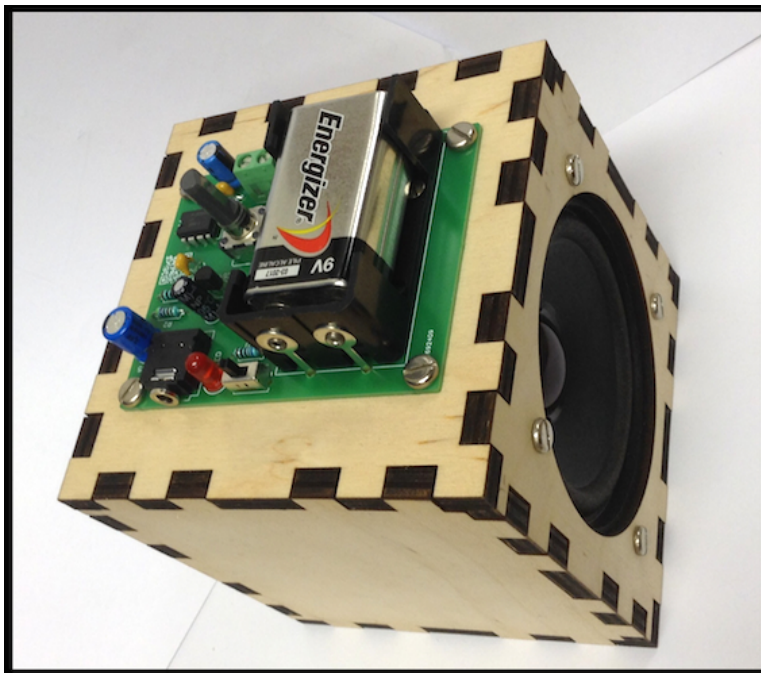


# Project Ingenieurswetenschappen: Elektronisch ontwerp van de e-VUBOX speaker

Vrije Universiteit Brussel

Versie 08.2015



Figuur 1: De prachtige e-VUBOX.

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Doelstelling</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Elektronica: componenten en netwerken</b>	<b>3</b>
2.1	De weerstand . . . . .	4
2.1.1	Serie en parallel . . . . .	5
2.2	De spanningsbron . . . . .	6
2.3	Mini-netwerk . . . . .	6
2.4	Netwerken . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Bouwstenen van de e-VUBOX</b>	<b>9</b>
3.1	Versterken van audio . . . . .	10
3.2	De volumeknop: de spanningsdeler . . . . .	11
3.3	De aan/uit LED: de diode . . . . .	13
3.4	De versterker: de transistor . . . . .	15
3.4.1	De bipolaire npn transistor . . . . .	15
3.4.2	De audio-versterker . . . . .	18
3.5	De magische zwarte doos: IC's . . . . .	23
3.6	De luidspreker . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Knutselen: bouwen van de behuizing en de PCB</b>	<b>26</b>
4.1	De BOX is belangrijk . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Nagerecht</b>	<b>26</b>
6.1	De hoogdoorlaatfilter en de capaciteit. . . . .	26
6.2	Hoe lang gaat de versterker mee? . . . . .	26

# 1 Doelstelling

Elektronische uitvindingen maken deel uit van de grote revoluties van deze eeuw. Van de simpele rekenmachine tot de meest geavanceerde gaming-PC, GPS-satellieten, zelfrijdende auto's, implantaten die het zicht van blinde patiënten herstellen, robots die duizenden objecten per seconde herkennen en een zinnige gesprek met mensen kunnen houden... Die verbluffende uitvindingen worden dagelijks gemaakt en gebruikt.

Al die fascinerende ontwikkelingen kunnen het gevoel geven dat je graag eens zelf elektronische netwerken zou willen bouwen, als je maar wist hoe die miraculeuse elektronica in mekaar zat. Goed nieuws, dit is het net doel van dit project: we gaan de mysteries van de elektronica ontfutselen door **een audio-versterker te bouwen**. Je zal snel zien dat elektronische circuits niet (helemaal) magisch zijn en daarenboven nog goedkoop zijn om zelf te maken!

Laten we beginnen met een overzicht van de wetten en vuistregels van de elektronica. Als je ze al heb gezien, mag je onmiddellijk beginnen met hoofdstuk 3.

# 2 Elektronica: componenten en netwerken

De Van Dale definieert elektronica als "de wetenschap die studie maakt van de geleiding van elektronen en van de mogelijke toepassingen daarvan". Dankzij het schakelen van elektronische componenten in een elektronisch netwerk, kunnen we de elektronen temmen zodat ze ons helpen om specifieke taken uit te voeren zoals het bewegen van een arm van een robot of het versterken van muziek.

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 zeer belangrijk 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 voor in potentiële elektrische energie **tussen twee punten** <sup>1</sup>. Vaak wordt er gesproken van de spanning **op** een punt, dit moet je begrijpen als het spanningsverschil **tussen** dat punt en de grond, een bijzonder punt die je binnenkort ook zal kennen .

---

<sup>1</sup>Je 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.

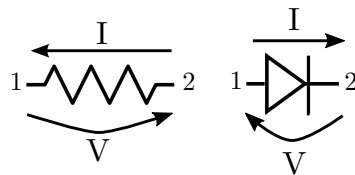
2. de **stroom** gemeten in ampère [A], vaak aangeduid met de letter  $I$ . Dit stelt de verplaatsing voor van een hoeveelheid ladingen (hier elektronen) door de component per tijdseenheid.

