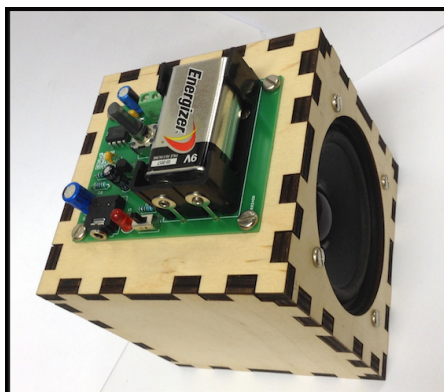


Ontwerp een e-VUBOX



Figuur 1: e-VUBOX

Inhoudsopgave

1	Doelstelling	1
2	Elektronica: componenten en schakelingen	2
2.1	De weerstand	3
2.1.1	Serie en parallel	3
2.2	De spanningsbron	4
2.3	Mini-netwerk	4
2.4	Netwerken	5
3	Bouwstenen van de E-VUBOX	6
3.1	Versterken van audio	7
3.2	De volumeknop: de spanningsdeler	8
3.3	De aan/uit LED: de diode	9
3.4	De versterker: de transistor	11

1 Doelstelling

In dit labo gaan we een eerste stap in de elektronica zetten door zelf een audioversterker te maken, stap voor stap van de basiselektronica tot het finaal product. Tijdens deze opdracht gaan we ook een kijkje nemen in het brein van een ingenieursstudent elektronica wanneer die zo'n taak

vervuld. We gaan beginnen met een inleiding in de elektronica. Daar gaan we kennismaken met basisregels die nodig zijn om componenten en schakelingen te begrijpen en zelf te ontwerpen. Daarna stappen we over naar naar complexere onderdelen, en dan gaan we onze eigen versterker bouwen.

Elektronica is interessant om te bestuderen omdat veel leuke en/of nuttige objecten mogelijk zijn omwille van elektronica. Alledaagse objecten zoals een GSM of een computer bevatten natuurlijk veel elektronica. Maar ook in het ziekenhuis kan je ook toestellen vinden die dagelijks levens redden, zoals een MRI-scanners of een elektrocardiogram. Zelfs, de wereld van entertainment zit boordevol elektronische netwerken: in cameras, schermen, spelconsoles, Virtual Reality, . . . Veel geavanceerde objecten zoals zelfrijdende autos, de automatische piloot in vliegtuigen en andere robots met artificiële intelligentie zouden niet mogelijk zijn zonder o.a. ingenieurs in de elektronica.

Als voor jou stromen, spanningen, de wet van Ohm en de wetten van Kirchhoff geen bekende concepten zijn, volgt hier een overzicht van de wonderlijke wereld van de elektronica met alles wat je moet weten. Indien je dit al hebt gezien, mag je het deel “Elektronica: componenten en schakelingen” snel overlopen en onmiddellijk beginnen met hoofdstuk 3 op pagina 6.

2 Elektronica: componenten en schakelingen

Elektronica is het gebruik van de beweging van elektronen om informatie te verwerken, te versturen of op te slaan. Dit doen we door netwerken van elektronische componenten te bouwen. Elektronische componenten zijn eenvoudige bouwstenen waarmee we complexe schakelingen kunnen bouwen op zo een manier dat die specifieke taken uitvoeren: het ontvangen en versturen van berichtjes met een gsm, het afbeelden van een foto op een scherm en vele andere toepassingen die je elke dag tegenkomt. Je hebt waarschijnlijk een object vol elektronica in jouw broekzak op dit ogenblik!

De schematische voorstelling van elektronische componenten en een netwerk zijn te vinden in Figuur 2. Met pijltjes zijn de twee grootheden aangeduid die in de elektronica opperbelangrijk zijn :

1. de **spanning** (ook voltage of potentiaal genoemd) gemeten in volt [V], vaak aangeduid met de letter V of U . Dit stelt het verschil in potentiële elektrische energie **tussen twee punten**¹. De spanning is altijd een **verschil**: de spanning V over de componenten in figuur 2a is bijvoorbeeld $V = V_2 - V_1$.
2. de **stroom** gemeten in ampère [A], vaak aangeduid met de letter I . Dit stelt de verplaatsing voor van een hoeveelheid ladingen (hier elektronen) door de component per tijdseenheid.

