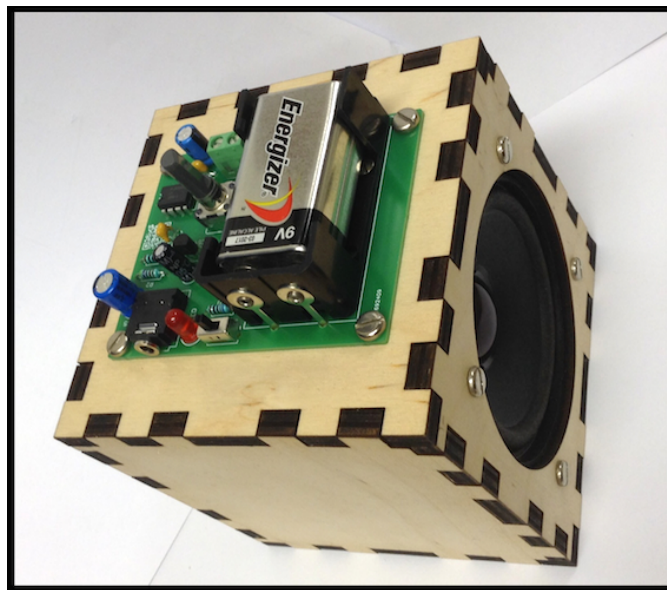


Project Ingenieurswetenschappen: Elektronisch ontwerp van de e-VUBOX

Vrije Universiteit Brussel

Versie 08.2015



Figuur 1: De prachtige e-VUBOX.

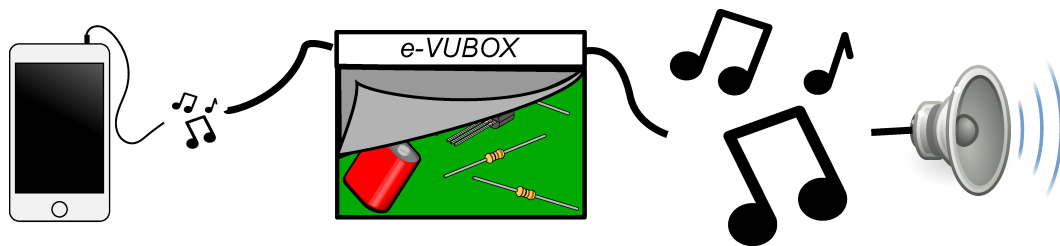
Inhoudsopgave

1	Doelstelling	3
2	Elektronica: componenten en netwerken	3
2.1	De weerstand	5
2.1.1	Serie en parallel	6
2.2	De spanningsbron	6
2.3	Mini-netwerk	7
2.4	De capaciteit	7
2.5	Netwerken	8
3	Bouwstenen van de e-VUBOX	10
3.1	Introductie: het versterken van audio	10
3.2	De volumeknop: de spanningsdeler	12
3.3	Het statusledje: de diode	13
3.4	De versterker: de transistor	15
3.4.1	De bipolaire npn transistor	16
3.4.2	Het versterkingsnetwerk	17
3.5	De magische zwarte doos: de geïntegreerde schakeling	20
3.6	De luidspreker: de (slechte) weerstand.	21
4	Overzicht	23

1 Doelstelling

Elektronische uitvindingen maken deel uit van de grote revoluties van onze tijd. Van eenvoudige rekenmachines tot de meest geavanceerde computers, spelconsoles, GPS-satellieten, zelfrijdende auto's, hersenimplantaten, pratende robots die duizenden objecten per seconde herkennen... Die verbluffende uitvindingen worden dagelijks gemaakt en gebruikt.

Al die fascinerende ontwikkelingen kunnen de ambitie geven om zelf elektronische wondermachines te maken, als je maar wist hoe die miraculeuze elektronica in elkaar 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, de e-VUBOX**. De e-VUBOX is een versterker, die de muziek van een muzikspeler kan versterken om het luid te kunnen afspelen (figuur 2). Je zal snel zien dat elektronische circuits niet (helemaal) magisch zijn!



Figuur 2: Principeschema van het project. We gaan muziek versterken, en gaan de mysteries van de elektronica binnen de e-VUBOX ontsluiten.

Laten we beginnen met een overzicht van de wetten en vuistregels van de elektronica. Als je al een basis hebt in de elektronica, 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 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 3. 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** ¹. Vaak wordt er ook gesproken van de spanning **op** een punt, dit moet je begrijpen als het spanningsverschil **tussen** dat knooppunt en de "grond", een bijzonder punt die je binnenkort zal leren kennen .
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.

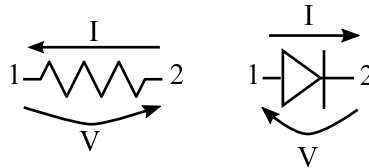
¹Je kent al een maat voor het verschil in potentiële gravitationele energie: de hoogte in meter. Zoals een bal valt van hoog naar laag, gaat een positieve lading lopen van een hoge spanning naar een lage spanning.

Stromen en spanning kunnen constant zijn over de tijd, we spreken dan van DC (Direct Current). Als ze veranderen met de tijd, spreken we van AC (Alternating Current).

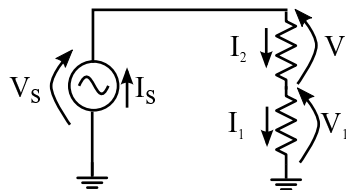
Voor dat we beginnen met componenten te ontdekken, is er een derde grootte die belangrijk is in de elektronica : het elektrisch vermogen. Dat stelt de gebruikte elektrische energie per tijdseenheid voor. Het elektrisch vermogen dat een component verbruikt is het product van de stroom en de spanning:

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

met P het vermogen in Watt, V het voltage over de component en I de stroom door de component. De componenten gaan dat elektrisch vermogen vaak omvormen naar anderen energievormen, zoals licht of warmte.