Stromen en spanning kunnen constant over de tijd zijn, we spreken dan van DC (Direct Current). Als ze veranderen met de tijd, spreken we van AC (Alternating Current) en kunnen ze beschreven worden door wiskundige functies zoals bijvoorbeeld:

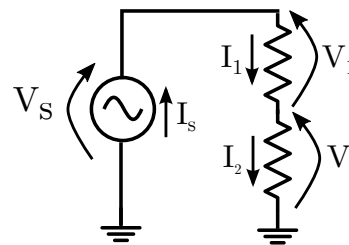
$$I(t) = 0.1\text{A} \cdot \sin(t) \quad (1)$$

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

waar  $t$  de tijd is in seconden.



(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.

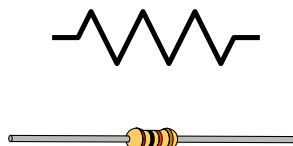
Figuur 2: Componenten en een schakeling.

Heel de magie van de elektronica zit in de componenten die voldoen aan zekere I-V (stroom-spanning) relaties die worden bepaald dankzij hun fysica. Bijvoorbeeld: In de weerstand is de stroom evenredig met de spanning en in de diode vloeit stroom maar in één richting. We gaan interessante componenten leren kennen en gebruiken, en gaan onmiddellijk beginnen met de gewoonste (en meest gebruikte) component: de weerstand.

## 2.1 De weerstand

Een weerstand (figuur 3) is een geleider die voldoet aan de **wet van Ohm** (stroom en spanning zijn evenredig):

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



Figuur 3: De weerstand: schematische voorstelling en reëel component.

$R$  is een eigenschap van de weerstand die men ook elektrische weerstand noemt, met eenheid  $\text{Ohm}^2$   $[\Omega]$ .  $V$  is de spanning over de weerstand en  $I$  de stroom door de weerstand.

Een manier om weerstanden te bezien is als belemmers van stroom. Een grote weerstand heeft een hoge spanningsval nodig om veel stroom te verplaatsen.

### 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 4):

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

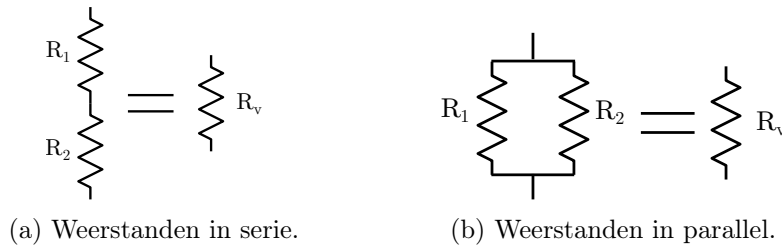
$$R_v = R_1 + R_2. \quad (4)$$

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

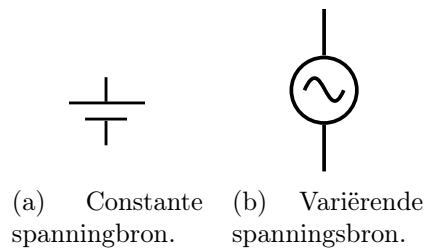
- twee weerstanden staan **parallel**: de twee weerstanden hebben beide pinnen gemeenschappelijk, dus de spanning over de twee is dezelfde. Dan geldt voor de vervangingsweerstand

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

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



Figuur 4: Serie en parallel.



Figuur 5: Spanningsbronnen.

## 2.2 De spanningsbron

Een perfecte spanningsbron is een simpel elektronisch component met twee pinnen die gehoorzaamt aan een eenvoudige wet: de spanningsbron legt de spanning over zijn pinnen op, onafhankelijk van de rest van het netwerk. In werkelijkheid kan een spanningsbron maar een beperkte stroom leveren en gedraagt zich dan als een perfecte spanningsbron met een kleine weerstand in serie. 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 5.

## 2.3 Mini-netwerk

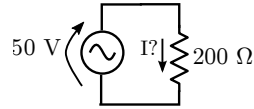
We gaan binnenkort wetten ontdekken van nog meer componenten, maar met onze voorlopige kennis kunnen we al volgend netwerk oplossen!

### Voorbeeld:

Een spanningbron legt een spanning op van 50 V over een weerstand van

---

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



Figuur 6: Voorbeeldnetwerkje.

200  $\Omega$ . 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?

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

Elektronica is meer dan een spanningsbron en een weerstand, dus laten we maar een zien hoe grotere netwerken zich gedragen.

## 2.4 Netwerken

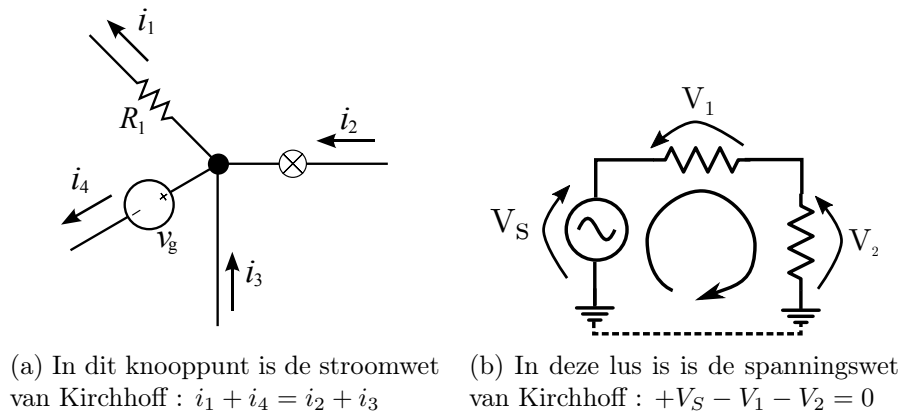
Een netwerk is een aaneenschakeling van componenten, die schematisch wordt voorgesteld zoals in figuur 2b. Er zijn maar twee regels die gelden voor elektrische/elektronische netwerken: de wetten van Kirchhoff<sup>3</sup>. Samen met de fysische wetten van de componenten kan je dan alle netwerken van de 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.

---

<sup>3</sup>Gustav 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!

