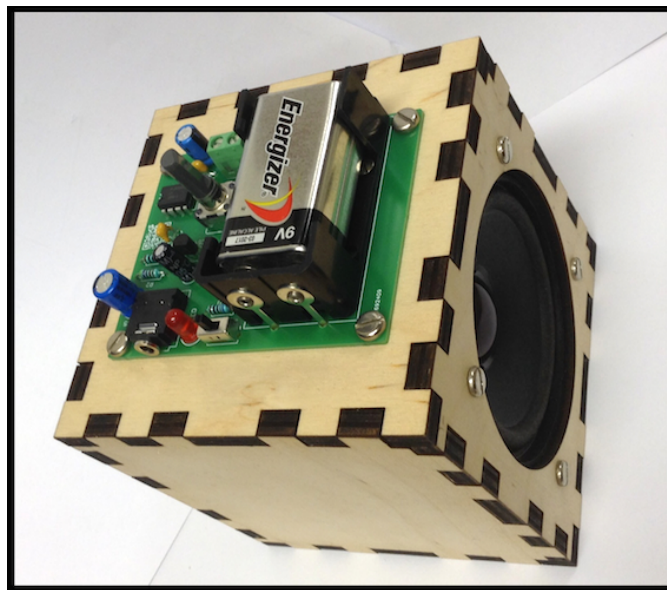


Project Ingenieurswetenschappen: Elektronisch ontwerp van de e-VUBOX

Vrije Universiteit Brussel

Versie 08.2015



Figuur 1: De prachtige e-VUBOX.

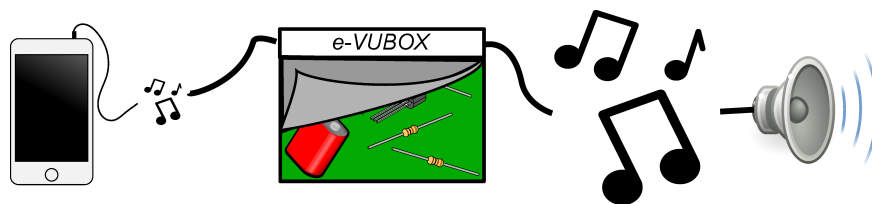
Inhoudsopgave

1	Doelstelling	1
2	Elektronica: componenten en netwerken	1
2.1	De weerstand	2
2.1.1	Serie en parallel	3
2.2	De spanningsbron	3
2.3	De capaciteit	5
2.4	Netwerken	6
3	Bouwstenen van de e-VUBOX	8
3.1	Introductie: het versterken van audio	8
3.2	De volumeknop: de spanningsdeler	9
3.3	Het statusledje: de diode	10
3.4	De versterker: de transistor	12
3.4.1	De bipolaire npn transistor	12
3.4.2	Het versterkingsnetwerk	14
3.5	De magische zwarte doos: de geïntegreerde schakeling	18
3.6	De luidspreker: de (slechte) weerstand.	19
4	Overzicht	21
4.1	Printed Circuit Board	22

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 energie pompt in de muziek van een muzikspeler. Dit is zodat er genoeg elektrisch vermogen is om het luid te kunnen afspelen door een luidspreker (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.

Doe-het-zelf 1 *Waarom is een versterker nuttig? Wat zou je nog kunnen aansluiten aan de ingang van een versterker?*

2 Elektronica: componenten en netwerken

Als elektronische ingenieur ga je nuttige elektronische netwerken maken door componenten op een slimme manier te schakelen. De schematische voorstelling van zo'n elektronische componenten en een netwerk zijn te vinden in Figuur 3. In de elektronica zijn er twee grootheden die we graag in het oog houden:

1. de **spanning** (symbool: V , U of soms E) is het verschil in potentiële elektrische energie tussen twee punten. Spanning wordt ook *voltage* genoemd. De eenheid van spanning is de *Volt*. Er is 1 Joule energie nodig om 1 Coulomb lading te verplaatsen door een spanningsval van 1 Volt. (De Coulomb is de eenheid van elektrische lading).
2. de **stroom** (symbool: I) is de hoeveelheid lading per tijdseenheid dat vloeit door een punt. De eenheid van stroom is de Ampère. Een stroom van 1 Ampère is gelijk aan 1 Coulomb per seconde dat vloeit door een punt.