Stroom en spanning veranderen meestal in functie van de tijd, anders zou er natuurlijk niet veel interessants gebeuren. Ze kunnen dan beschreven worden door wiskundige functies zoals:

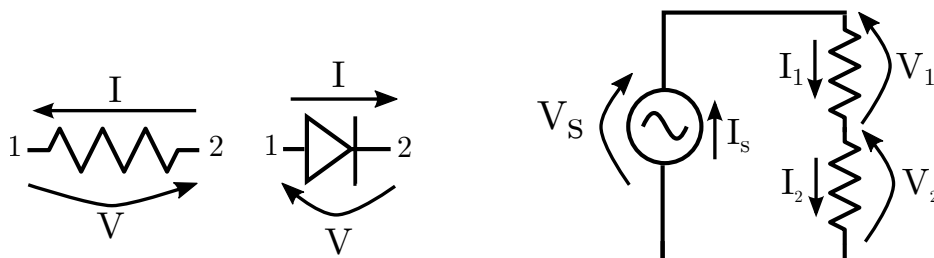
$$I(t) = 0.1A \cdot \sin(t), \quad (1)$$

$$V(t) = 4V \cdot e^{-\frac{t}{10s}}. \quad (2)$$

waar t de tijd is in seconden.

Elke component in de elektronica voldoet aan fysische wetten die zijn stroom en de spanning bepalen. Laten we kennismaken met die fysische wetten, en daarna we gaan onmiddellijk ons eerste netwerk oplossen. We bekijken twee basiselementen van de elektronica: de weerstand en de spanningsbron.

¹Je kent al een maat voor het verschil in potentiële gravitationele energie: de hoogte in meter. Zoals een bal valt van hoog naar laag, gaat een positieve lading lopen van een hoge spanning naar een lage spanning.



(a) Elektronische componenten: een weerstand links en een diode rechts. Men spreekt van de spanning V **over** de pinnen (1 en 2), en de stroom I **door** de component. Let op: de zin van de pijlen heeft belang!

(b) Elektronisch netwerk: een schakeling van componenten. Er is **over** elk component een spanningsval, en **door** elk component een stroom.

Figuur 2: Componenten en een schakeling.

2.1 De weerstand

In figuur 2a zie je de schematische voorstelling van een weerstand. Een weerstand is een geleider die voldoet aan de **wet van Ohm**:

$$V = R \cdot I \quad (3)$$

R is een eigenschap van de weerstand die men ook elektrische weerstand noemt, het is gemeten in Ohm^2 $[\Omega]$. V is de spanning over de weerstand en I de stroom door de weerstand.

Een weerstand kan je zien als een belemmer van stroom: om door een grote weerstand een hoge stroom te laten vloeien moet je een grote spanning aanleggen. Met een kleine weerstand voldoet een kleine spanning om een grote stroom te hebben.

Zo dadelijk volgt een voorbeeld, we gaan eerst zien wat weerstanden in serie en in parallel zijn, en kennismaken met de spanningsbron.

2.1.1 Serie en parallel

Soms kan je twee weerstanden door een weerstand vervangen als ze speciaal samenzitten en dat kan het ontwerpen vergemakkelijken. Dit kan in twee gevallen (zie figuur 3):

- twee weerstanden zijn **in serie**: ze hebben één gemeenschappelijke pin, en dezelfde stroom vloeit door de twee weerstanden, dan is de vervangingsweerstand :

$$R_v = R_1 + R_2. \quad (4)$$

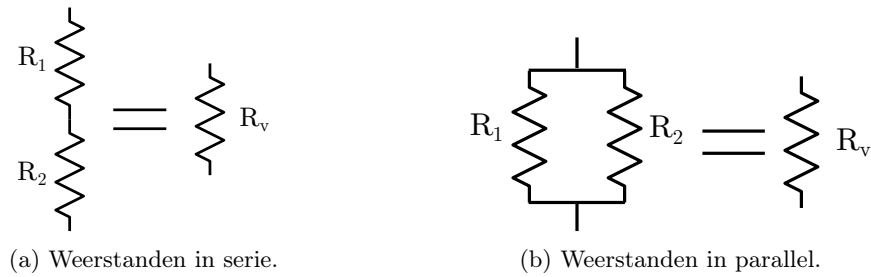
Door weerstanden in serie te plaatsen, krijg je dus een grotere weerstand.

- twee weerstanden staan **parallel**: de twee weerstanden hebben beide pinnen gemeenschappelijk, dus de spanning over de twee is dezelfde. Dan geldt voor de vervangingsweerstand

$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5)$$

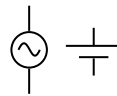
Door weerstanden in parallel te plaatsen, krijg je een kleinere weerstand.