(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.

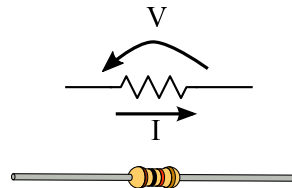
Figuur 3: Componenten en een schakeling.

Intermezzo: Elektrische ladingen kunnen we niet zien, en daarom is het soms moeilijk om ze te begrijpen. Een vaak gebruikte manier om elektriciteit toch eenvoudig voor te stellen is door elektrische ladingen te vergelijken met water. Zoals elektrische ladingen onder invloed van een spanningsverschil een elektrische stroom opwekken door een geleider, gaat water onder invloed van een (water)drukverschil een waterstroom opwekken door een buis. Er werd lang effectief gedacht dat elektriciteit een vloeistof was, de benamingen stroom en spanning stammen nog uit die tijd. ²

Heel de magie van de elektronica zit in de I tot V (stroom-spanning) functies waaraan de componenten voldoen. Die functies zijn gevonden met behulp van de fysica, en worden door ingenieurs gebruikt om netwerken te ontwerpen. We gaan enkele componenten leren kennen en gebruiken, en gaan onmiddellijk beginnen met de eenvoudigste (en ÃÃn van de belangrijkste) component: de weerstand.

²http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/E&M_Hist.html

2.1 De weerstand



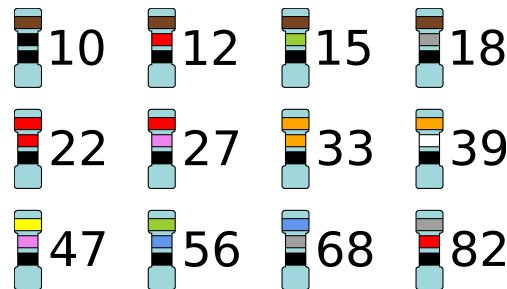
Figuur 4: De weerstand: schematische voorstelling en reëel component.

Een weerstand (figuur 4) is een geleider die voldoet aan de **wet van Ohm** die zegt dat de stroom en spanning evenredig zijn:

$$V = R \cdot I \quad (2)$$

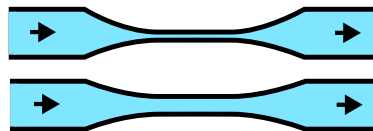
R is een eigenschap van de weerstand die men ook elektrische weerstand noemt, met eenheid Ohm³ (Ω). V is de spanning over de weerstand en I de stroom door de weerstand. Vergeet zeker niet dat de richting van de pijlen belangrijk is.

Niet alle weerstandwaarden bestaan in de handel, ze worden gemaakt in series met vaste waarden, zoals de E12 of E24 series (figuur 5). De ingenieur moet dan inschatten welke waarde te gebruiken, omdat de waarden die we uitrekenen nooit bestaan. Nemen we een beetje groter of een beetje kleiner? Dit hangt af van geval tot geval!



Figuur 5: De vaak gebruikte E12 weerstanden-serie. De kleurencode van de weerstand geeft de waarde aan. De weerstanden die bestaan zijn deze waarden, of tienvouden ervan. Bijvoorbeeld: de weerstanden 0.47 Ω , 4.7 Ω , 47 Ω , 470 Ω , 4.7 k Ω , etc. ... (Fig. door Peter Halasz)

Het waterequivalent van een weerstand is een vernauwde buis (figuur 6). Om stroom te laten vloeien door een nauwe buis, moet er een drukverschil zijn tussen de uiteinden.



Figuur 6: De waterweerstand. Hoe groter de weerstand, hoe nauwer de buis.

³Georg Simon Ohm (1787 - 1854) was een Duits wiskundige en natuurkundige, ontdekker van de wet van Ohm in 1827.

2.1.1 Serie en parallel

Twee weerstanden kunnen door één weerstand worden vervangen in twee gevallen (zie figuur 7):

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

$$R_v = R_1 + R_2. \quad (3)$$

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

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

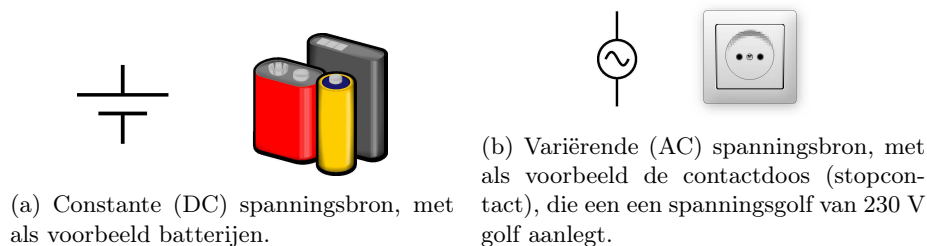
$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

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



Figuur 7: Serie en parallel.

2.2 De spanningsbron



Figuur 8: Spanningsbronnen.

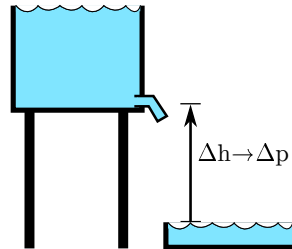
Een perfecte spanningsbron is een simpel elektronisch component met twee pinnen die gehoorzaamt aan een eenvoudige wet: de spanningsbron legt de spanning over zijn pinnen op, onafhankelijk van de rest van het netwerk.

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 8.

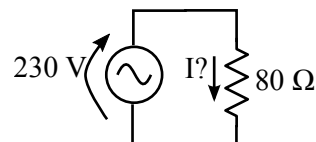
Het waterequivalent kan een pomp zijn die de druk tussen zijn uiteinden vastlegt of een watertoren die druk uitoefent omwille van zijn hoogteverschil met de grond (figuur 9).



