

2 Het meten van spanning en stroom

In het vorige hoofdstuk hebben we kennis gemaakt met de SMU. Hiermee kun je de slimme meter uitlezen. Deze week gaan we bekijken hoe de slimme meter eigenlijk het energieverbruik meet. Om hier inzicht in te krijgen gaan we gebruik maken van de apparatuur die op de labtafel staat, namelijk de labvoeding en de multimeter. Je leert zelf stroom en spanning te meten, en je leert te bepalen hoe nauwkeurig je dit kan doen. Aan het eind van dit hoofdstuk begrijp je ook hoe het meetprincipe werkt dat in de slimme meter wordt toegepast.

2.1 Stroom/spanning meten in de slimme meter

Om thuis het stroomverbruik in kaart te brengen wordt het stroomverbruik gemeten. Dit is waar de kWh meter (kilowattuurmeter) om de hoek komt kijken. In vroeger tijden was dit een prachtig mechanisch telwerk met een draaischijf. Deze meter laat een schijf ronddraaien waarbij het tempo wordt bepaald voor de spanning, de stroom en de faseverschuiving ($\cos \phi$) tussen de spanning en de stroom. Deze faseverschuiving wordt veroorzaakt door het aansluiten van niet-ohmse belastingen. Hier gaan we nu niet verder op in, maar later in de opleiding komt dit nog uitgebreid aan bod!

Tegenwoordig zijn bijna alle woningen voorzien van een slimme meter. Deze meter meet de stroom met behulp van een shunt. Deze shunt maakt een lage spanning welke afhankelijk is van de gemeten stroom. Hoe dit precies werkt gaan we deze week uitzoeken.



Figuur 12: links de mechanische kWh meter, rechts de slimme meter

2.2 Lab-apparatuur

Om zelf stroom en spanning te leren meten gaan we gebruik maken van lab-apparatuur. Hieronder vallen de labvoeding, waarmee je jouw testopstellingen van stroom en spanning kan voorzien, en de multimeter die we gebruiken om van alles mee te meten. Volgende week breiden we dit uit met de oscilloscoop.

2.2.1 Labvoeding

De labvoeding die hier in het lab staat is een Siglent SPD3303X-E. Deze kan ons de spanning en stroom leveren die we nodig hebben om een schakeling te voeden. Het schematische symbool van de spanningsbron is weergegeven in Figuur 13. Vaak wordt dit symbool weggelaten in schema's van elektronische schakelingen, omdat de spanningsbron daar extern wordt aangesloten middels een connector. Een spanningsbron heeft ook geen bouwvorm zoals andere componenten die wel hebben.

Als je de voeding aanzet zie je een scherm met daarop de ingestelde spanning. Spanning is uiteraard in volts zoals te zien op het display. Naast spanning kun je ook de stroom*begrenzing* instellen. Dit is de maximale stroom die de voeding aan de schakeling toelaat. Als je de uitgang van de voeding niet aan hebt dan lees je de ingestelde waarden af. Als je de uitgang van de voeding aanzet komt de spanning beschikbaar op de aansluitbussen (zie Figuur 14) en geeft het display de gemeten waarde aan. De spanning die aan de schakeling wordt aangeboden is af te lezen op het display, de stroom kun je pas aflezen als de stroomkring gesloten is en er dus ook een stroom loopt. Daarvoor moet je wel de juiste uitgang(en) van de voeding aanzetten.

Een korte uitleg over deze gelijkspanningsvoeding vind je op:

<https://www.eleshop.nl/siglent-spd3303x-e-power-supply.html>

Een korte instructie hoe de voeding te gebruiken vind je op ELO: "instructie labvoeding.mp4"



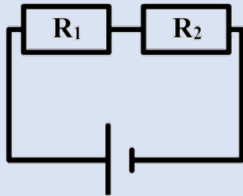
Figuur 13: Schemasymbool van de spanningsbron



Figuur 14: labvoeding SPD3303X-E. De aansluitbussen zijn de ronde bussen onderaan de voeding

THUISOPDRACHT 1:

- Waarom zou je een stroombegrenzing willen gebruiken?
- Stel, we willen onderstaande schakeling bouwen in het lab. We gebruiken een voedingsspanning van 5V en weerstanden van 1kΩ.