²Georg Simon Ohm (1787 - 1854) was een Duits wiskundige en natuurkundige, ontdekker van de wet van Ohm in 1827.



Figuur 3: Serie en parallel.

2.2 De spanningsbron

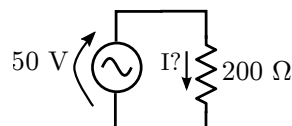


Figuur 4: Spanningsbronnen. Links: de spanning verandert met de tijd. Rechts: de spanning is constant.

Een spanningsbron is een simpel elektronisch component die gehoorzaamt aan een eenvoudige wet: de spanningsbron legt de spanning over zijn pinnen vast, onafhankelijk van de rest van het netwerk. Een 9V-batterij is een voorbeeld van een spanningsbron, die de spanning over zijn pinnen vastlegt op constant 9 V. Een spanningsbron kan een constante spanning opleggen, maar niets verbiedt dat de spanning met de tijd verandert. Beide type bronnen hebben hun eigen schematische voorstelling die je kan vinden in figuur 4.

2.3 Mini-netwerk

We gaan binnenkort weten ontdekken van nog meer componenten, maar met onze voorlopige kennis kunnen we al volgend netwerk oplossen!



Figuur 5: Voorbeeldnetwerkje.

Voorbeeld: Een spanningbron legt een spanning op van 50 V over een weerstand van 200 Ω . Men kan de stroom door de weerstand berekenen op de volgende manier:

$$\text{(Wet van Ohm)} \quad V = R \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{V}{R} \Leftrightarrow I = \frac{50 \text{ V}}{200 \Omega} = 0,25 \text{ A} \quad (6)$$

Doe-het-zelf: Wat is de waarde R van een weerstand waarover een spanning van $V = 25 \text{ V}$ is en waardoor een stroom van $I = 0,1 \text{ A}$ loopt?

.....
.....
.....
Nu we een simpel netwerk kunnen oplossen, gaan we zien hoe we grotere netwerken moeten oplossen.

2.4 Netwerken

Een netwerk is een aaneenschakeling van componenten, die schematisch wordt voorgesteld zoals in figuur 2b. Er zijn maar twee regels die gelden voor elektrische netwerken: de wetten van Kirchhoff³. Samen met de fysische wetten van de componenten kan je dan alle netwerken van de wereld oplossen. Een netwerk oplossen wilt zeggen dat je alle stromen en spanningen bepaalt in dat netwerk.

De stroomwet van Kirchhoff: in elk knooppunt in een elektrische kring is de som van de stromen die in dat punt samenkomen gelijk aan de som van de stromen die vanuit dat punt vertrekken. Dit is voor elk knooppunt geldig, onafhankelijk van de componenten die op de takken zijn.

De spanningswet van Kirchhoff: de som van de elektrische potentiaalverschillen (rekening houdend met de richting) in elke gesloten lus in een kring is gelijk aan nul.

Voorbeeld De stroomwet (figuur 6a) wordt toegepast als volgt: kies een knooppunt in een netwerk. Beschouw alle takken die dat knooppunt raken, en de bijhorende stromen. Pas op, de richting van de stroom-pijlen is zeer belangrijk. Als je alle stromen optelt die **naar** het knooppunt wijzen, dan is dat gelijk aan alle stromen die **weg** van het knooppunt wijzen.

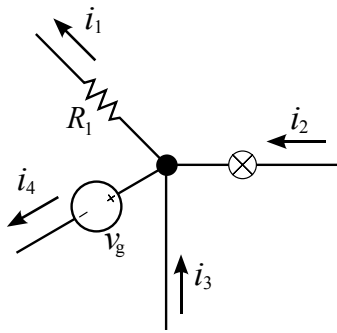
Voor dat we spanningswet toepassen, hebben we de betekenis van het symbool \perp nodig. Dit symbool wordt de **grond** genoemd. Het is geen component, maar een manier aan te duiden dat alle punten met dat symbool eigenlijk verbonden zijn. Je mag dus eigenlijk een connectie tekenen tussen alle pinnen die aan de grond verbonden zijn. Er werd al gezegd dat een spanning altijd gedefinieerd is tussen twee punten. Meestal wordt de grond gebruikt als een van die twee punten, en we zeggen dat de grond op 0 V is.