Pas op: spreek altijd van een spanning *tussen* twee punten in een netwerk. Spreek ook van een stroom *door* een punt of een component. Zoiets zeggen als “de spanning door een weerstand...” is pure nonsens.

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).

Doe-het-zelf 2 Er is tussen twee punten van een netwerk een spanning V :

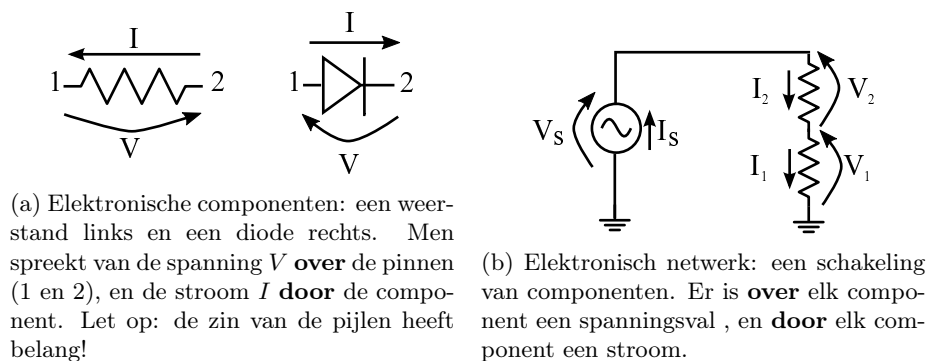
$$V(t) = 3 \text{ V} + 1 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 10 \text{ Hz} \cdot t)$$

Welke gedeelte van de spanning is DC, welk gedeelte is AC?

Stroom en spanning kunnen samenwerken om energie te leveren. We spreken dan van het elektrisch vermogen (symbool P , eenheid Watt). Het elektrisch vermogen dat een component verbruikt is het product van de stroom en de spanning:

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

Elektrisch vermogen kan bvb. gebruikt worden door een led voor licht, door een luidspreker voor geluid of door een weerstand voor warmte.



Figuur 3: Componenten en een schakeling.

Elektrische ladingen gedragen zich verdacht veel zoals water¹. Een elektrisch netwerk kan dus voorgesteld worden als een aaneenschakeling van waterpompen, buizen, kleppen... Elektrische spanning wordt voorgesteld als waterdruk, en stroom als waterstroom. Omdat je als kind (hopelijk) meer met water hebt gespeeld dan met elektriciteit, gaat het vaak sneller om het waternetwerk te begrijpen.

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 beginnen met de eenvoudigste (en één van de belangrijkste) component: de weerstand.

2.1 De weerstand

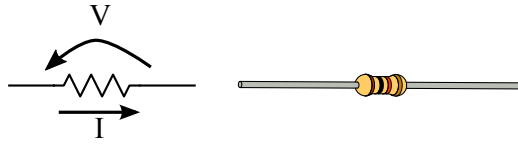
Een weerstand is een geleider die voldoet aan de **wet van Ohm** die zegt dat de stroom en spanning evenredig zijn:

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

R heeft de eenheid Ohm² (Ω). De richting van de pijlen van stroom en spanning is belangrijk (figuur 4) !

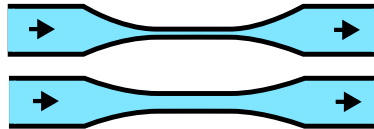
¹Er werd lang effectief gedacht dat elektriciteit een vloeistof was, de benamingen stroom en spanning stammen nog uit die tijd (http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/E&M_Hist.html)

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



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

Het waterequivalent van een weerstand is een vernauwde buis (figuur 5). De hoeveelheid water dat stroomt door de buis hangt af van het drukverschil tussen de uiteinden en de vernauwde buis.



Figuur 5: De waterweerstand. Hoe groter de weerstand, hoe nauwer de buis.

Doe-het-zelf 3 Als ik een vaste spanning (bvb. 9V) heb en ik een grote stroom wil hebben door een weerstand, welke weerstand gebruik ik dan best?