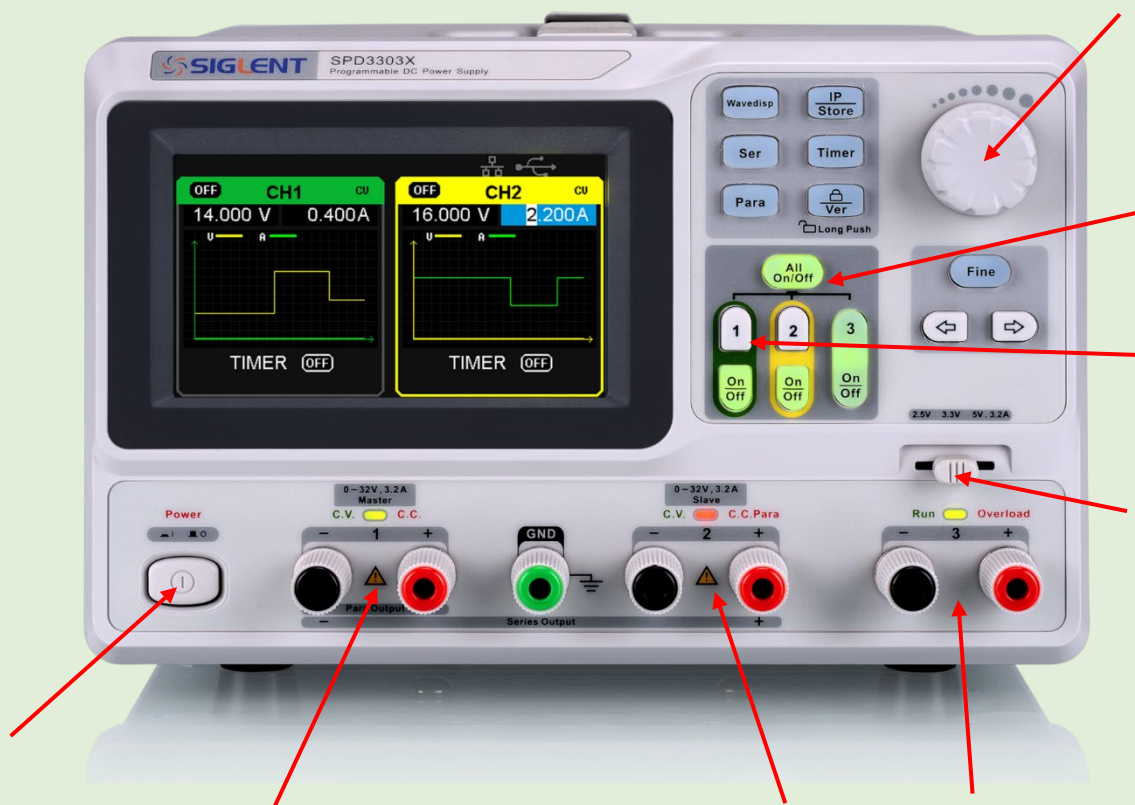


- Wat is dan de stroom die door deze stroomkring gaat lopen?
- Waar stel je dan de stroombegrenzing op in?

- Componenten (zoals weerstanden) hebben een maximaal vermogen dat ze kunnen consumeren. Het vermogen wordt gegeven door $P = U \cdot I$. We sluiten een weerstand van 100Ω en een maximaal vermogen van ¼ W aan op een voedingsspanning van 6V.
 - Wat gebeurt er zonder stroombegrenzing?
 - Waar moeten we de stroombegrenzing op instellen om dit te voorkomen?

LABOPDRACHT 1:

Schrijf bij de pijlen in de volgende figuur de functie van de aangewezen elementen. Probeer de knoppen gerust eens uit!



2.2.2 Digitale Multimeter

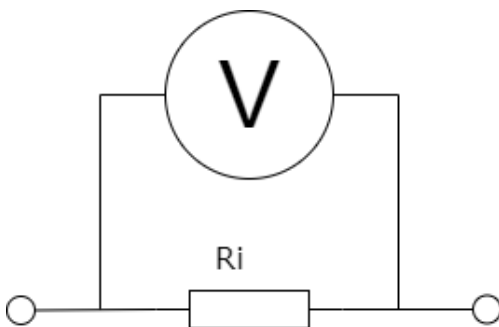
2.2.2.1 Het meten van stroom en spanning

De digitale multimeter is zoals het woord al zegt een meter voor verschillende grootheden. Een multimeter kan stroom, spanning en weerstand meten. Afhankelijk van hetgeen je wilt meten gebruik je andere aansluitingen op de multimeter. In het lab maak je gebruik van de Siglent SDM3045X.