Voorbeeld De spanningswet (figuur 6b) pas je zo toe: vind een gesloten lus in het netwerk (vergeet niet dat alle pinnen aan grond met elkaar verbonden zijn). Teken een lus met een zekere richting in het netwerk. Schrijf de som van de spanningen rekening houdend met de volgende regels:

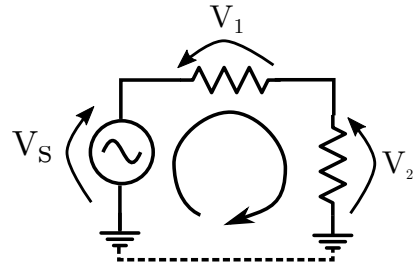
1. Als de spanning in dezelfde richting gaat als de lus, dan krijgt die een positief teken.
2. Als de spanning tegen de lus ingaat, dan krijgt die een negatief teken.

Fun fact: Je kan de vergelijkingen voor serie en parallel weerstanden (sectie 2.1.1) afleiden met behulp van de wetten van Kirchhoff en de wet van Ohm.

³Gustav Robert Kirchhoff (1824 - 1887) was een Duits natuurkundige. Kirchhoff formuleerde zijn spanningswet en zijn stroomwet in 1845, toen hij nog een student was. Slimme kerel!



(a) In dit knooppunt is de stroomwet van Kirchhoff : $i_1 + i_4 = i_2 + i_3$

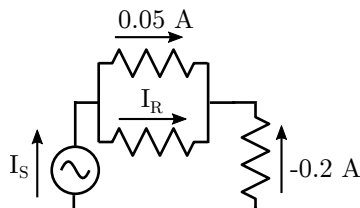


(b) In deze lus is de spanningswet van Kirchhoff : $+V_S - V_1 - V_2 = 0$

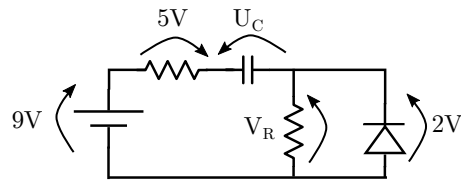
Figuur 6: De wetten van Kirchhoff

Doe-het zelf: Pas de stroomwet van Kirchhoff toe in figuur 7a, en vind de missende strome. Pas de spanningswet van Kirchhoff toe in figuur 7b en vind de spanningen V_R en U_C . Zoals je kan zien, hebben we volledig geen kennis van het netwerk nodig om die te kunnen uitrekenen. Handig!

.....



(a) Vind I_R en I_s .



(b) Vind V_R en U_C .

Figuur 7: De wetten van Kirchhoff

We zijn nu gereed om de bouwstenen van onze versterker te ontwerpen!

3 Bouwstenen van de E-VUBOX

In dit deel gaan we stap voor stap de onderdelen van onze versterker bouwen. We beginnen met een volumeregelaar, omdat we alles al kennen om die te maken. We gaan dan een simpele aan/uit LEDje ontwerpen zodat we weten wanneer onze versterker aan is. Daarna houden we ons bezig met de eigenlijke versterking en gaan we kennismaken met de transistor die ons daarmee gaat helpen.

Maar eerst en vooral: waarom en hoe versterk je muziek?

3.1 Versterken van audio

Ook als je een student in elektronisch ingenieur bent, is een basiskennis in de rest van de wetenschappen toch handig. Want voordat we geluid gaan versterken, moeten we weten wat geluid is!

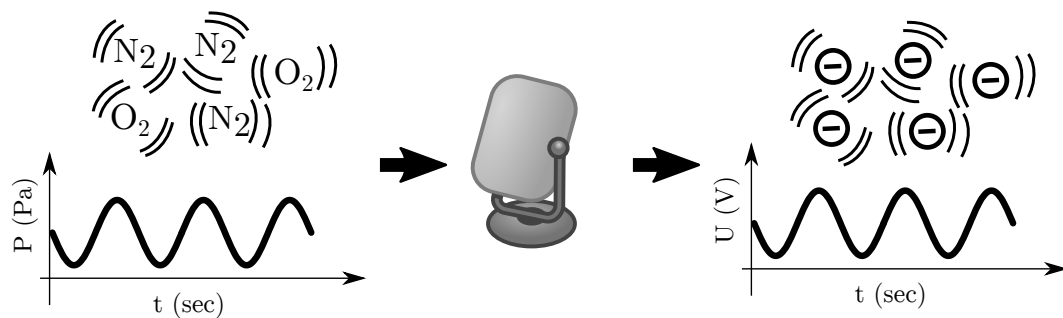
Geluid is een drukgolf door een lucht. De luchtdeeltjes bewegen heen en weer, en wanneer ze jouw trommelvlies raken, hoor je het geluid. Om het te versterken moeten we eerst de drukgolf omzetten naar iets dat een elektronisch schakeling kan gebruiken. Daarvoor dient een microfoon! Het trillen van luchtdeeltjes wordt in een microfoon omgezet naar het trillen van elektronen. Voor de rest van het netwerk is de microfoon eigenlijk een spanningsbron.