- a) een grote weerstand (hoge R)
- b) een kleine weerstand (kleine R)

2.1.1 Serie en parallel

Twee weerstanden kunnen door één weerstand worden vervangen in twee gevallen (zie figuur 6):

1. twee weerstanden in **in serie** vormen de weerstand:

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

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

2. twee weerstanden in **parallel** vormen de weerstand:

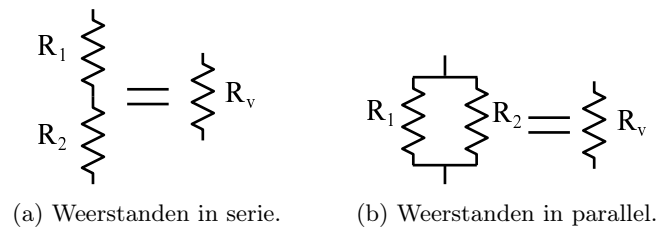
$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

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

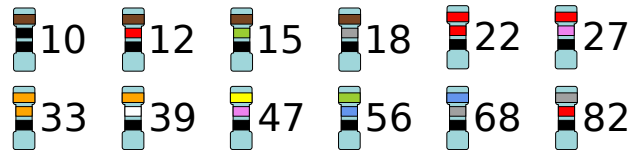
Niet alle weerstandswaarden bestaan in de handel, ze worden gemaakt in series met vaste waarden, zoals de E12 of E24 series (figuur 7). Het is dan de taak van een ingenieur om in te schatten welke waarde we het best gebruiken.

2.2 De spanningsbron

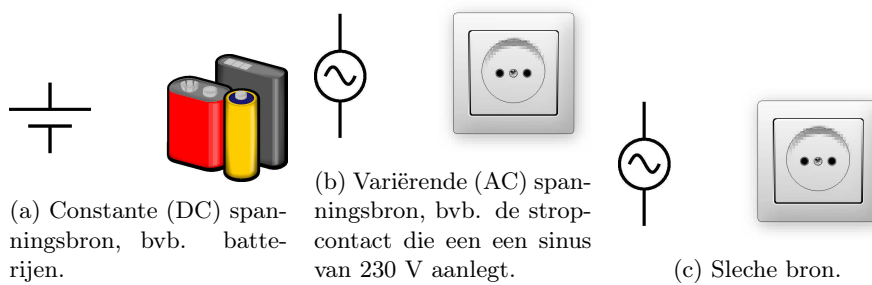
Een perfecte spanningsbron is een simpel elektronisch component met twee pinnen die gehoorzaamt aan een eenvoudige wet: de spanningsbron legt de spanning over zijn pinnen op, onafhankelijk van de rest van het netwerk.



Figuur 6: Serie en parallel.



Figuur 7: 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 0.47Ω , 4.7Ω , 47Ω , 470Ω , $4.7 \text{ k}\Omega$, etc. . . (Fig. door Peter Halasz)

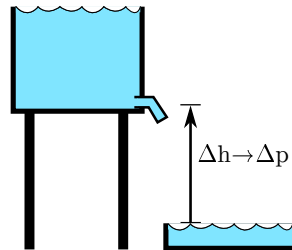


Figuur 8: Spanningsbronnen.

In werkelijkheid kan een spanningsbron maar een beperkte stroom leveren en gedraagt zich dan als een perfecte spanningsbron met een kleine weerstand in serie.

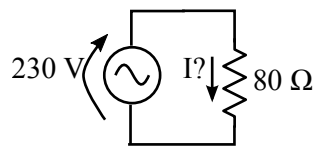
Twee types bron bestaan: DC-bronnen die een vaste waarde aanleggen, of AC-bronnen die een signaal kunnen aanleggen zoals bvb. een sinus. Beide type bronnen hebben een verschillende schematische voorstelling die je kan vinden in figuur 8.

Het waterequivalent is een pomp zijn die de druk tussen zijn uiteinden vastlegt of een watertoren die waterdruk druk genereert omwille van zijn hoogteverschil met de rest van het water (figuur 9).



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

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 4 Een spanningsbron legt een wisselspanning (AC) op met een amplitude van 230 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?