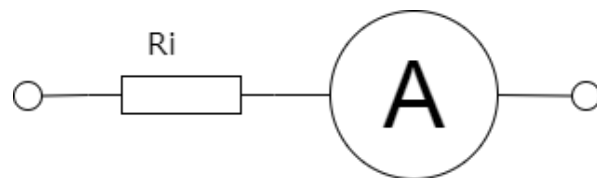


Figuur 15: multimeter SDM3045X

Bij de multimeter gebruik je *altijd* minimaal twee aansluitingen. Een spanning meet je tussen twee punten (een potentiaalverschil). Meestal meet je de spanning ten opzichte van GND, maar je kunt bijvoorbeeld ook de spanning *over* een weerstand meten. Dit doe je door de meter *parallel* met het te meten component in de schakeling op te nemen. Om geen invloed op de meetwaarde uit te oefenen zou de meter een oneindige weerstand moeten hebben. Het is belangrijk om te weten dat de multimeter zelf een inwendige weerstand heeft, die dus niet oneindig is. Dat betekent dat de meter van invloed kan zijn op je schakeling. In de handleiding van de meter kun je vinden hoe groot die inwendige weerstand is. In Figuur 16 zie je het vervangingsschema van de niet ideale spanningsmeter.



Figuur 16: niet ideale spanningsmeter

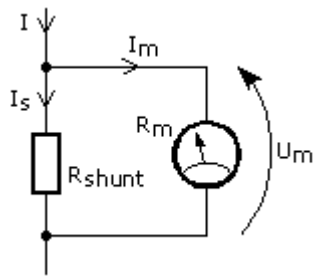


Figuur 17: niet ideale stroommeter

Het meten van de stroom in een schakeling gaat door de meter *in serie* op te nemen. Stroom loopt immers door een (gedeelte van) het circuit. Je moet dus de stroomkring onderbreken om de stroommeter op te nemen. De stroommeting die de multimeter uitvoert (en die ook in de slimme

meter in je meterkast wordt toegepast), is eigenlijk ook een spanningsmeting maar dan over een laagohmige weerstand, genaamd een *shuntweerstand*. Deze shuntweerstand staat dus tijdens de meting in serie met je schakeling en kan ook weer van invloed zijn op je meting. In figuur 17 zie je het vervangingschema van de niet ideale stroommeter.

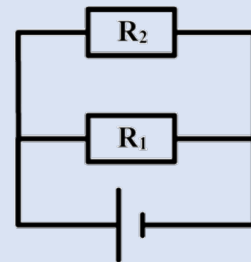
In figuur 18 zie je hoe de shuntweerstand wordt toegepast. I is hier de stroom die je wilt meten. De shuntweerstand (R_{shunt}) wordt hierin geplaatst en de spanning over R_{shunt} wordt gemeten. Omdat R_{shunt} laagohmig is en de multimeter een hoge interne weerstand (R_m) heeft, zal de meeste stroom door de shuntweerstand lopen en kan je de stroom erdoor bepalen.



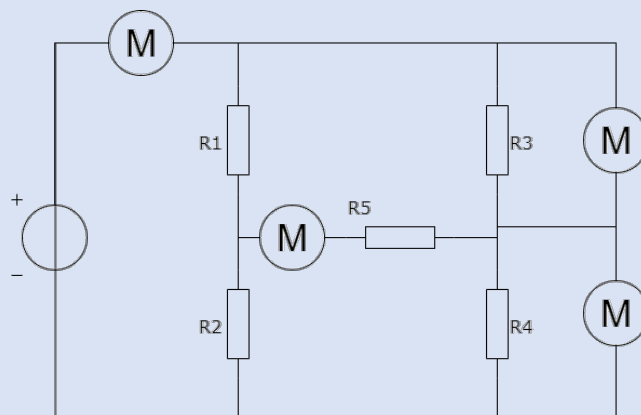
Figuur 18: toepassing van een shuntweerstand

THUISOPDRACHT 2:

- Teken in het schema hiernaast hoe je de multimeter aansluit wanneer je de *spanning* over R_2 wilt meten.
- Teken in het schema hiernaast hoe je de multimeter aansluit wanneer je de *stroom* door R_1 wilt meten.