Een voorbeeld van een specifiek geluid is een muziknoot. De muziknoot “la” hoor je wanneer de luchtdruk op een zekere plaats golft met een frequentie⁴ van 440 Hz. Je kan de luchtdruk golf die we horen als een “la” wiskundig voorstellen als een sinus:

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t) \quad (7)$$

met $y(t)$ de luchtdruk in Pascal, A de amplitude van de drukgolf in Pascal en t de tijd in seconden.

De microfoon gaat die drukgolf omvormen naar een spanningsgolf, met dezelfde frequentie (zie figuur 8. Men kan die nu versterken met een elektronisch netwerk, omdat we een spanning hebben! Die spanningsgolf kan dan onmiddellijk worden versterkt of opgeslagen in een mp3-bestand en later gebruikt in een muziekspeler.



Figuur 8: Een microfoon vormt de luchtdruk golf (eenheid: Pascal) om in een spanningsgolf (eenheid: Volt).

Om de muziek te kunnen horen moeten we de spanningsgolf terug omzetten naar een luchtdruk golf, en daarvoor gebruiken we een luidspreker, die exact het omgekeerde doet van een microfoon. Maar als we de spanningsgolf onmiddellijk aansluiten aan de luidspreker, gaat het geluid zeer zeer stil zijn. We komen eindelijk in de kern van dit project: het geluidssignaal moet versterkt worden!

Inderdaad, de luidspreker heeft meer ‘schwung’ nodig om luid muziek af te spelen. Om dat te doen moeten we het **elektrisch vermogen** over de luidspreker groot houden. Het elektrisch vermogen dat een component verbruikt wordt berekend als volgt:

$$P = V \cdot I \quad (8)$$

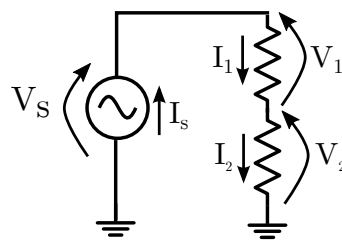
⁴frequentie is het aantal volledige golven (op en neer) per seconde

met P het vermogen in Watt, V het voltage over de component en I de stroom door de component. We moeten door de luidspreker dus veel stroom en een hoge spanning aanleggen (X). Dat is net de bedoeling van een versterker.

Nu dat we weten waarom ons netwerk nuttig is, kunnen we aan de bouw van onze versterker beginnen!

3.2 De volumeknop: de spanningsdeler

We hebben de muziek dus omgevormd naar een spannings-signaal. Stel dat V_s ons muzieksignaal is, en dat we in serie met die spanningsbron twee weerstanden schakelen (figuur 9), dan hebben we een zogenaamde **spanningsdeler** gebouwd. We gaan aantonen de spanning V_2 een verkleinde versie is van het muzieksignaal V_s . Dit is handig als het geluid te luid is, en dat we het volume willen regelen.



Figuur 9: Volumeregeling: de spanningsdeler

Om een netwerk op te lossen hebben we alleen de twee wetten van Kirchhoff nodig. In dit netwerk luiden ze:

$$I_s = I_1 = I_2 \quad (9)$$

$$V_s - V_1 - V_2 = 0 \quad (10)$$

Samen met de wet van Ohm voor de twee weerstanden kunnen we alle stromen en spanningen bepalen.

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 \quad (11)$$

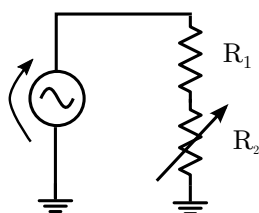
$$V_2 = R_2 \cdot I_2 \quad (12)$$

Doe-het-zelf: Vind nu, dankzij de vier vorige vergelijkingen, de uitdrukking voor de spanning V_2 in functie van V_s , R_1 en R_2 . Omdat we alleen de spanningsverhouding willen weten, mogen er geen stromen voorkomen in de formule.

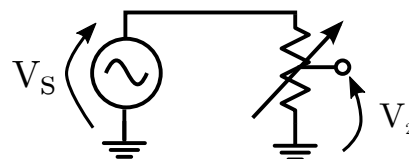
.....

$$V_2 = \dots\dots \quad (13)$$

Je kan zien dat de spanning V_2 , die we de uitgangsspanning noemen, altijd kleiner is dan (of gelijk aan) de ingangsspanning V_s . Daarom noemen we dit een spanningsdeler.