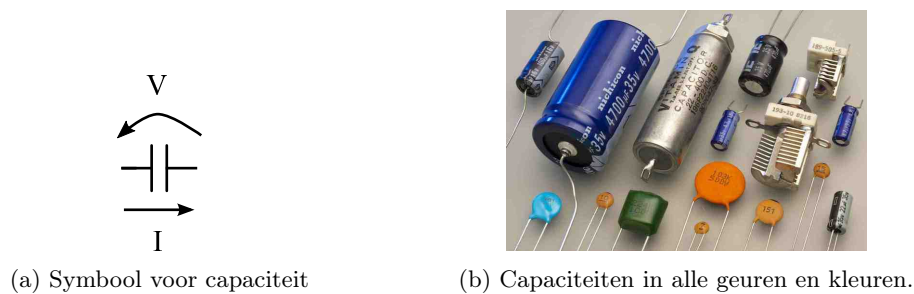
$$I = \dots \qquad P = \dots \qquad (5)$$

2.3 De capaciteit

Een capaciteit of condensator (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:

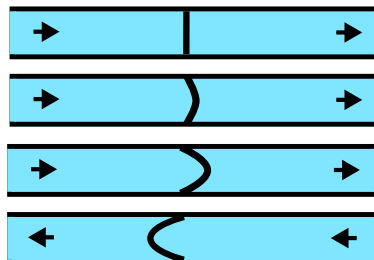


Figuur 11: De capaciteit.

1. Ontkoppeling: Omdat een capaciteit alleen reageert op verandering van spanning, laat het geen DC stroom door. We gaan dit gebruiken om AC signalen door te laten, maar DC 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.³

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 niet constant water laten stromen, anders gaat het stuk. Maar als er het water heen en weer gaat, gaat de membraan bewegen en de golf doorgeven.



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.

2.4 Netwerken

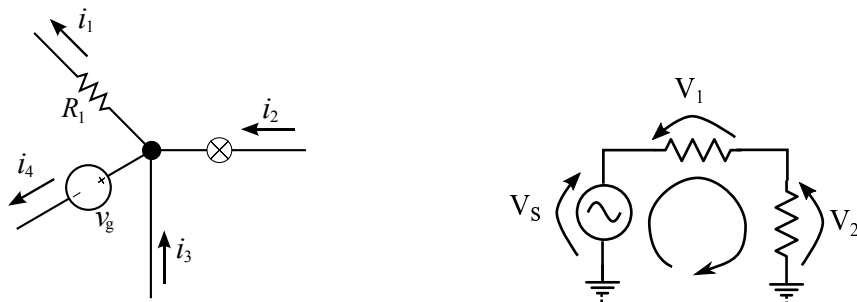
Een netwerk is een aaneenschakeling van componenten, die schematisch wordt voorgesteld zoals in figuur 3b. Een netwerk is gemaakt uit **takken** met componenten op die verbonden zijn via **knooppunten**.

³ Een voorbeeld daarvan is de defibrillator, waar een hoogspanningscapaciteit wordt opgeladen, en in één schok wordt ontladen op het hart van een patiënt.

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

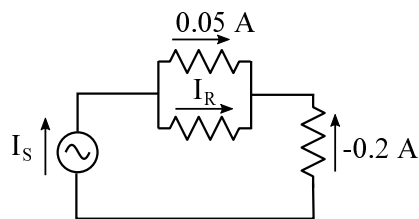
Doe-het-zelf 5 Pas de stroomwet van Kirchhoff toe in figuur 14a, en vind de missende stromen. Doe hetzelfde voor de spanningen in figuur 14b.

$$I_S = \dots$$

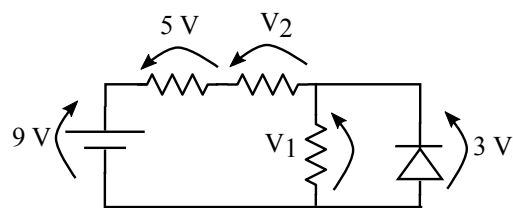
$$V_1 = \dots$$

$$I_R = \dots$$

$$V_2 = \dots$$



(a) Vind I_R en I_S .



(b) Vind V_R en U_C .