**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.



Figuur 7: De wetten van Kirchhoff

**Voorbeeld:** De stroomwet (figuur 7a) 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  $\equiv$  nodig. Dit symbool wordt de **grond** genoemd. Het is geen component, maar een manier aan te duiden dat alle punten met dat symbool verbonden zijn. Je mag dus een connectie tekenen tussen alle pinnen die aan de grond verbonden zijn. Herinner U dat een spanning altijd gedefinieerd is tussen twee punten, vaak wordt de grond gebruikt als een van die twee punten, en we zeggen dat de grond op 0 V is.

**Voorbeeld:** De spanningswet (figuur 7b) 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:

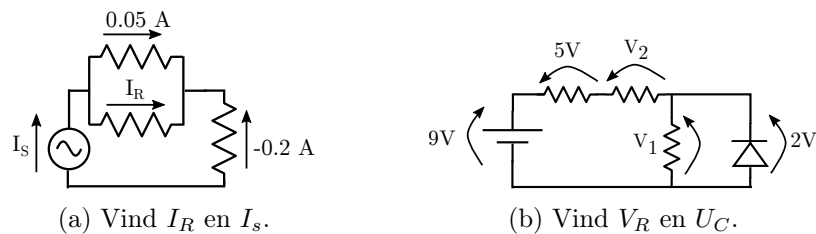
1. Als de spanning in dezelfde richting gaat als de lus, dan krijgt die een positief teken.
2. Als de spanning tegen de lus ingaat, dan krijgt die een negatief teken.



**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.

**Doe-het zelf:** Pas de stroomwet van Kirchhoff toe in figuur 8a, en vind de missende stromen. Pas de spanningswet van Kirchhoff toe in figuur 8b en vind de spanningen  $V_1$  en  $V_2$ . Zoals je kan zien, hebben we volledig geen kennis van het netwerk nodig om die te kunnen uitrekenen. Handig!

.....  
 .....  
 .....  
 .....



Figuur 8: De wetten van Kirchhoff

Dit beëindigt de kennismaking met de elektronica. Je hebt nu alle basis die nodig is om aan de bouw van een versterker te beginnen! Daar gaan we alleen nieuwe componenten leren kennen zoals de diode en de transistor, maar voor de rest is er niets nieuws onder de zon!

### 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 hoe versterk je geluid?

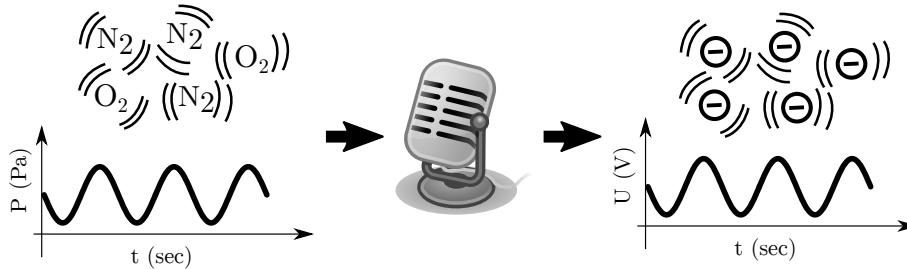
Geluid is een drukgolf door een lucht. De luchtdeeltjes bewegen heen en weer, en wanneer ze jouw trommelvlies raken, hoor je het geluid. Om het te versterken moeten we eerst de drukgolf omzetten naar een elektronengolf, die we gaan versterken, en dan terug naar een drukgolf zodat we het kunnen horen. Daarvoor gebruiken we twee componenten die je zowieso kent: de microfoon en de luidspreker.

De microfoon vormt een drukgolf om naar een spanningsgolf. We kunnen een drukgolf uitdrukken als een sinus, met bijvoorbeeld een frequentie van 440 Hz:

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

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 9).



Figuur 9: Een microfoon vormt de luchtdruk (eenheid: Pascal) om in een spanningsgolf (eenheid: Volt).

Om de muziek te kunnen horen moeten we de spanningsgolf terug omzetten naar een luchtdruk, en daarvoor gebruiken we een luidspreker, die exact het omgekeerde doet van een microfoon.

De luidspreker heeft wel “sterkte” nodig om luid muziek af te spelen. Om dat te doen moeten we het **elektrisch vermogen** over de luidspreker groot maken. Het elektrisch vermogen dat een component verbruikt wordt berekend als volgt:

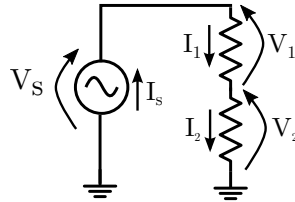
$$P = V \cdot I \quad (8)$$

met  $P$  het vermogen in Watt,  $V$  het voltage over de component en  $I$  de stroom door de component.

Het doel van een versterker is dus om het vermogen van de muziek groter te maken! Nu dat we weten waarom ons netwerk nuttig is, kunnen we aan de bouw van onze versterker beginnen! Het ontwerpen van een versterker is, zoals je het zult zien, vooral het kiezen van veel weerstandswaarden.

### 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 10), 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 10: 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.

.....  
 .....  
 .....  
 .....

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

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.

**Doe-het-zelf:** Je heb een voltage van 9 V als ingangsspanning  $V_s$ , en je wilt een voltage van 1.5 V als uitgangsspanning  $V_2$ .  $R_1$  is al gekozen en heeft een weerstand van 1 k $\Omega$  (1000 $\Omega$ ). Welke waarde moet je kiezen voor  $R_2$ ?