- In onderstaand schema staan een aantal ideale meters (M). Geef aan welke stroommeters (A) en spanningsmeters (V) zijn.



LABOPDRACHT 2: DE MULTIMETER

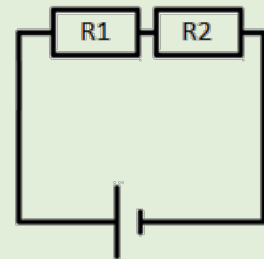
- Geef in onderstaande afbeelding aan welke aansluitingen je moet gebruiken om *spanning* te meten met de multimeter.
- Geef in onderstaande afbeelding aan welke aansluitingen je moet gebruiken om *stroom* te meten met de multimeter.



LABOPDRACHT 3 - INWENDIGE WEERSTAND EN SPANNINGSMETINGEN

- Zoek in de datasheet van de multimeter op wat de inwendige weerstand is bij de *spanningsmeting* (DC).

We gaan er voor de rest van de opdracht van uit dat de inwendige weerstand is ingesteld op 10 M Ω .



- We sluiten twee weerstanden van 1k Ω aan op een voedingsspanning van 10V en meten de spanning over R1. Neem het effect van de inwendige weerstand mee en bereken wat de multimeter zal aangeven. Hoeveel % wijkt dit af van de werkelijke waarde?
- Bouw de schakeling op je breadboard en voer de meting uit. Klopt het met je berekende waarde?
- We doen nog eens hetzelfde, maar gebruiken nu twee weerstanden van 10M Ω . Welke spanning meet je nu met de multimeter? Hoeveel % wijkt dit af van de werkelijke waarde?
- Bouw de schakeling op je breadboard en voer de meting uit. Klopt het met je berekende waarde?
- Beschrijf in welke situaties de inwendige weerstand van je multimeter een grote en een kleine invloed op je metingen zal hebben.

LABOPDRACHT 4 - SHUNTMETING

- Zoek in de datasheet van de multimeter op welke shuntweerstand er worden gebruikt bij DC stroommetingen.
- Waarom wordt bij hoger stroombereik een lagere shuntweerstand gebruikt?
- Ga ervan uit dat de inwendige weerstand van de spanningsmeter 10 MΩ is. Hoe groot is het deel van de stroom dat bij een shuntmeting NIET door de shuntweerstand gaat?
- Levert het gebruik van een shuntweerstand een grote afwijking op?

Nauwkeurigheid van de meting

Naast de fout die de meter veroorzaakt doordat hij niet ideaal is (door de inwendige weerstand) heb je ook nog te maken met de beperkte nauwkeurigheid van de meter. Laten we dat eens beschouwen voor de spanningsmeting. In de handleiding van de multimeter staat de volgende tabel:

SDM3045X Digital Multimeter

Specifications

| DC Characteristic | | Accuracy ± (% of Reading + count) ⁽¹⁾ | | |
|-------------------|-----------------------|--|------------|---------------------------------|
| Function | Range ⁽²⁾ | Test current or Load voltage | Resolution | Accuracy (one year; 23°C ±5°C) |
| DC Voltage | 600 mV | | 0.01 mV | 0.01+ 5 |
| | 6 V | | 0.0001 V | 0.01+ 6 |
| | 60 V | | 0.001 V | 0.02+ 4 |
| | 600 V | | 0.01 V | 0.02+ 6 |
| | 1000 V ⁽³⁾ | | 0.1 V | 0.02+ 6 |
| DC Current | 600 μA | < 33 mV | 0.01 μA | 0.05+ 3 |
| | 6 mA | < 330 mV | 0.0001 mA | 0.05+ 3 |
| | 60 mA | < 0.05 V | 0.001 mA | 0.05+ 3 |
| | 600 mA | < 0.5 V | 0.01 mA | 0.12+ 6 |

Stel ik moet een spanning meten van 5,6 V. Dat lukt niet in het 600 mV bereik, maar wel in het 6 V bereik. Wat meet ik dan precies? Om te beginnen zien we de *resolutie* (resolution) van de meter staan: in het 6 V bereik is deze 0,0001 V. Dat is de kleinste wijziging die ik kan aflezen in dit meetbereik. Daarnaast staat de *nauwkeurigheid* (accuracy). Daar staat een vreemde notatie: 0,01 + 6. Wat betekent dat?