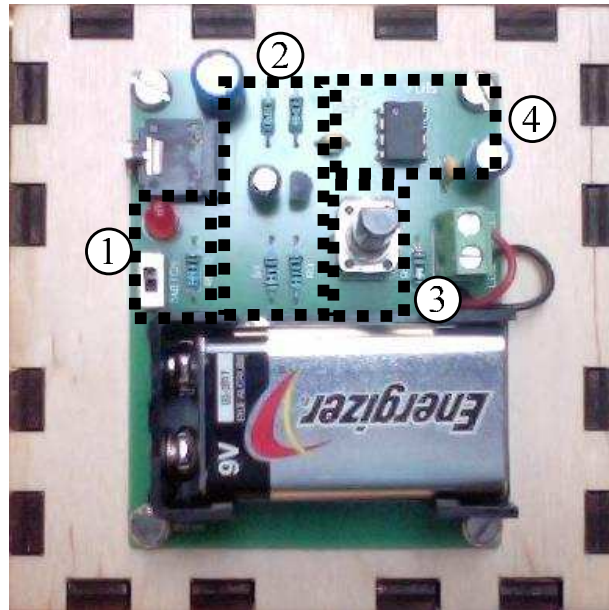
Figuur 14: De wetten van Kirchhoff

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!

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 die je kan vinden in figuur 15. Elke keer dat we een componentswaarde hebben berekend, kan je het alvast overschrijven op het elektrisch schema op de laatste pagina (figuur 29).



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

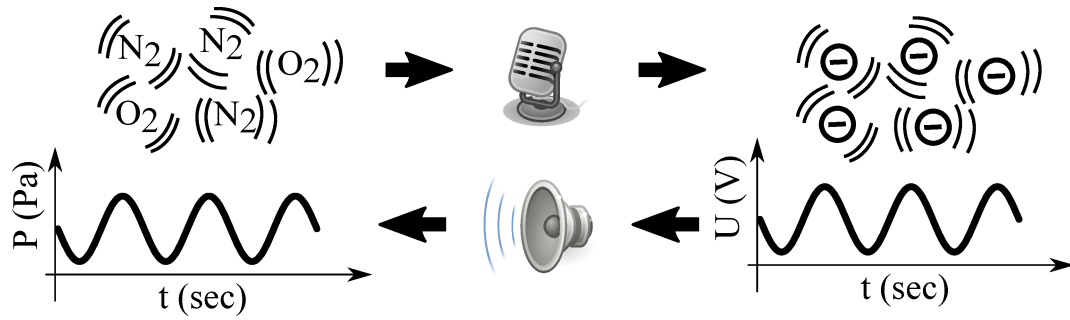
3.1 Introductie: het versterken van audio

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?

Je weet dat geluid een drukgolf is door lucht. 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. 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 gaat die drukgolf omvormen naar een spanningsgolf, met dezelfde frequentie (zie figuur 16). Om de muziek te kunnen horen gebruiken we een luidspreker, die exact het omgekeerde doet van een microfoon.



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

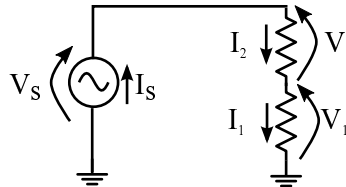
Om luid muziek te kunnen afspelen, moet er veel energie gepompt worden in de luidspreker. Anders gezegd moet het vermogen gebruikt door de luidspreker groot zijn. Dat is het doel van een versterker: het vermogen van de muziek groot maken! Nu dat we weten waarom ons netwerk nuttig is, kunnen we aan de bouw van onze versterker beginnen! Het ontwerpen van een versterker is, zoals je het zult zien, meestal het kiezen van enkele weerstandswaarden.

3.2 De volumeknop: de spanningsdeler

De weerstandsdeler is een basisonderdeel in elektrische schakelingen. Het is een onderdeel dat aan de uitgang een spanning levert dat een fractie is van de ingangsspanning.

Stel dat een bron een muzieksignaal (AC) V_s genereert, en dat we in serie met die spanningsbron twee weerstanden schakelen (figuur 17), dan hebben we een **spanningsdeler** gebouwd.

We gaan aantonen de spanning V_1 een verkleinde versie is van het muzieksignaal V_s .



Figuur 17: Volumeregeling: de spanningsdeler

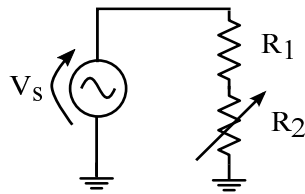
We gaan op zoek naar de uitgangsspanning V_1 . De stroom in het circuit is overal dezelfde (serie weerstanden en wet van Ohm):

$$I = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

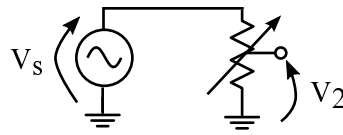
De spanning V_1 vinden we met de wet van Ohm:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_s \quad (9)$$

Je kan zien dat de spanning V_1 , 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 18: Types spanningsdelers.