(a) Spanningsdeler met een regelbare weerstand (weerstand met een pijltje).



(b) Spanningsdeler met een potentiometer.

Figuur 10: Types spanningsdelers.

Doe-het-zelf: Je heb een voltage van 9 V als ingangsspanning, en je wilt een voltage van 1.5 V als uitgangsspanning. R_1 is al gekozen en heeft een weerstand van 1 k Ω (1000 Ω). Welke waarde moet je kiezen voor R_2 ?

.....

waardes ge-
 bruiken die
 later nuttig
 gaan zijn voor
 transistor.

$$R_2 = \dots\dots\dots \quad (14)$$

In de praktijk wordt een spanningdeler vaak met een regelbare weerstand gemaakt (zie figuur 10a), zodat de verhouding tussen de in- en uitgangsspanning kan veranderd worden. In figuur 10b zie je een **potentiometer**, dat is een regelbare spanningsdeler. Het is eigenlijk een regelbare weerstand die je in het midden kan aftakken, en dat vormt een spanningsdeler omdat boven de aftakking een weerstand is, en eronder ook.

We gaan een potentiometer gebruiken als volumeknop! Omdat je een potentiometer volledig kunt toe- of opendraaien, maak de grootte van de weerstand niets uit voor de spanningsverhouding. Maar wat wel belangrijk is, is dat er niet te veel stroom door de potentiometer vloeit, want anders wordt er vermogen gebruikt door de volumeknop en gaan onze batterij zeer snel plat zijn.

Doe-het-zelf: Welke weerstand R moet de potentiometer hebben, wetend dat de ingangsspanning V 200 mV ($= 200 \cdot 10^{-3}$ V) is en we het vermogen P willen beperken tot 4 μ W ($= 4 \cdot 10^{-6}$ W)? **Tip:** De formule voor elektrisch vermogen kan je vinden op pagina 7.

.....

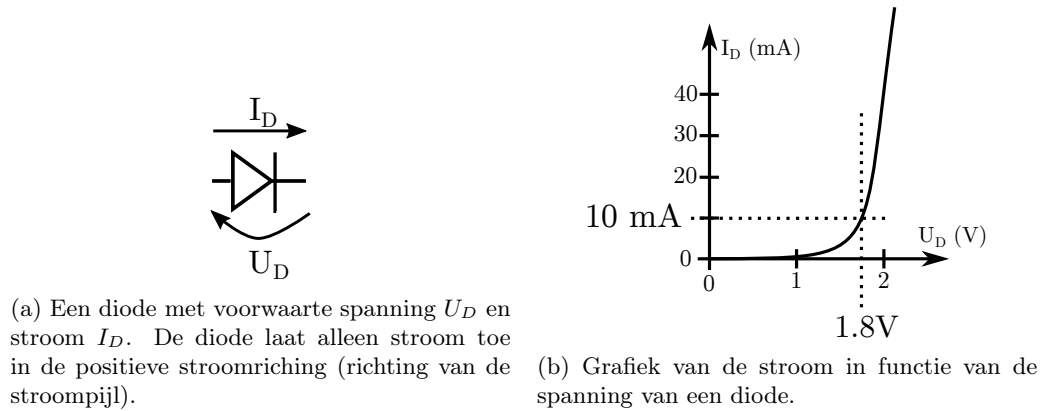
$$R = \dots\dots\dots \quad (15)$$

En zo is onze eerst deel van onze versterker ontworpen! Laten we verder gaan met de aan/uit knop, zodat we snel naar de versterking kunnen gaan.

3.3 De aan/uit LED: de diode

Een handig onderdeel op veel elektronische toestellen is het LED-lampje dat brandt om aan te geven dat het toestel aan is. LED staat voor Light Emitting Diode, dat we kunnen vertalen

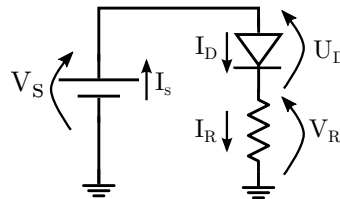
lichtgevende diode⁵. Een diode (figuur 11a) is een heel belangrijke en nuttige elektronische component, die alleen stroom doorlaat in één richting.



Figuur 11: Symbool en grafiek van een diode.