De 0,01 is een percentage (de *relatieve nauwkeurigheid*), deze neem je van de gemeten waarde (dus van 5,6 V). Het tweede getal is het aantal digits (de *absolute nauwkeurigheid*), in dit geval 6. Dat betekent dat je nog 6 x de resolutie er bij moet nemen, dus 6 x 0,0001 V. De totale onnauwkeurigheid is dus $(5,6 / 100\%) \times 0,01\% + 6 \times 0,0001 = 0,00116$ V. Over de gemeten waarde kun je dus zeggen: 5,60000 +/- 0,00116 V.

Onderstaande tabel geeft de onnauwkeurigheid voor de andere meetbereiken.

| Waarde (V) | Meetbereik (V) | Resolutie (V) | Relatieve nauwkeurigheid | | Absolute nauwkeurigheid | | Onnauwkeurigheid (V) |
|------------|----------------|---------------|--------------------------|---------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | % | V | # digits | # digits x resolutie | |
| 5,6 | 6 | 0,0001 | 0,01 | 0,00056 | 6 | 0,0006 | 0,00116 |
| 5,6 | 60 | 0,001 | 0,01 | 0,00056 | 4 | 0,004 | 0,00456 |
| 5,6 | 600 | 0,01 | 0,02 | 0,00112 | 6 | 0,06 | 0,06112 |

Zoals je ziet is het belangrijk om het juiste meetbereik te kiezen om zo de meetfout zo laag mogelijk te houden.

THUISOPDRACHT 3:

Je meet een stroom met de multimeter en leest op het display 2.4056 mA af. Bereken de nauwkeurigheid van deze meting.

2.3 Zelf een meting uitvoeren

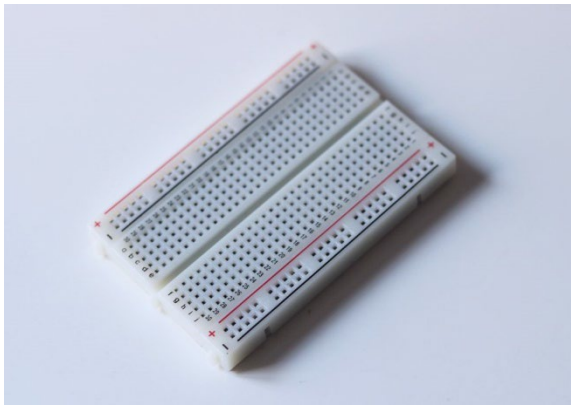
Nu je weet hoe de lab-apparatuur werkt wordt het tijd deze te gaan gebruiken. Dit gaan we doen met behulp van een schakeling die we op een experimenteerbordje (breadbord) gaan opbouwen.

2.3.1 Het breadboard

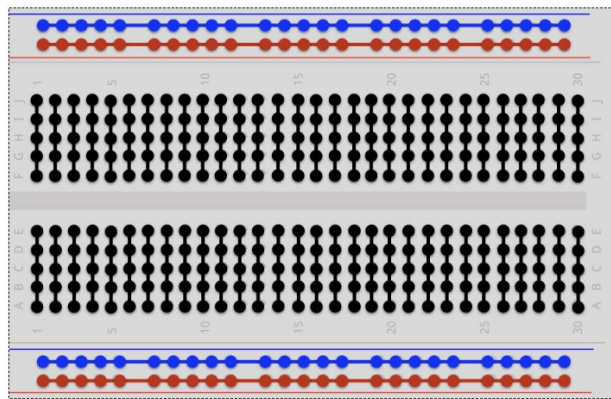
Om experimenten te doen met een beperkt aantal componenten gaan we gebruik maken van het breadboard. In dit bord kun je eenvoudig je componenten plaatsen en verbinden. Dit bespaart een heleboel losse aansluitsnoeren op je meettafel. Over het algemeen gebruik je op het breadboard alleen componenten met aansluitdraden, de zogenaamde *through-hole* componenten. In het breadboard zijn een aantal rijen van contacten onderling doorverbonden zoals weergegeven in Figuur 19 en 20.