Doe-het-zelf 6 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 ?

$$R_2 = \dots\dots$$

Let op! Bestaat die weerstandswaarde wel? Kies een bestaande waarde uit de E12-reeks in figuur 7 op pagina 4.

Weerstandsdeler worden vaak gebruikt in netwerken om een specifieke spanning te verkrijgen vanuit een grotere spanning. Wanneer een spanningsdeler met een regelbare weerstand wordt gemaakt (zie figuur 18a), heb je een volumeknop! De combinatie $R_1 R_2$ kan gemaakt worden met een enkele regelbare weerstand, of *potentiometer* (figuur 18b).

Doe-het-zelf 7 Welke weerstand R_{pot} moet de potentiometer hebben, wetend dat de ingangsspanning V maximaal 200 mV ($= 200 \cdot 10^{-3}$ V) is en we het vermogen P door de potentiometer willen beperken tot 4 μ W ($= 4 \cdot 10^{-6}$ W)?

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

Schrijf de waarde die je hebt gevonden voor R_{pot} over in de schakeling op de laatste pagina.

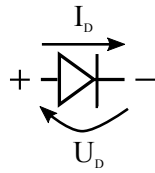
3.3 Het statusledje: de diode

Een handig onderdeel op veel elektronische toestellen is het ledje dat brandt om aan te geven dat het toestel aan is, en dat de batterij nog werkt. LED staat voor Light Emitting Diode, lichtdiode⁵. Een diode (figuur 19a) is een component die alleen stroom doorlaat in de positieve stroomrichting (van + naar -). 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 verdubbelen, maar exponentieel groter worden.

Omdat rekenen met een exponentiële functie tijdrovend 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.

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

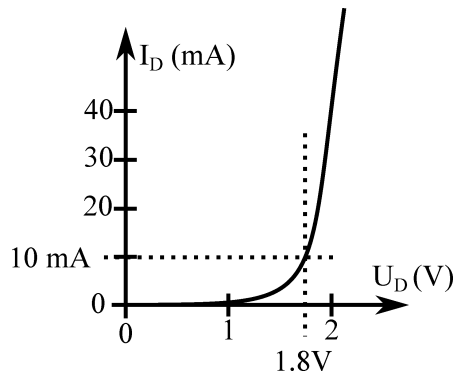


(a) Een diode met voorwaartse spanning U_D en stroom I_D . De diode laat alleen stroom toe in de positieve stroomrichting, van de anode (+) naar de kathode (-).

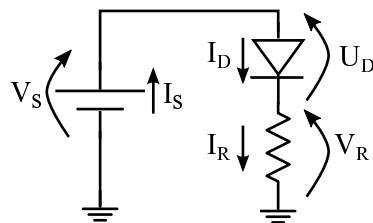


(b) Rood ledje.

Figuur 19: De Diode



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



Figuur 21: Diode network.

We kiezen de stroom I_D dat door de LED vloeit, dat bepaalt de lichtintensiteit. De datasheet⁶ zegt dat 10 mA een typische stroomwaarde is voor onze LED. Op het grafiek 20 zien we dat de spanning over de diode dan 1.8V moet zijn (Deze waarde hangt af van de kleur van de LED).

Dankzij een weerstand kunnen we een netwerk maken die zeker maakt dat de stroom en spanning die we gekozen hebben voor onze led worden opgelegd (figuur 21).

Doe-het-zelf 8 *De spanningsbron die we gaan gebruiken voor onze versterker is een 9V batterij, dus $V_s = 9$ V. We zijn op zoek naar de weerstand die nodig is zodat de $U_D = 1.8$ V en $I_D = 10$ mA. Gebruik de wetten van Kirchhoff:*

$$+V_s - U_D - V_R = 0 \quad (10)$$

$$I_s = I_D = I_R \quad (11)$$

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

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

Kies zeker een E12-weerstand en schrijf de waarde over in de schakeling op pagina 21. We gaan een mechanische schakelaar plaatsen tussen de bron en de diode 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 basisingrediënt 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 (bvb. een batterij) energie inpompen in een netwerk, en zijn dus handig voor versterking.