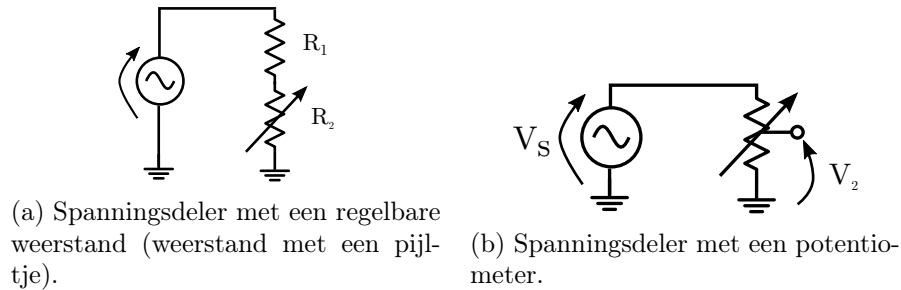
.....  
 .....  
 .....  
 .....

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

In de praktijk wordt een spanningsdeler vaak met een regelbare weerstand gemaakt (zie figuur 11a), zodat de verhouding tussen de in- en uitgangsspanning kan veranderd worden. In figuur 11b 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  $V$  maximaal 200 mV ( $= 200 \cdot 10^{-3}$  V) is en we het vermogen  $P$  willen beperken to 4  $\mu$ W ( $= 4 \cdot 10^{-6}$  W)? **Tip:** De formule voor elektrisch vermogen kan je vinden op pagina 10, de je hebt de wet van Ohm ook nodig.



Figuur 11: Types spanningsdelers.

.....

.....

.....

.....

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

We hebben nu de waarde voor één component van onze versterker al gekozen. Laten we verder gaan met de aan/uit knop, zodat we snel naar de versterking kunnen gaan.

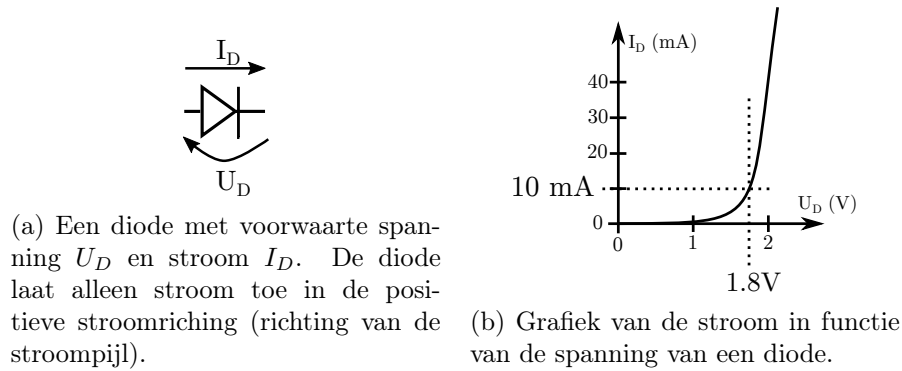
### 3.3 De aan/uit LED: de diode

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 diode<sup>4</sup>. Een diode (figuur 12a) is een heel belangrijke en nuttige elektronische component, die alleen stroom doorlaat in één richting.

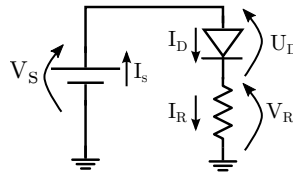
In figuur 12b zie je de grafiek van de stroom in functie van de spanning van de diode die we gaan gebruiken in onze versterker. In tegenstelling met de weerstand is de fysische wet van de diode niet-linear (= het is geen rechte), het is een exponentiële functie.

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 13 oplossen zonder de die moeilijke functie te gebruiken.

<sup>4</sup>Niet alle diodes zijn lichtgevend, diodes zijn ook van nut voor andere toepassingen.



Figuur 12: Symbool en grafiek van een diode.



Figuur 13: 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 datasheet<sup>5</sup> stelt dat 10 mA een typische stroomwaarde is voor onze LED. We zien dat op het grafiek in figuur 12b dat de voltage over de diode dan 1.8V moet zijn. Deze waarde hangt af van de kleur van de LED, een andere LED zou een andere spanningsval nodig hebben. De spanningsbron die we gaan gebruiken voor onze versterker is een 9V-batterij, dus  $V_s = 9 \text{ V}$ . We zijn op zoek naar de weerstand die nodig is zodat de  $U_D = 1.8 \text{ V}$  en  $I_D = 10 \text{ mA}$ . 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.

.....

.....

<sup>5</sup>Een datasheet is een document dat de eigenschappen van elektronische componenten beschrijft.

.....  
 .....

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

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 toestel 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.

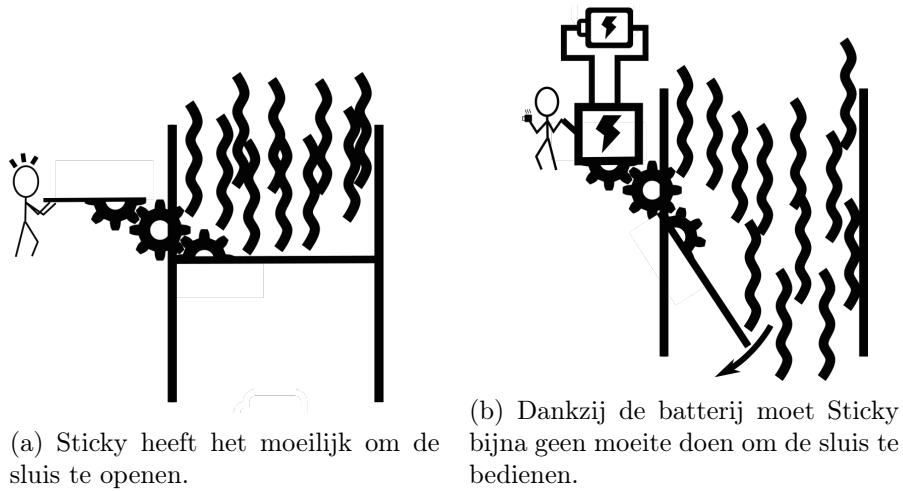
In figuur 14 vind je een kleine personage, Sticky, die verantwoordelijk is om een sluis te openen en te sluiten. Spijtig genoeg is Sticky niet de sterkste, en met een gewoon mechanisme zal het nooit lukken. Maar stel dat er een grote elektrische motor is die de tandwiel doet draaien, dan kan Sticky met één vinger de sluis openen en sluiten. De batterij en de motor doen eigenlijk al het werk voor Sticky.