Figuur 9: De waterdrukbron, die een drukverschil oplegt tussen de grond en zijn uiteinde.

2.3 Mini-netwerk

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



Figuur 10: Voorbeeldnetwerkje.

Doe-het-zelf 1 Een spanningsbron legt een wisselspanning (AC) op met een amplitude van 240 V over een weerstand van 80 Ω. Dit is wat er gebeurt in een broodrooster, de weerstand is de gloeidraad die opwarmt en het brood bakt. Wat is de amplitude van de stroom I door de weerstand? Wat is het elektrisch vermogen P van de weerstand, die dan in warmte wordt omgevormd?

$$\text{Wet van Ohm: } V = R \cdot I$$

$$\text{Vermogen: } P = V \cdot I$$

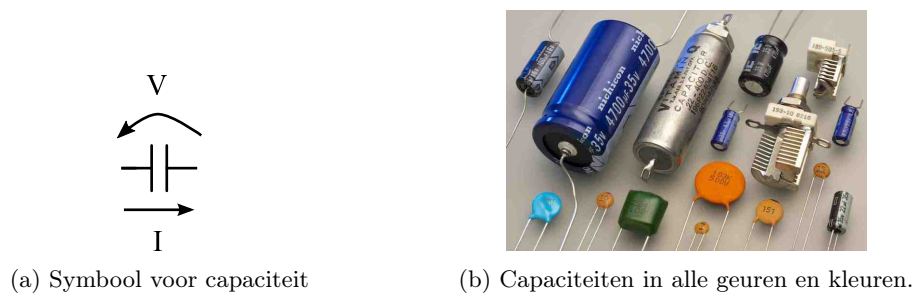
$$I = \dots \qquad P = \dots \qquad (5)$$

2.4 De capaciteit

Een capaciteit (figuur 11) is een component waar de stroom bepaald wordt door de maat van verandering van de spanning. De formele definitie van de stroom-spanning relatie is :

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt} \qquad (6)$$

met C de capaciteitswaarde in Farhad (F). Een diepgaande studie van de capaciteit is tijdrovend en nutteloos voor onze toepassing, wij gaan capaciteiten enkel gebruiken voor twee functies:

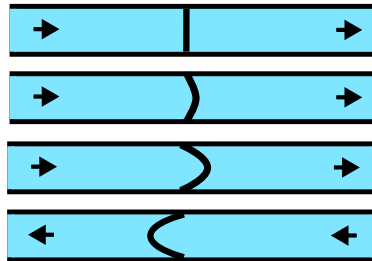


Figuur 11: De capaciteit.

1. Ontkoppeling: Omdat een capaciteit alleen reageert op verandering van spanning, laat het geen DC (constante) stroom door. We gaan dit gebruiken om golvende signalen door te laten, maar constante signalen tegen te houden.
2. Hulpbatterij: capaciteiten kunnen zich gedragen zoals mini-batterijen die veel stroom kunnen leveren op een korte tijd, dit kan helpen wanneer de schakeling meer stroom vraagt dan de batterij kan leveren. Een voorbeeld daarvan is de defibrillator, waar een hoogspanningscapaciteit wordt opgeladen, en in één schok wordt ontladen op het hart van een patiënt.

Pas op: zogenaamde elektrolytische capaciteiten hebben een richting, die mag je niet omgekeerd plaatsen. De richting wordt aangeduid met een + op een van de pinnen.

Het waterequivalent van de capaciteit is een rubberen membraan in een buis, de capaciteitswaarde stelt dan de dikte van de membraan voor. Je kan door een membraan geen water laten stromen. Maar als er het water golft gaat de membraan bewegen en de golf doorgeven. Het is ook mogelijk om de membraan hard op te spannen en dan ineens los te laten om een stroompuls te geven. Dat stelt dan de batterijwerking voor.



Figuur 12: De watercapaciteit, die kan voorgesteld worden als een rubberen membraan. De stroomrichting aangegeven met pijlen.

Elektronica is meer dan een componenten op hun eigen, ze moeten geschakeld worden in netwerken! Laten we maar een zien hoe netwerken zich gedragen.

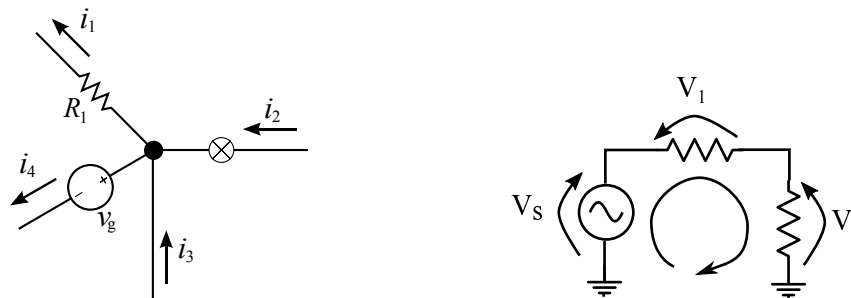
2.5 Netwerken

Een netwerk is een aaneenschakeling van componenten, die schematisch wordt voorgesteld zoals in figuur 3b. Een netwerk is gemaakt uit **takken** met componenten op die verbonden zijn via **knooppunten**.

Er zijn maar twee regels die gelden voor elektrische/elektronische netwerken: de wetten van Kirchhoff⁴. 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.



(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 13: De wetten van Kirchhoff

Voorbeeld: De stroomwet (figuur 13a) wordt toegepast als volgt: kies een knooppunt in een netwerk. Beschouw alle takken die dat knooppunt raken, en de bijhorende stromen. 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 verbonden zijn. Je mag dus een connectie tekenen tussen alle pinnen die aan de grond verbonden zijn. Vergeet niet dat een spanning altijd gedefiniëerd 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 13b) 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.