In figuur 11b zie de grafiek van de stroom in functie van de spanning van de diode die we gaan gebruiken in onze versterker. In tegenstelling met de weerstand is de fysische wet van de diode niet-linear (= het is geen rechte), het is een exponentiële functie.

Omdat rekenen met een exponentiële functie onhandig is, gaat een ingenieursstudent meestal eerst proberen om zich te redden met de grafiek. We gaan het circuit in figuur 12 oplossen zonder de moeilijke functie te gebruiken.



Figuur 12: Diode netwerk.

De keuze van de stroom door de LED bepaalt hoe fel het lichtje brand, dus die keuze gaan we als eerste maken. De datasheet⁶ stelt dat 10 mA een typische stroomwaarde is voor onze LED. We zien dat op het grafiek in figuur 11b dat de voltage over de diode dan 1.8V moet zijn. De spanningsbron die we gaan gebruiken in dit netwerk (een batterij) geeft een constant waarde $V_s = 9$ V. We zijn op zoek naar de weerstand die nodig is zodat de $U_D = 1.8$ V en $I_D = 10$ mA. Om het netwerk op te lossen gebruiken we zoals altijd de wetten van Kirchhoff:

$$+V_s - U_D - V_R = 0 \quad (16)$$

$$I_s = I_D = I_R \quad (17)$$

Doe-het-zelf: Kan je de waarde vinden van de weerstand die nodig is? **Tip:** bepaal I_R en V_R uit de wetten van Kirchhoff.

⁵Niet alle diodes zijn lichtgevend, diodes zijn ook van nut voor andere toepassingen.

⁶Een datasheet is een document dat de eigenschappen van elektronische componenten beschrijft.

.....

$$R = \dots\dots\dots (18)$$

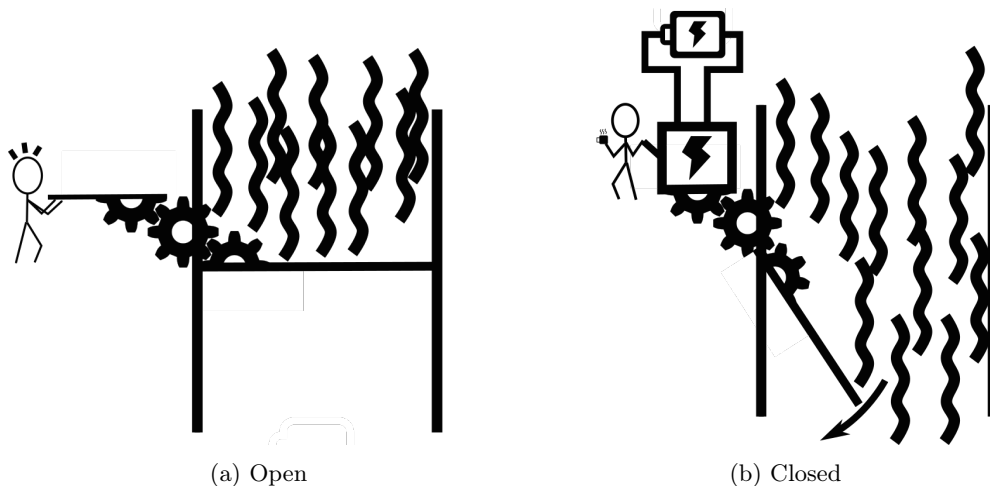
Om de aan/uit LED effectief te laten werken gaan we een schakelaar tussen de bron en de diode zetten zodat het licht alleen brandt wanneer het toetal aan is.

3.4 De versterker: de transistor

De transistor is een actieve elektronische component uitgevonden in 1947, en is het baisingrediënt van alle elektronische netwerken, van simpele versterkers tot een volledige PC. In tegenstelling met passieve componenten zoals de diode en de weerstand hebben actieve componenten nood aan een voeding, een externe energiebron die nodig is om ze te laten werken. Ze kunnen dankzij die extra energiebron (zoals een batterij) energie inpompen in een netwerk, en zijn dus handig voor versterking.

In figuur 13 vind je een kleine personage, Sticky, die verantwoordelijk is om een sluis te openen en te sluiten. Spijtig genoeg is Sticky niet de sterkste, en met een gewoon mechanisme zal het nooit lukken. Maar stel dat je een groot elektrisch motor hebt die de sluis opent en sluit, dan kan Sticky met één vinger de sluis openen en sluiten. De batterij en de motor doen eigenlijk al het werk.