Dit is eigenlijk hoe een transistor werkt! Met een zwak controlesignaal (Sticky), kan je een grote stroom controleren. Dit is heel vaak nuttig, omdat signalen die komen uit optische sensoren, temperatuursensoren of micro's vaak heel zwak zijn.

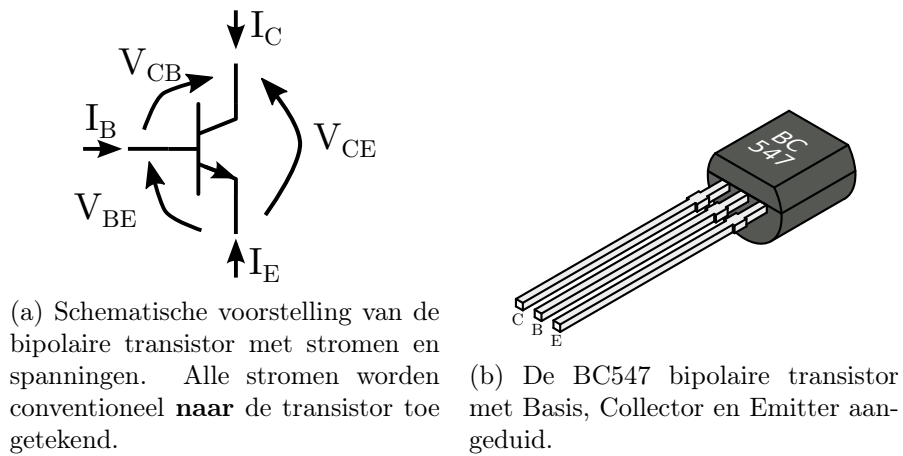
Een transistor kan als een schakelaar gebruikt worden: de stroom is dan ofwel helemaal aan of helemaal uit. De tweede toepassing is de versterker: een kleine golf in het controlesignaal (Sticky maakt en golfje met de handvat van de motor) heeft een gigantische golf in de stroom als gevolg.

#### 3.4.1 De bipolaire npn transistor

Transistoren bestaan in verschillende types, wij gaan ons beperken tot de *bipolaire NPN* transistor. Zoals je kan zien in figuur 15b is het een component met 3 pinnen, die elk een naam dragen: de basis, de collector en de emitter. De stroom  $I_B$  (de basisstroom) is het controlesignaal die de rol opneemt van Sticky uit het verhaal hierboven.



Figuur 14: Het verhaal van Sticky.



Figuur 15: 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, omdat ze te complex zijn. We kunnen dan de grafieken gebruiken, maar voor de bipolaire transistor is er nog een derde weg: enkele regeltjes volstaan om te kunnen ontwerpen.

De regels waaraan een bipolaire transistor zich moet houden 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.  $I_C, I_B$  en  $V_{CE}$  moeten binnen bepaalde maximale waarden liggen, of de transistor gaat stuk (een transistor kan letterlijk in brand schieten, let op!).
4. Als aan de drie vorige regels is voldaan, dan is de collectorstroom een versterkte versie van de basisstroom:

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

$\beta$  (ook als  $h_{FE}$  genoteerd) wordt de stroomversterkingsfactor genoemd, en is typisch groter dan 50, en kan soms 800 gaan. Dit is waarom de nuttig is: een minuscule kleine basisstroom controleert een veel grotere collectorstroom.

De wetten van Kirchhoff gelden hier ook<sup>6</sup>:

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

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

De stroomversterkingsfactor  $\beta$  van een transistor is niet echt een te vertrouwen waarde: het kan afhangen van temperatuur, waar en wanneer het gemaakt werd, enz. . . ). We gaan dat getal niet in rekening brengen tijdens het ontwerp, omdat we alleen met zekerheid kunnen stellen dat het “groot” is. Maar dat is genoeg om een heel belangrijke conclusie te kunnen trekken...

---

<sup>6</sup>We 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  $I_E$ ?

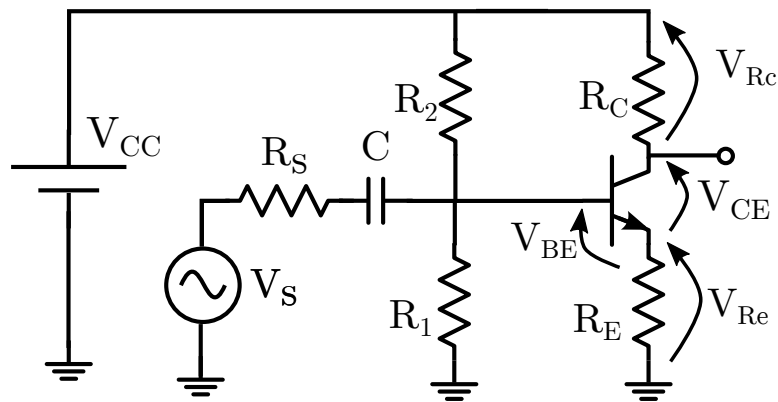
.....  
 .....  
 .....  
 .....

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

Een negative stroom is perfect mogelijk, dat wilt gewoon zeggen dat de stroom loopt tegen de pijlrichting in van figuur 15a. We zijn nu gereed om een versterkerschakeling op te lossen!

