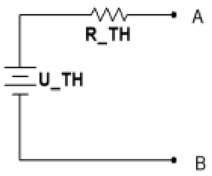
Norton-equivalent

- **Stap 1:** Verwijder de belasting tussen de beschouwde punten
- **Stap 2:** Sluit de beschouwde punten kort en bereken de stroom door deze korssluiting. Deze stroom is I_N
- **Stap 3:** Verwijder de kortsluiting tussen de beschouwde punten en sluit alle spanningsbronnen kort. De weerstand die je nu kan berekenen tussen de beschouwde punten is R_N.

2.6 Oplossingen

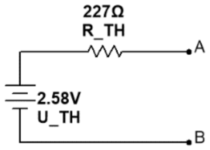
2.6.1.1 Test jezelf : Theorema van Thevenin

1. Een Thevenin equivalent schema bestaat uit een equivalente spanningsbron U_{TH} en een equivalente weerstand R_{TH}.
2. R_{TH} is de equivalente weerstand gezien tussen twee open punten in een schakeling en waarbij alle bronnen vervangen zijn door hun interne weerstand (voor een ideale bron of een bron die ideaal aanzien kan worden is deze interne weerstand $0\ \Omega$.
3. U_{TH} is de spanning tussen twee open punten van de schakeling.
4. Het algemeen schema van een Thevenin equivalent:



Figuur: 6-67

5. Thevenin equivalent schema van figuur 6-68:

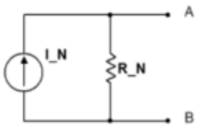


Figuur : 6-68

6. Het maximaal vermogenoverdrachttheorema houdt in dat het maximaal vermogen van een bron wordt overgedragen naar een belasting als de weerstandswaarde van deze belasting gelijk is aan de interne weerstand van deze bron (= interne bronweerstand)
7. Het maximaal vermogen wordt geleverd aan de belasting als de belastingsweerstand gelijk is aan de interne bronweerstand
8. $R_L = R_{bron} = 8\ \Omega$

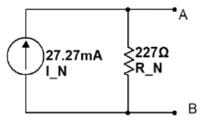
2.6.1.2 Test jezelf : Het theorema van Norton

1. Het Norton equivalent schema bestaat uit een equivalente stroombron I_N en een equivalente weerstand R_N.
2. R_N is de equivalente weerstand gezien tussen twee open punten in een schakeling en waarbij alle bronnen vervangen zijn door hun interne weerstand (voor een ideale bron of een bron die ideaal aanzien kan worden is deze interne weerstand $0\ \Omega$.
3. I_N is de kortsluitstroom tussen twee punten van de schakeling.
4. Algemeen schema Norton equivalent:



Figuur : 6-69

5. Het Norton equivalent van de schakeling van figuur 6-44 :



Figuur :6-70

2.6.1.3 Test jezelf : Superpositietheorema

1. De totale stroom in elke tak van een lineaire schakeling met meerdere bronnen is gelijk aan de algebraïsche som van de stromen van de verschillende bronnen alleen, wanneer deze alleen zijn geactiveerd terwijl de andere bronnen vervangen zijn door hun interne bronweerstand. (voor een ideale spanningsbron of een spanningsbron die als ideaal beschouwd kan worden is de interne bronweerstand gelijk aan $0\ \Omega$.
2. Het superpositietheorema laat toe om iedere bron onafhankelijk te behandelen.
3. Een kortsluiting simuleert de interne bronweerstand van een ideale spanningsbron (0 Ω)
4. De richting waarin de uiteindelijke stroom zal vloeien is de richting van de grootste stroom.