⁴Gustav 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!

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.

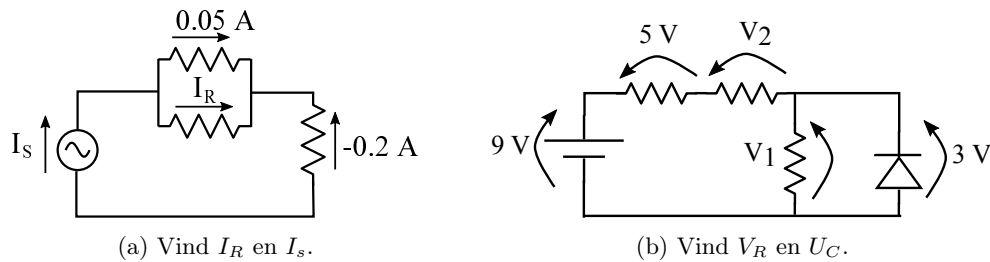
Doe-het-zelf 2 Pas de stroomwet van Kirchhoff toe in figuur 14a, en vind de missende stromen. Doe hetzelfde voor de spanningen in figuur 14b.

$$I_S = \dots$$

$$V_1 = \dots$$

$$I_R = \dots$$

$$V_2 = \dots$$



Figuur 14: 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 komt 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 ontwerpen. We beginnen met een volumeregelaar. We gaan dan een simpele statusledje ontwerpen zodat we weten wanneer onze versterker aan is, het gaat ook minder fel branden wanneer de batterij vervangen moet worden. Daarna houden we ons bezig met de eigenlijke versterking en gaan we kennismaken met de transistor die ons daarmee gaat helpen. Als laatste stap gaan we kennismaken met een geïntegreerde schakeling.

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

3.1 Introductie: het versterken van audio

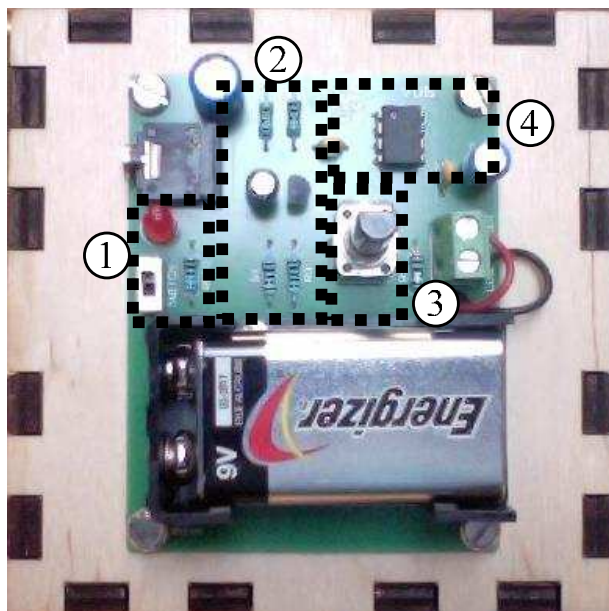
Ook als je een student in elektronisch ingenieur bent, is een basiskennis in de rest van de wetenschappen toch handig. Want hoe versterk je geluid?

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 zeker kent: de microfoon en de luidspreker.

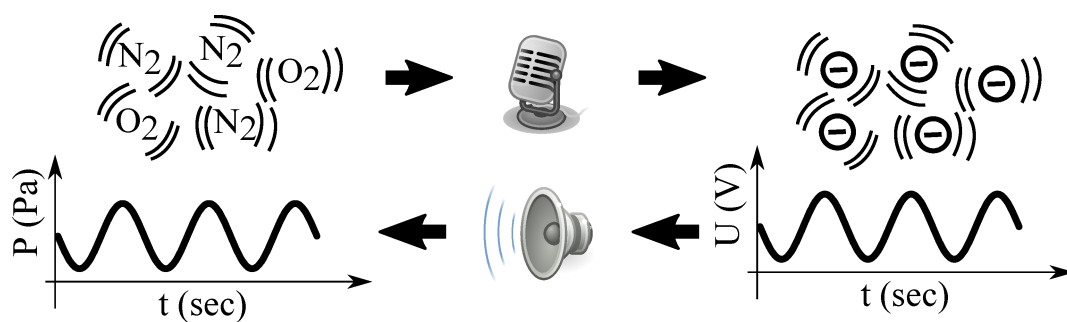
De microfoon vormt een drukgolf om naar een spanningsgolf. We kunnen een drukgolf uitdrukken als een sinus, met bijvoorbeeld een frequentie van 440 Hz (dit is de muzieknoot la):

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

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



Figuur 15: Het circuit met de onderdelen die we gaan ontwerpen. 1) Statusledje 2) Versterker 3) Volumeknopje 4) Geïntegreerde schakeling



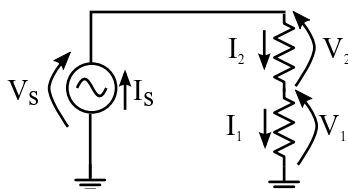
Figuur 16: Een microfoon vormt de luchtdruk golf (eenheid: Pascal) om in een spanningsgolf (eenheid: Volt), een luidspreker doet het omgekeerde.

De microfoon gaat die drukgolf omvormen naar een spanningsgolf, met dezelfde frequentie (zie figuur 16).

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. Om luid muziek te kunnen afspelen, moet er veel energie gepompt worden in de luidspreker. Anders gezegd moet het vermogen gebruikt door de luidspreker groot zijn. Dat is het doel van een versterker: het vermogen van de muziek groot 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, gewoon het kiezen van enkele weerstandswaarden.