De bovenste en onderste twee rijen, aangegeven in blauw en rood, worden gebruikt om je breadboard van voeding te voorzien (contactstrips). Daarvoor prik je een draadje in het meest linker gaatje van de rij en verbind je deze met de voeding/ground. De gaatjes in deze rij zijn allemaal met elkaar doorverbonden. Door een signaal op het eerste gaatje te zetten zijn dus meteen alle gaatjes in diezelfde rij van voeding voorzien.

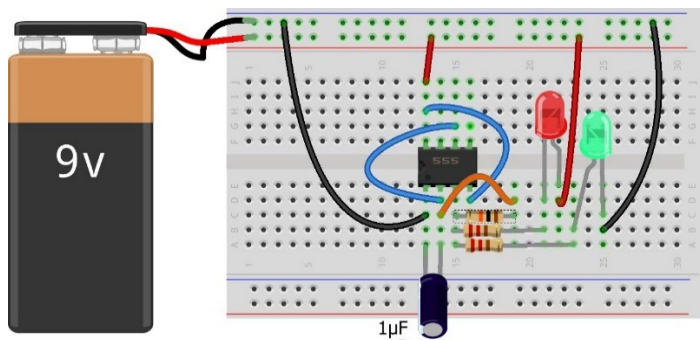
De gaatjes in het midden van het bord, aangegeven in het zwart in de afbeelding, zijn niet per rij maar per kolom met elkaar doorverbonden. Deze gaatjes kan je gebruiken om je componenten in te prikken. Als je een verbinding tussen twee componenten moet maken steek je deze in dezelfde kolom zodat ze doorverbonden zijn.



Figuur 19: het breadboard



Figuur 20: aanwezige verbindingen op het breadboard



Figuur 21: voorbeeldschakeling op een breadboard.

2.3.2 De diode

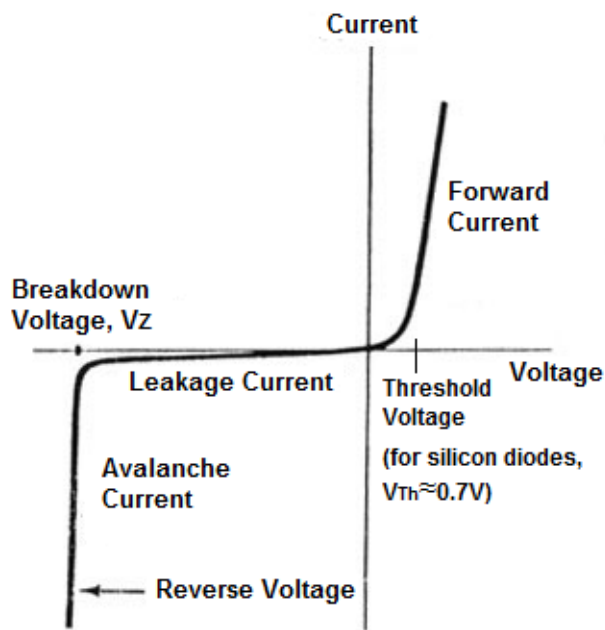
De eerste component waar we deze les kennis mee gaan maken is de diode. De diode is een soort ventiel voor elektrische stroom. De stroom kan wel bewegen in de *geleidingsrichting*, maar niet in de *sperrichting*. Het symbool is te zien in Figuur 22 en laat een pijlvorm zien: de richting van de pijl is de geleidingsrichting.



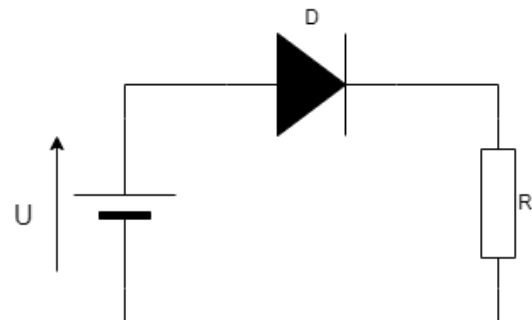
Figuur 22: links schemasymbool, rechts een fysieke bouwvorm (through-hole variant)

Een diode heeft een zekere spanningsval nodig om goed in geleiding te komen, de zogenaamde drempelspanning of kniespanning (threshold voltage). Voor een normale diode is deze spanningsval ongeveer 0,7 V¹. De karakteristiek van een diode is te zien in Figuur 23.

¹ Er zijn ook speciale Schottky diodes waarbij de spanningsval ongeveer 0,2 V bedraagt.