### 3.4.2 De audio-versterker

In figuur 16 vind je een audio-versterker, waar je de bipolaire transistor in herkent. Je ziet dat we een actief netwerk hebben, er is een externe energiebron: de batterij  $V_{CC}$ . Je hebt dan de muziek die we gaan versterken in de spanningsbron  $V_S$ .



Figuur 16: Versterkerschakeling met de transistor.

In serie geschakeld met de spanningsbron  $V_S$  is er een weerstand  $R_s$  en een nieuwe component, de capaciteit  $C$  (eenheid : Farad).  $R_s$  is de weerstand van de spanningsbron, die ons eigenlijk verveeld maar die in de werkelijkheid altijd aanwezig is. Het is de vaak klein genoeg dat ingenieursstudenten hem mogen verwaarlozen ( doen alsof  $R_s = 0\Omega$ ).

De capaciteit is een component die voldoet aan de wet :

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt} \quad (25)$$

Dat betekent ruwweg dat capaciteiten alleen reageren op *verandering in de spanning*, en niet op constante waarden. Zonder het te bewijzen kunnen we verklappen dat het gevolg van die capaciteit is dat de spanning in het knooppunt<sup>7</sup> 1 de som gaat zijn van  $V_s$  en van de spanning omwille van de weerstandsdeler  $R_1, R_2$  en  $V_{CC}$ :

$$V_B = V_s + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad (26)$$

Om de versterker te ontwerpen moeten we de weerstanden  $R_1, R_2, R_E$  en  $R_C$  kiezen. Een eerste vergelijking die belangrijk gaan we nu afleiden: de spanningsversterking van dit netwerk.

**Doe-het-zelf:** Vind een uitdrukking voor de spanning aan de collector  $V_C$  in functie van de basisspanning  $V_B$ , en vind dat je de spanning  $V_B$  versterkt. We hebben volgende vergelijkingen die we kunnen gebruiken:

- de spanningswet van Kirchhoff

$$V_{Re} + V_{CE} + V_{Rc} - V_{CC} = 0 \quad (27)$$

- de transistorvergelijkingen

$$V_{BE} = V_B - V_E = 0.7 \text{ V} \quad (28)$$

$$I_C \approx -I_E \quad (29)$$

$$V_{CE} = V_C - V_E > 0 \quad (30)$$

- de weerstandsvergelijkingen

$$V_{Rc} = R_C \cdot I_C \quad (31)$$

$$V_{Re} = -R_E \cdot I_E \quad (32)$$

De wet van Ohm geldt als de spanning- en stroomrichting tegengesteld zijn. Indien ze in dezelfde richting zijn, komt er een minteken in de wet.

---

<sup>7</sup>Herinner U: Als we spreken van een spanning in een punt, bedoelen we eigenlijk de spanningsval tussen dat punt en de grond.

**Tip:** één manier om het te vinden: druk de stroom uit door  $R_C$  met de wet van Ohm. Die is nodig om de spanning  $V_E$  te vinden die je dan gebruikt om  $V_B$  te vinden. Vorm de vergelijking dan om om  $V_C$  te isoleren.

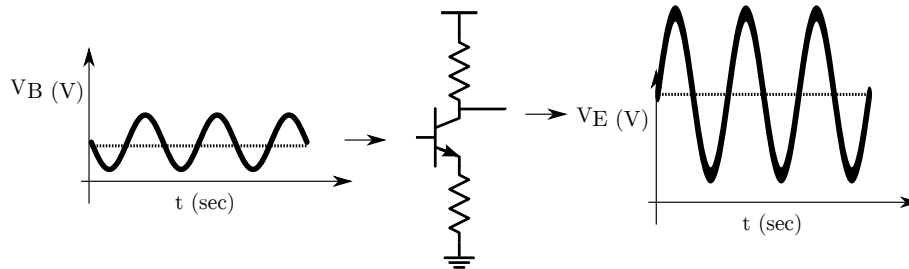
.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

$$V_C = ..... \quad (33)$$

We kunnen de constante (DC) termen eventjes vergeten en drukken alleen de tijdsvariërende (AC) spanning gedeelte uit van  $V_C$ , die we met kleine letters noteren:

$$v_c = -\frac{R_C}{R_E} \cdot v_b \quad (34)$$

Deze schakeling versterkt dus de spanningsgolf met een factor  $-\frac{R_C}{R_E}$ , de muziekgolf wordt dus omgedraaid en de amplitude versterkt! De andere DC waarde wilt alleen zeggen dat het gemiddelde van de golf zich verplaatst, zoals je kan zien in figuur 17.



Figuur 17: De ingangsgolf wordt door ons netwerk omgedraaid en versterkt, en het gemiddelde verschuift.

We gaan nu een ontwerpmethode volgen waar verschillende keuzes moeten gemaakt worden, waaruit de waardes voor de weerstanden uit volgen. Eens je de methode kent, kan je andere keuzes proberen maken en zien als het werkt: dit is wat ontwerpen is! Niet alle designers gaan het graag zeggen,

maar een groot deel van ontwerp is vallen en opstaan: uitproberen tot dat het werkt. En daar is niets mis mee (als je maar niets opblaast)!