3.2 De volumeknop: de spanningsdeler

We hebben de muziek dus omgevormd naar een spanningssignaal. Stel dat V_s ons muzieksignaal is, en dat we in serie met die spanningsbron twee weerstanden schakelen (figuur 17), dan hebben we een zogenaamde **spanningsdeler** gebouwd. We gaan aantonen de spanning V_1 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 17: Volumeregeling: de spanningsdeler

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

$$I_s = I_1 = I_2 \quad (8)$$

$$V_s - V_1 - V_2 = 0 \quad (9)$$

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

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 \quad (10)$$

$$V_2 = R_2 \cdot I_2 \quad (11)$$

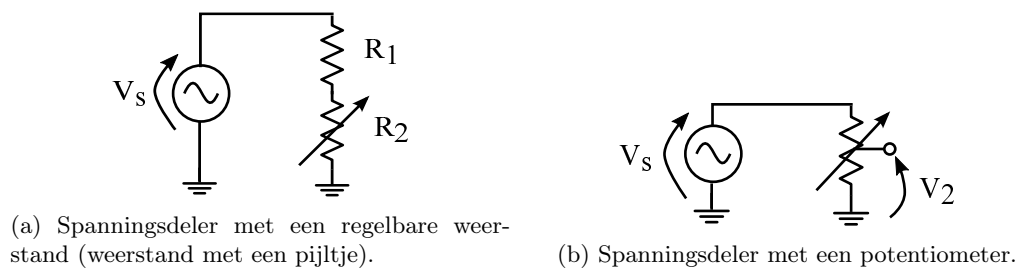
Doe-het-zelf 3 Vind nu, dankzij de vier vorige vergelijkingen, de uitdrukking voor de spanning V_2 in functie van V_s , R_1 en R_2 . Omdat we alleen de spanningsverhouding willen weten, mogen er geen stromen voorkomen in de formule.

$$V_1 = \dots\dots$$

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 4 Je hebt 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 Ω (1000 Ω). Welke waarde moet je kiezen voor R_2 ?

$$R_2 = \dots\dots$$



Figuur 18: Types spanningsdelers.

Let op! Bestaat die weerstandswaarde wel? Kies een bestaande waarde uit de E12-reeks in figuur 5 op pagina 5.

In de praktijk wordt een spanningsdeler vaak met een regelbare weerstand gemaakt (zie figuur 18a), zodat de verhouding tussen de in- en uitgangsspanning kan veranderd worden. In figuur 18b zie je een **potentiometer**, dat is een regelbare spanningsdeler. Het is een regelbare weerstand die je in het midden kan aftakken, en dat vormt de spanningsdeler.

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 5 Welke weerstand R_{pot} moet de potentiometer hebben, wetend dat de ingangsspanning V maximaal 200 mV ($= 200 \cdot 10^{-3} \text{ V}$) is en we het vermogen P willen beperken tot $4 \mu\text{W}$ ($= 4 \cdot 10^{-6} \text{ W}$)? **Tip:** De formule voor elektrisch vermogen kan je vinden op pagina 4, je hebt de wet van Ohm ook nodig.

$$R_{pot} = \dots\dots$$

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 Het statusledje: de diode

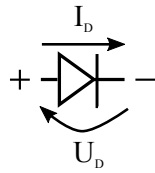
Een handig onderdeel op veel elektronische toestellen is het ledje dat brandt om aan te geven dat het toestel aan is. LED staat voor Light Emitting Diode, lichtgevende diode⁵. Een diode (figuur 19a) is een heel belangrijke en nuttige elektronische component, die alleen stroom doorlaat in één richting. Het waterequivalent is eenvoudigweg een éénrichtingsklep.

In figuur 20 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-lineair (= het is geen rechte): het is een exponentiële functie. Als je het voltage verdubbelt over de diode, gaat de stroom niet verdubbellen, maar exponentiël groter worden. Omdat rekenen met een exponentiële functie onhandig is, gaat een ingenieur meestal eerst proberen om zich te redden met de grafiek. We gaan het circuit in figuur 21 oplossen zonder de die moeilijke functie te gebruiken.

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

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.

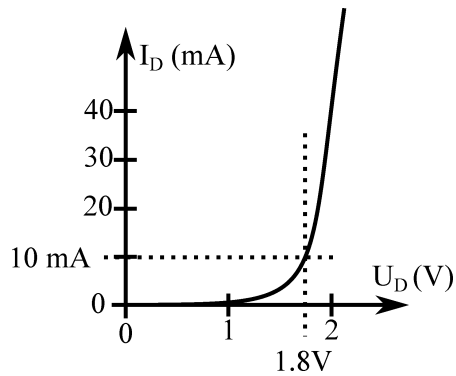


(a) Een diode met voorwaartse spanning U_D en stroom I_D . De diode laat alleen stroom toe in de positieve stroomrichting, van de anode (+) naar de kathode (-).

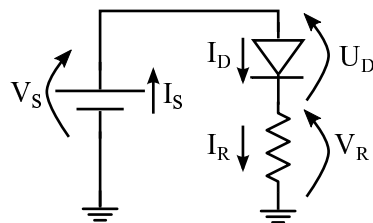


(b) Rood ledje.

Figuur 19: De Diode



Figuur 20: Grafiek van de stroom in functie van de spanning van een diode.



Figuur 21: Diode network.