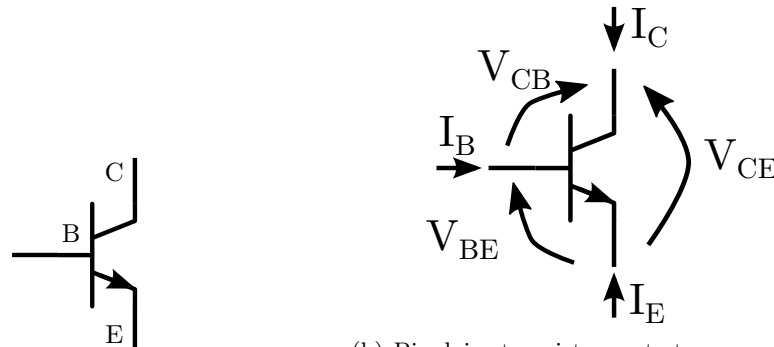
Dit is eigenlijk hoe een transistor werkt! Met een klein controlesignaal (Sticky), kan je een grote stroom controleren. Een transistor kan als een schakelaar gebruikt worden: de stroom is dan ofwel helemaal aan of helemaal uit. De tweede toepassing is als versterker: een kleine golf in het controlesignaal (Sticky maakt en golfje de handvat van de motor) heeft een gigantische golf in de stroom als gevolg.



Figuur 13: Sticky

De transistor bestaat in verschillende types, wij gaan ons beperken tot de *bipolaire NPN* transistor. Zoals je kan zien in figuur 14a is het een component met 3 pinnen, die elk een naam

dragen: de basis, de collector en de emitter. De basisstroom neemt hier de rol op van het controlesignaal.



(a) De bipolaire transistor met Basis, Collector en Emitter aangeduid.

(b) Bipolaire transistor met stromen en spanningen. Alle stromen worden conventioneel **naar** de transistor toe getekend.

Figuur 14: De bipolaire npn transistor.

De fysische wetten die de relatie geeft tussen de stromen en de spanningen noemen de Ebers-Moll vergelijkingen. Zoals met de diode worden die niet vaak gebruikt tijdens het ontwerp. We kunnen dan de grafieken gebruiken, maar voor de bipolaire transistor kunnen ook enkele regeltjes volstaan om te kunnen ontwerpen.

De regels waaraan een transistor zich houdt zijn:

1. De spanning op collector moet positiever zijn dan die op de basis:

$$V_{CB} > 0 \text{ V.} \quad (19)$$

2. De spanningsval tussen basis en emitter is ongeveer 0.7 V:

$$V_{BE} \approx 0.7 \text{ V} \quad (20)$$

3. Als aan de twee vorige regels is voldaan, is de collectorstroom een versterkte versie van de basisstroom:

$$I_C = \beta I_B \quad (21)$$

β (ook als h_{FE} genoteerd) wordt de stroomversterkingsfactor genoemd, en kan typisch 50 tot 250 bedragen. Dit is waarom de nuttig is: een minuscule klein basisstroom geeft aanleiding tot een gigantische collectorstroom.

De wetten van Kirchhoff gelden hier ook⁷:

$$I_C + I_B = -I_E \quad (22)$$

$$V_{BE} + V_{CB} - V_{CE} = 0 \quad (23)$$

Omdat de stroomversterkingsfactor van een transistor niet echt een te vertrouwen waarde heeft (het kan afhangen van temperatuur, waar en wanneer het gemaakt werd, enz...), gaan we niet dat getal in rekening brengen tijdens het ontwerp. We kunnen alleen maar met zekerheid zeggen dat het “groot” is. De transistor lijkt nu niet een heel bruikbaar, maar je gaat zelf een belangrijke vergelijking ontdekken.

⁷We hebben hier eigenlijk de “algemene” wetten van Kirchhoff gebruikt, waarvan de wetten van Kirchhoff die we hebben gezien zijn afgeleid. We kunnen inderdaad hier niet echt een knooppunt en een lus definiëren in het “midden” van de transistor.

Doe-het-zelf: Elimineer I_B van de stroomwet van Kirchhoff met behulp van vergelijking (21). Vind dan een uitdrukking voor I_C . Stel dan dat $\beta = 250$, en rond af. Welke relatie vind je tussen I_C en I_E ?

.....

$$I_C \approx \dots\dots\dots \quad (24)$$

Een negative stroom is perfect mogelijk, dat wilt gewoon zeggen dat de stroom loopt tegen de pijlrichting in van figuur 14b.

En we zijn nu gereed

- biasing V_b : > 0.7 , maar stroom door R_e gaat V_e naar boven halen, V_{BE} moet nog altijd boven staan.