De methode gaat als volgt:

1. Kies de typische stroom  $I_C$ . De maximumwaarde die de transistor aankan is  $100\text{ mA}$ , dus het moet kleiner. Te grote stromen gaan ook de batterij sneller leegzuigen, te kleine stromen kunnen de werking van het netwerk stopzetten. Er zijn nog andere voor- en nadelen die je kan uitzoeken voor te grote of te kleine stromen. We kiezen als voorbeeld:

$$I_C = 10\text{mA} \quad (35)$$

2. Kies een typisch voltage  $V_C$ , waar de muziekgolf rond gaat variëren. Dit noemen we het instelpunt. De spanning  $V_C$  moet groter zijn dan  $0.7\text{ V}$  (dat kan je afleiden uit de spanningswet van Kirchhoff en  $V_{CB} > 0$ , en  $V_{BE} = 0.7$ ). De transistor kan hier de spanning aan zijn pinnen niet hoger krijgen dan zijn voeding. De maximum is dus  $V_{CC} = 9\text{ V}$ . Pas op, een batterij gaat slijten, na een tijdje kan de geleverde spanning zo laag als  $7\text{ V}$  gaan. De voorbeeldkeuze die we hier maken is:

$$V_C = 3.5\text{ V} \quad (36)$$

Dat is ongeveer in het midden tussen  $7\text{ V}$  en  $0.7\text{ V}$ . Je kan snappen waarom het midden een mogelijke keuze is door een tekening te maken zoals in figuur 17. Dit is niet de enige mogelijkheid!

3. Laatste keuze: kies een versterkingsfactor  $-\frac{R_C}{R_E}$ . Als je de amplitude van de inkomende golf  $V_S$  kent, dan kan de versterkingsfactor zo kiezen dat je uitgaande spanningsgolf zeker niet boven  $V_{CC}$  komt, of onder  $0\text{ V}$  (=de grond). Spijtig genoeg is er geen standaardwaarde voor de amplitude van een muzieksignaal, maar het is meestal klein en ongeveer  $200\text{ mV}$ . We kunnen bijvoorbeeld zeggen dat we de amplitude naar  $1\text{ V}$  willen krijgen, we hebben dus een versterkingsfactor nodig van  $-5$ .

$$\frac{R_C}{R_E} = 5 \quad (37)$$

Vergeet zeker niet dat dit niet vaste keuzes zijn, er zijn veel andere mogelijkheden, probeer vast en zeker te spelen met andere waardes!

**Doe-het-zelf:** Je kent nu alles wat nodig is om de weerstanden  $R_E$  en  $R_C$  te bepalen. **Tip:** Uit  $I_C$  en  $V_C$  kan je de waarde  $R_C$  vinden.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

$$R_C = \dots \quad (38)$$

$$R_E = \dots \quad (39)$$

De vaste waarde waarond  $V_B$  gaat variëren ligt nu al vast (omdat  $V_{BE} = 0.7V$ ), en noemen we het biaspunt. We kunnen die vastleggen met de weerstandsdeler  $R_1$  en  $R_2$ . Alhoewel het geen zuivere weerstandsdeler is (normaal gezien is niets aangesloten aan een weerstandseleer), kunnen toch de formule van de weerstandsdeler gebruiken hier.

**Doe-het-zelf:** Bereken het biasvoltage  $V_B$ . Kies dan de weerstand  $R_2$  zodat  $V_B$  de gewenste waarde heeft. Het staat al vast dat  $R_1 = 1k\Omega$ . **Tip:** Herinner U dat  $V_{CC} = 9V$  en de formule van de weerstandsdeler.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

$$R_1 = 1k\Omega \quad (40)$$

$$R_2 = \dots \quad (41)$$

En voor dat je het weet, hebben we de versterker helemaal gemaakt! Je kan zien dat we vermogen hebben versterkt van het ingangssignaal:

1. de amplitude van de stroom  $I_B$  is enkele  $\mu A$ , terwijl de amplitude van  $I_C$  enkele mA bedraagt
2. de amplitude van de spanning  $V_B$  is enkele mV, terwijl de amplitude van  $V_E$  in de grootteorde van 1 Volt is.

De stroom en de spanning zijn versterkt, dus het vermogen is gestegen! We zijn vertrokken van enkele  $\mu W$  en we hebben nu uiteindelijk enkele  $mW$ .

Samenvatting van de gekozen weerstanden:

$$R_1 = \dots \quad (42)$$

$$R_2 = \dots \quad (43)$$

$$R_E = \dots \quad (44)$$

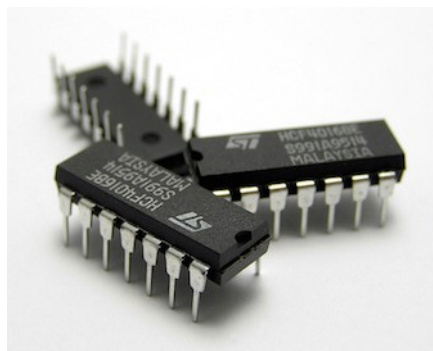
$$R_C = \dots \quad (45)$$

### 3.5 De magische zwarte doos: IC's

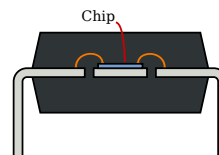
Dankzij de transistor-schakeling hebben we meer vermogen, maar een luidspreker heeft enkele honderden milliwatts nodig om luid genoeg te klinken, dat is meer dan enkele milliwatts we nu hebben! We gaan dus het signaal nog eens versterken.

Deze keer gaat onze aanpak verschillend zijn: we gaan de versterker niet zelf maken, maar gaan een IC (Integrated Circuit of geïntegreerde schakeling) gebruiken die daarvoor gemaakt is, zodat we niet het warm water opnieuw uitvinden. Een IC is een volledig elektronisch netwerkje gemaakt op een plaatje silicium, die dan is verpakt in een behuizing uit kunststof met pinnetjes om het te verbinden met andere circuits, zoals je kan zien in figuur 18.