LED. We zien dat op het grafiek in figuur 20 dat de voltage over de diode dan 1.8V moet zijn. Deze waarde hangt af van de kleur van de LED. 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:

$$+V_s - U_D - V_R = 0 \quad (12)$$

$$I_s = I_D = I_R \quad (13)$$

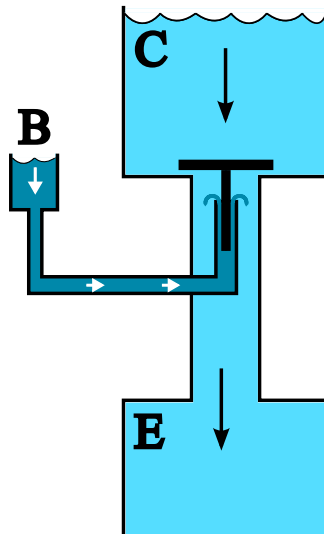
Doe-het-zelf 6 Kan je de waarde vinden van de weerstand die nodig is? **Tip:** bepaal I_R en V_R uit de wetten van Kirchhoff.

$$R_{led} = \dots\dots$$

Om het statusledje 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 tot 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.



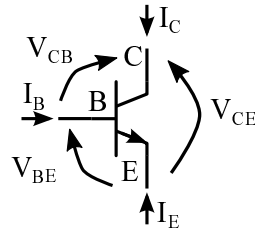
Figuur 22: Hydraulische analogie van de transistor.

We gaan de werking van de transistor uitleggen met zijn waterequivalent (figuur 22). De watertransistor werkt als volgt: als er geen stroom vloeit in de basis (B), dan sluit het ventiel het contact tussen collector (C) en emitter (E), er loopt geen stroom door de transistor. Een kleine stroom in de basis drukt het ventiel naar boven, en er kan een grote stroom lopen van de collector naar de emitter. Een kleine stroom veroorzaakt dus een grote stroom, en dat is het

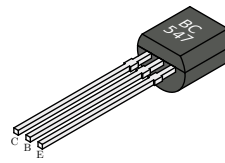
principe van de versterkerwerking van een transistor! Er is wel een externe energiebron nodig om die grote stroom te kunnen blijven leveren, bij de watertransistor zou dat een watertoren kunnen zijn dat aangesloten is aan de collector.

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 23b is het een component met 3 pinnen, die elk een naam dragen: de basis, de collector en de emitter.



(a) Schematische voorstelling van de bipolaire transistor met stromen en spanningen. Alle stromen worden conventioneel **naar** de transistor toe getekend.



(b) De BC547 bipolaire transistor met Basis, Collector en Emitter aangeduid.

Figuur 23: 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:

$$V_{CB} > 0 \text{ V.} \quad (14)$$

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

$$V_{BE} \approx 0.7 \text{ V} \quad (15)$$

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!). Die maximale waarden verschillen van model tot model.
4. Als aan de drie vorige regels is voldaan, dan is de collectorsstroom een versterkte versie van de basisstroom:

$$I_C = \beta I_B \quad (16)$$

β (ook als h_{FE} genoteerd) wordt de stroomversterkingsfactor genoemd, en is typisch ten minste 50, maar kan veel groter zijn. Dit is waarom de transistor nuttig is: een minuscule kleine basisstroom controleert een veel grotere collectorstroom.

De wetten van Kirchhoff gelden ook voor de transistor⁷:

$$I_C + I_B = -I_E \quad (17)$$

$$V_{BE} + V_{CB} - V_{CE} = 0 \quad (18)$$

De stroomversterkingsfactor β 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...

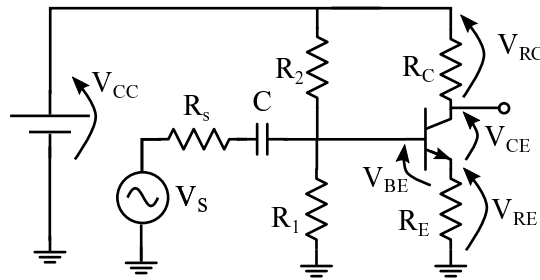
Doe-het-zelf 7 *Elimineer I_B van de stroomwet van Kirchhoff met behulp van vergelijking (16). Vind dan een uitdrukking voor I_C . Stel dan dat $\beta = 250$, en rond af. Welke relatie vind je tussen I_C en I_E ?*

$$I_C \approx \dots\dots$$

Een negatieve stroom is perfect mogelijk, dat wilt gewoon zeggen dat de stroom loopt tegen de pijlrichting in van figuur 23a. We zijn nu gereed om een versterkerschakeling op te lossen!

3.4.2 Het versterkingsnetwerk

In figuur 24 vind je een audioversterker, 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 de muziek die we gaan versterken in de spanningsbron V_S .



Figuur 24: Versterkerschakeling met de transistor.

R_s is de serieweerstand van de spanningsbron, en C is een ontkoppelcapaciteit.

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 8 *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

$$V_{Re} + V_{CE} + V_{Rc} - V_{CC} = 0 \quad (19)$$

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.

- de transistorvergelijkingen⁸

$$V_{BE} = V_B - V_E = 0.7 \text{ V} \quad (20)$$

$$I_C \approx -I_E \quad (21)$$

$$V_{CE} = V_C - V_E > 0 \quad (22)$$

- de weerstandsvergelijkingen

$$V_{Rc} = R_C \cdot I_C \quad (23)$$

$$V_{Re} = -R_E \cdot I_E \quad (24)$$

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.