Figuur 23: diodekarakteristiek²

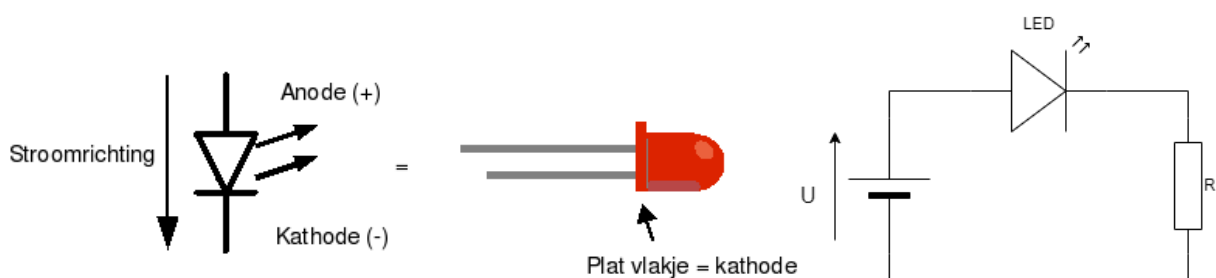


Figuur 24: ompoolbeveiliging

Een bekende toepassing van een diode is de *ompoolbeveiliging*: stel dat je een schakeling maakt die je moet voeden via een externe bron en iemand draait de + en de – om, dan zou je schakeling kapot kunnen gaan. Door een diode in een schakeling te plaatsen kan de stroom maar één kant oplopen en gaat er dus geen stroom lopen als de + en – worden omgedraaid. Houd er bij gebruik van een diode rekening mee dat, door de spanningsval over de diode, de uiteindelijke spanning die bij je schakeling (in dit geval de weerstand R) terecht komt lager uitvalt.

2.3.3 Een speciale diode: de LED

Een bijzondere diode is de LED. LED is een afkorting voor Light Emitting Diode, een diode die licht uitstraalt dus. Alleen als de diode in de geleidingsrichting staat straalt deze licht uit, in de sperrichting niet. Ook deze diode heeft een spanningsval. Afhankelijk van de kleur LED is de spanningsval tussen de 1,4 V en 4 V. De maximale stroom door een LED staat uiteraard in de datasheet, en is afhankelijk van het type LED. Er zijn low-current LED's die vragen een stroomsterkte van ongeveer 2 mA. Andere LED's vragen ongeveer 20 mA. Om te voorkomen dat de stroom te groot wordt (denk aan de diodekarakteristiek) moet deze stroom middels een weerstand worden beperkt. De '+' aansluiting van de LED noemen we ook wel de anode, de '-' aansluiting de kathode.



² https://www.researchgate.net/figure/Panels-A-the-current-voltage-characteristic-curve-for-the-electronic-diode-Panels-B_fig5_289790915

Figuur 25: De LED

Het berekenen van de juiste voorschakelweerstand is eenvoudig. Je gebruikt de welbekende wet van Ohm. Je moet weten welke spanning over de weerstand valt. Dat is de voedingsspanning (U) min de spanningsval over de LED. Ook heb je de stroom door de LED nodig. Stel ik heb een voedingsspanning van 5V, en een spanningsval over de LED van 1.6V, en de stroom door de LED is 2mA dan is de voorschakelweerstand uit te rekenen:

$$R = \frac{U - U_{LED}}{I} = \frac{12 - 1.6}{20 \cdot 10^{-3}} = 520\Omega$$

Je kiest vervolgens een waarde die in de standaard weerstandsreeks beschikbaar is, in dit geval 560Ω.

THUISOPDRACHT 4:

- Zoek de LEDs op in het schema van de SMU (zie p. 10)?
- Welke spanning staat er over de LEDs? (zoek dit op in de datasheet)
- Wat is de outputspanning van de microcontroller?
- Bereken met behulp van de waarde van de voorschakelweerstand in de SMU hoe groot de stroom is die door de LED gaat lopen.

We gaan vandaag metingen uitvoeren aan componenten welke ook in de SMU zitten. Op de print van de SMU zijn dit componenten in een hele kleine SMD bouwvorm. Voor het opbouwen van de schakelingen op het breadboard gebruik je through-hole componenten die in je componentenset zitten.