We gaan hier een IC gebruiken die gemaakt is om audio te versterken, de LM-386. IC's worden vaak benoemd met een combinatie van letters en getallen. Alle IC's hebben een handleiding die uitleg geeft over hun werking,



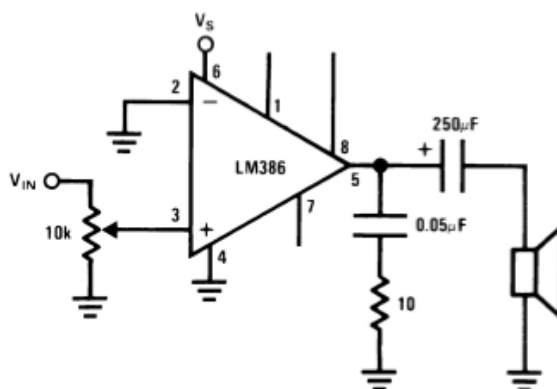
(a) Voorbeelden van IC's, in een DIP (Dual-in-line Packaging) behuizing.



(b) Doorsnede van een IC, het eigenlijk circuit (of chip) wordt verbonden met de buitenwereld via de pinnetjes van de behuizing.

Figuur 18: Geïntegreerde schakelingen.

die we een datasheet noemen. In de datasheet van de LM-386 staat hoe je het moet gebruiken om een versterker te maken met spanningsversterkingfactor 20.



Figuur 19: Schakeling uit de datasheet van de LM-386 voor een spanningsversterking van 20. De getallen duiden de pinnen aan van het IC, de driehoek is het symbool voor het IC.

Een IC is niets magisch: het netwerk binnen de behuizing heeft vaak als basisingrediënt transistoren, en werkt in principe zoals de netwerken die we net hebben besproken, alleen op een veel kleinere schaal. Het ontwerpen van een IC is ook het werk van een ingenieur in de elektronica!

Het praktische aan een IC is dat we nu al klaar zijn met de tweede

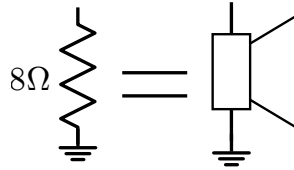


versterkersstap: we moeten gewoonweg de schakeling in figuur 19 bouwen. We vervangen de capaciteiten van  $0.05\mu\text{F}$  en  $250\mu\text{F}$  door capaciteiten van  $0.1\mu\text{F}$  en  $220\mu\text{F}$ , omdat deze in het lab beschikbaar zijn. Geen nood, het circuit gaat zich niet anders gedragen omwille van die kleine verandering. De capaciteit van  $220\mu\text{F}$  heeft een plus-teken omdat het een elektrolytische capaciteit is, die een richting hebben. Als je ze omgekeerd in de schakeling gebruikt gaan ze stuk, let dus op!

In de datasheet zit nog een belangrijke informatie: de output van de schakeling is een spanningsgolf met maximale amplitude van  $3\text{ V}$ , een een DC-waarde (gemiddelde) gelijk aan  $0\text{ V}$ .

### 3.6 De luidspreker

De luidspreker gedraagt zich in een elektronisch netwerk heel ruw gezien zoals een weerstand. Misschien heb je al gezien dat een luidspreker een ‘impedantie’ heeft, meestal van  $4$ ,  $8$  of  $16\ \Omega$ . Dat is de waarde van de weerstand van de luidspreker.



Figuur 20: Een luidspreker gedraagt zich zoals een weerstand in een elektronisch netwerk.

Wat ons nu interesseert is hoeveel vermogen de weerstand gebruikt, dat gaat een indicatie geven van hoe luid we de muziek kunnen afspelen.

$$P_{max} = \frac{(3V)^2}{8\Omega} = 1,1W \quad (46)$$

$$P_{eff} = \frac{P_{max}}{2} = 0,5W \quad (47)$$

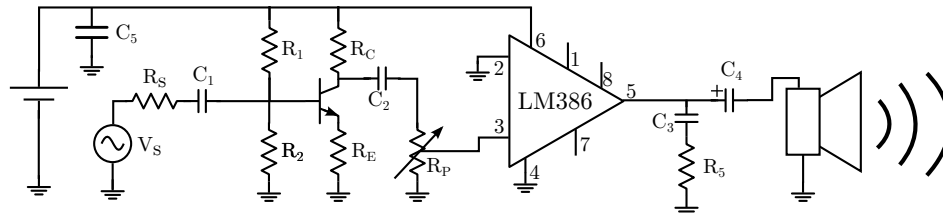
Spijtig genoeg gaat er maar een heel klein deeltje van het vermogen worden omgevormd naar geluidsvermogen. Typisch kan een luidspreker maar  $\pm 1\%$  van het elektrisch vermogen omvormen naar geluidsvermogen.

$$P_{geluid} = \frac{1}{100} P_{eff} = 50mW \quad (48)$$

En zoals je het zelf gaat merken, komt daar een goed volume mee overeen.

## 4 Knutselen: bouwen van de behuizing en de PCB

In figuur 21 zie je het volledig elektronisch schema van de versterker. Enkele



Figuur 21: Volledig Schema

componenten zijn bijgevoegd:  $C_1$ ,  $C_2$  en  $C_5$ .  $C_1$  en  $C_2$  dienen om DC signalen te blokkeren, dit kan omdat capaciteiten alleen reageren op veranderingen van spanning.  $C_5$  is er om de batterij te helpen stroom te leveren, omdat een capaciteit ook kan worden opgeladen om daarna stroom te leveren, net zoals een kleine batterij.

Als snelle referentie vind je hier de componentwaarden die nodig zijn om een werkende versterker te hebben.

$R_1 = 1k\Omega$	$R_2 = 4.7k\Omega$
$R_E = 100\Omega$	$R_C = 560\Omega$
$R_P = 10k\Omega$	$R_5 = 10\Omega$
$C_1 = 1\mu F$	$C_2 = 42\mu F$
$C_3 = 100nF$	$C_4 = 220\mu F$
$C_5 = 330\mu F$	

### 4.1 De BOX is belangrijk

## 5 Conclusie

## 6 Nagerecht

### 6.1 De hoogdoorlaatfilter en de capaciteit.

### 6.2 Hoe lang gaat de versterker mee?