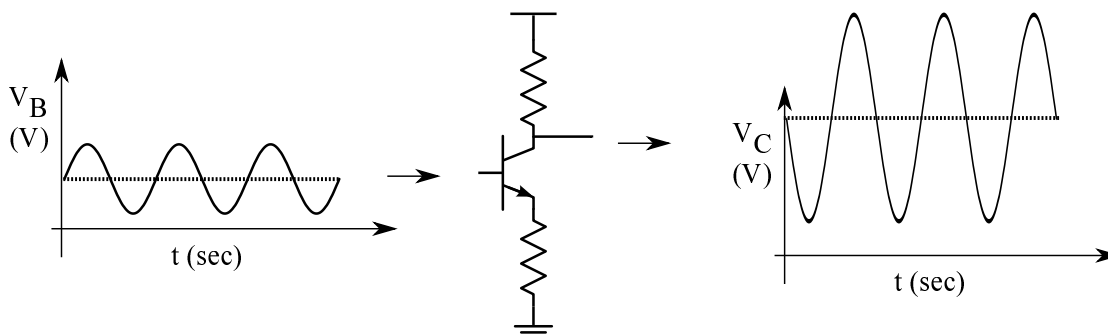
Tip: één manier om het te vinden: druk de stroom uit door R_C met de wet van Ohm. Die is nodig om de spanning V_E te vinden die je dan gebruikt om V_B te vinden. Vorm de vergelijking dan om om V_C te isoleren.

$$V_C = \dots\dots\dots \quad (25)$$

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:

$$v_c = -\frac{R_C}{R_E} \cdot v_b \quad (26)$$

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 25.



Figuur 25: De ingangsgolf wordt door ons netwerk omgedraaid, versterkt, en het gemiddelde verschuift.

We gaan nu een ontwerp methode 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!

De methode gaat als volgt:

⁸ V_{BE} is de spanning tussen B en E, V_B is de spanning tussen B en de grond (hetzelfde voor V_C en V_E). We kunnen dan schrijven dat $V_{BE} = V_B - V_E$

1. Kies de gemiddelde stroom I_C . De maximumwaarde die de transistor aankan is 100 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:

$$I_C = 10\text{ mA} \quad (27)$$

2. Kies een gemiddelde voltage V_C , waar de muziekgolf rond gaat variëren. Dit noemen we het instelpunt. De spanning V_C moet groter zijn dan 0.7 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 V gaan. De voorbeeldkeuze die we hier maken is:

$$V_C = 3.5\text{ V} \quad (28)$$

Dat is ongeveer in het midden tussen 7 V en 0.7 V . Je kan snappen waarom het midden een mogelijke keuze is door een tekening te maken zoals in figuur 25. 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 V (=de grond). Spijtig genoeg is er geen standaardwaarde voor de amplitude van een muzieksignaal, maar het is meestal klein en ongeveer 200 mV . We kunnen bijvoorbeeld zeggen dat we de amplitude naar 1 V willen krijgen, we hebben dus een versterkingsfactor nodig van -5 .

$$-\frac{R_C}{R_E} = -5 \quad (29)$$

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

Doe-het-zelf 9 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.

$$R_C = \dots \quad (30)$$

$$R_E = \dots \quad (31)$$

De vaste waarde waar V_B rond gaat variëren ligt nu al vast (omdat $V_{BE} = 0.7\text{ V}$), 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 weerstandsdeler), kunnen we toch de formules van de weerstandsdeler gebruiken hier.

Doe-het-zelf 10 Bereken het biasvoltage V_B . Kies dan de weerstand R_2 zodat V_B de gewenste waarde heeft. Het staat al vast dat $R_1 = 1\text{ k}\Omega$. **Tip:** Herinner U dat $V_{CC} = 9\text{ V}$ en de formules van de weerstandsdeler.

$$V_B = \dots \quad (32)$$

$$R_1 = 1\text{ k}\Omega \quad (33)$$

$$R_2 = \dots \quad (34)$$

Alle weerstanden zijn nu bepaald! Je kan zien dat we vermogen hebben versterkt van het ingangssignaal:

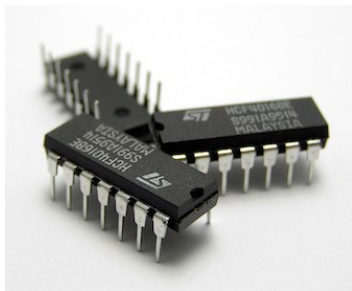
1. de amplitude van de stroom I_B is enkele $\mu\text{A} \rightarrow$ de amplitude van I_C is enkele mA
2. de amplitude van de spanning V_B is enkele $\text{mV} \rightarrow$ de amplitude van V_E in de grootteorde van 1 Volt

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

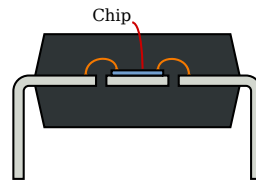
3.5 De magische zwarte doos: de geïntegreerde schakeling

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 26.



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



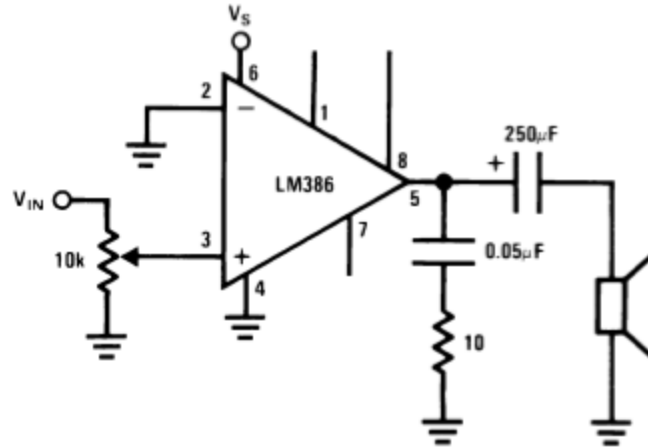
(b) Doorsnede van een IC, het circuit (of chip) in de behuizing wordt verbonden met de buitenwereld via de pinnetjes.

Figuur 26: Geïntegreerde schakelingen.

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, 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.

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!