LABOPDRACHT 5:

Pak een weerstand van 10k en van 1k uit je componentenset en sluit deze *in serie* aan op de labvoeding. Zet de voeding nog niet aan, maar stel hem vast in op 5V.

- Bereken de verwachte stromen en spanningen in deze schakeling. Tip: maak eerst een schema.
 - Waar stel je de stroombegrenzing van de voeding op in bij een voedingsspanning van 5V?
- Zet nu de voeding aan (5V).

- Meet met de multimeter de stroom door de weerstanden en meet de spanning over elke weerstand, en vergelijk dit met de berekende waarde.
- Bereken van de gemeten waarden de onnauwkeurigheid.

Sluit deze weerstanden nu *parallel* aan op de labvoeding. Gebruik een spanning van 5V.

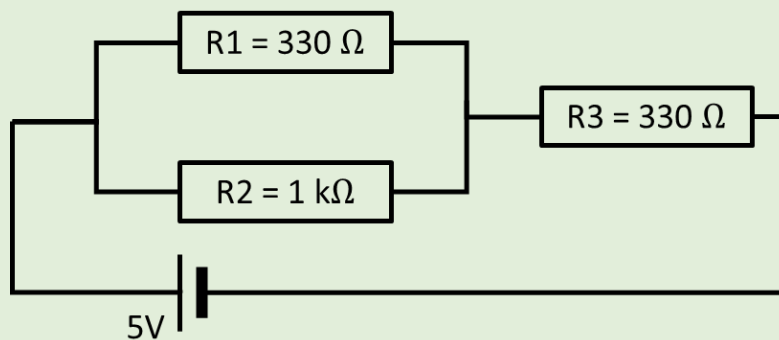
- Bereken de verwachte stromen en spanningen.
- Meet met de multimeter de spanning over de weerstanden en meet de stroom door elke weerstand. Klopt dit met wat je hebt berekend?
- Bereken van de gemeten waarden de onnauwkeurigheid.

Pak een weerstand van 10k en van 10M uit je componentenset en sluit deze in serie aan op labvoeding. Gebruik wederom een spanning van 5V.

- h) Bereken de verwachte stroom en spanning
- i) Meet met de multimeter de stroom door de weerstanden en meet de spanning over elke weerstand, en vergelijk dit met de berekende waardes. Klopt het? Waarom wel/niet?

LABOPDRACHT 6:

Bouw de volgende schakeling op je breadboard op:



- a) Bereken de stroom door iedere weerstand en de spanning over iedere weerstand.
- b) Meet de stroom door R1.
- c) Meet de spanning over R1.
- d) Meet de stroom door R2.
- e) Meet de spanning over R2.
- f) Meet de stroom door R3.
- g) Meet de spanning over R3.

LABOPDRACHT 7:

- a) Pak een LED uit je componentenset en zoek in de datasheet de benodigde spanningsval én de maximale stroom op.
- b) Bereken welke weerstand je minimaal nodig hebt zodat je de LED kunt aansluiten op een spanning van 3,3 V, bij een stroom van 10mA.
- c) Bouw de schakeling op je breadboard en sluit de schakeling aan op de labvoeding. Stel de juiste spanning op de labvoeding in.
- d) Meet met de multimeter:
 - 1. De stroom door de LED
 - 2. De spanning over de LED
 - 3. De spanning over de weerstand
 - 4. Bedenk wat er zou gebeuren er wanneer we de LED direct (zonder weerstand) op de voeding zouden aansluiten? (nog niet uitvoeren)

Controleer of de stroombegrenzing goed is ingesteld.

e) Wat gebeurt er als we de LED zonder weerstand op de voeding aansluiten? Probeer dit uit.

In de SMU is de LED aangesloten op de microcontroller.

f) Zoek in de datasheet op wat de maximale stroom is die een uitgangspen van de gebruikte microcontroller kan aansturen.

g) Kan de microcontroller rechtstreeks een LED aansturen?

VOORTGANGSOPDRACHT 2:

Zodra je er klaar voor bent kan je je docent vragen om de tweede voortgangsoopdracht die afgetekend moet worden om mee te mogen doen aan de eindtoets.

Voor deze opdracht moet je laten zien dat je de volgende dingen kan:

- de nauwkeurigheid van een meting bepalen
- een eenvoudige schakeling opbouwen op een breadboard
- met de multimeter stroom en spanning meten