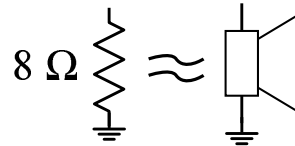
Het praktische aan een IC is dat we nu al klaar zijn met de tweede versterkersstap: we moeten gewoonweg de schakeling in figuur 27 bouwen. We vervangen de capaciteiten van $0.05\mu\text{F}$ en $250\mu\text{F}$ door capaciteiten van $0.1\mu\text{F}$ en $220\mu\text{F}$, omdat deze in het lab beschikbaar 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 heeft. Als je het omgekeerd in de schakeling gebruikt gaat het stuk, let dus op!



Figuur 27: 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.

3.6 De luidspreker: de (slechte) weerstand.

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 Ω . Dat is de waarde van de weerstand van de luidspreker.



Figuur 28: Een luidspreker gedraagt zich ongeveer 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. In de datasheet van de LM386 zit een belangrijke informatie: de output van de schakeling is een spanningsgolf met maximale amplitude van 3 V, een DC-waarde (gemiddelde) gelijk aan 0 V. Dat wilt dus zeggen dat een la bijvoorbeeld kan versterkt worden tot:

$$V(t) = 3 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t) \quad (35)$$

$$(36)$$

De stroom door de versterker is dan

$$I(t) = \frac{3 \text{ V}}{8 \Omega} \cdot \sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t) \quad (37)$$

$$(38)$$

Het vermogen is dan

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) = 1.125 \text{ W} \cdot (\sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t))^2 \quad (39)$$

Omdat muziekgolven veel te snel gaan, hoort de mens alleen de gemiddelde waarde van het vermogen, het gaat niet op en af! Het gemiddelde van een periodieke functie kan uitgerekend worden met een integraal, en dit gaan we doen voor het vermogen. De integraal hangt af van de periode T van de functie, die het inverse is van de frequentie. In ons geval is $T = 1/440\text{Hz} \approx 2\text{ms}$.

$$P_{gemm} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (40)$$

$$= \frac{1}{1/440\text{Hz}} \int_0^{1/440\text{Hz}} 1.125 \text{ W} \cdot (\sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t))^2 dt \quad (41)$$

$$= \frac{1.125 \text{ mW}}{2} \quad (42)$$

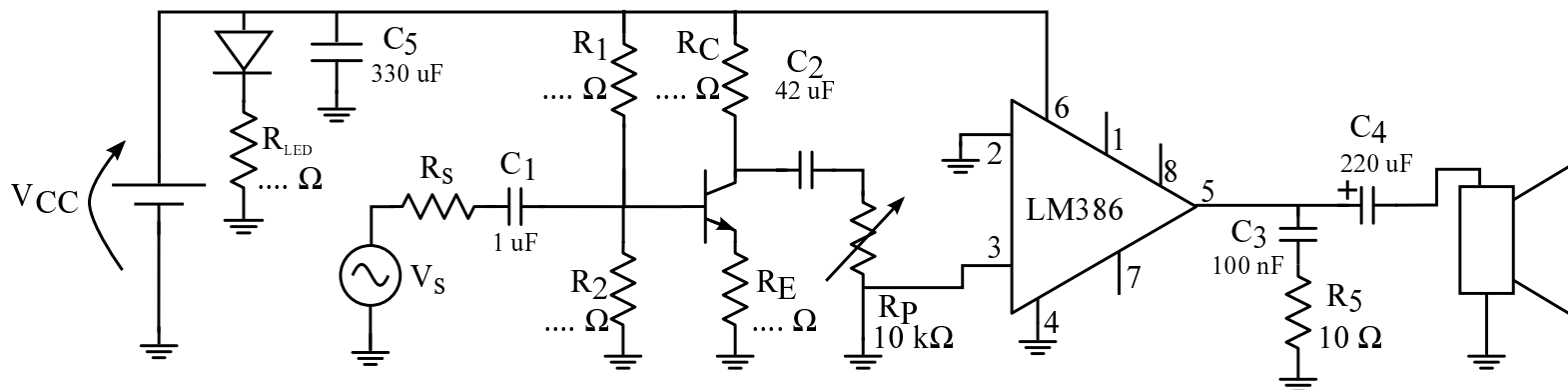
$$\approx 560 \text{ mW} \quad (43)$$

Niet alle elektrische energie wordt omgevormd naar geluidsgolven, veel wordt spijtig genoeg verloren als warmte. Maar zoals je het zelf gaat merken, komt er toch een goed volume uit de luidspreker voor een draagbare speaker.

Dit beëindigt het ontwerp. We hebben gezien dat met enkele wiskundige regels en wat denkwerk, een volledig elektronisch circuit kan ontworpen vanaf simpele componenten. Als je dit een leuke ervaring vond, zijn ingenieursstudies misschien iets voor jou. Je kan online nog veel circuits vinden om zelf te maken! Het circuit moet nu nog alleen gebouwd worden. Op de volgende pagina vind je het volledig circuit.

4 Overzicht

In figuur 29 zie je het volledig elektronisch schema van de versterker. Je herkent de twee trappen: de transistorversterker als eerste stap, het IC-circuit als tweede stap. C_1 en C_2 zijn ontkoppelcapaciteiten dienen om DC signalen te blokkeren, C_5 werkt als een hulpbatterij.



Figuur 29: Volledig Schema

Je kan nu zelf de waarden die je hebt gevonden tijdens het project invullen in het schema. Let wel op dat niet alle weerstandswaarden worden gemaakt, kies waarden die bestaan en die in het labo beschikbaar zijn. Als snelle referentie vind je hier voorbeeldwaarden die leiden tot een werkende versterker.

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$	$R_2 = 4.7 \text{ k}\Omega$
$R_E = 100 \text{ }\Omega$	$R_C = 560 \text{ }\Omega$
$R_P = 10 \text{ k}\Omega$	$R_5 = 10 \text{ }\Omega$
$R_{LED} = 680 \text{ }\Omega$	