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.

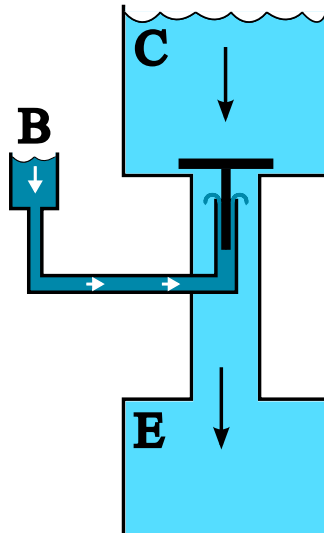
3.4.1 De bipolaire npn transistor

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.

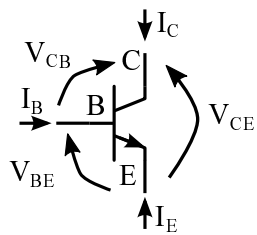
De fysische wetten die de relatie geeft tussen de stromen en de spanningen noemen de Ebers-Moll vergelijkingen. Zoals met de diode worden die niet vaak gebruikt tijdens het ontwerp, omdat ze te complex zijn. We kunnen dan de grafieken gebruiken, maar voor de bipolaire transistor is er nog een derde weg: enkele regeltjes volstaan om te kunnen ontwerpen.

De regels waaraan een bipolaire transistor zich moet houden zijn:

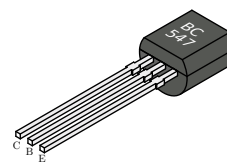
⁶Een datasheet is een document dat de eigenschappen van elektronische componenten beschrijft.



Figuur 22: Hydraulische analogie van de transistor.



(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.

1. De spanning op collector moet positiever zijn dan die op de basis:
2. De spanningsval tussen basis en emitter is ongeveer 0.7 V.
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.

Wiskundig kunnen we dit schrijven als:

$$V_{CB} > 0 \text{ V.} \quad (12)$$

$$V_{BE} \approx 0.7 \text{ V} \quad (13)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (14)$$

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:

$$I_C + I_B = -I_E \quad (15)$$

$$V_{BE} + V_{CB} - V_{CE} = 0 \quad (16)$$

Spijtig genoeg is 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 hebben dus liever dat het niet voorkomt in onze vergelijkingen. Met de stroomwet van Kirchhoff en vergelijking (14) kunnen we volgende relatie vinden:

$$I_C = -\frac{\beta}{\beta + 1} I_E \quad (17)$$

Doe-het-zelf 9 *Elimineer β van de vorige vergelijking door de volgende limiet op te lossen.*

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} I_C = \lim_{\beta \rightarrow \infty} -\frac{\beta}{\beta + 1} I_E = \dots$$

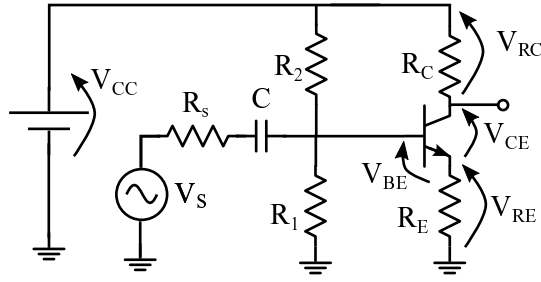
Een negatieve stroom is perfect mogelijk, dat wilt gewoon zeggen dat de stroom loopt tegen de pijlrichting in van figuur 23a. Bijna alle stroom die in de collector vloeit gaat dus via de emitter terug naar buiten. We gebruiken die vergelijking liever dan vergelijking 14 zodat we β niet gebruiken.

3.4.2 Het versterkingsnetwerk

In figuur 24 vind je onze 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} . Het muzieksignaal dat we gaan versterken is in de spanningsbron V_S .

R_s is de serieweerstand van de spanningsbron, en C is een ontkoppelcapaciteit (laat geen DC door).

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.



Figuur 24: Versterkerschakeling met de transistor.

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. (V_B is de spanning van de basis ten opzichte van de grond, analoog voor V_E en V_C). Probeer zeker de redenering te volgen met het schema!

De ingangspanning V_B bepaalt de spanning V_E dankzij de transistor:

$$\begin{aligned} V_{BE} &= V_B - V_E = 0.7 \text{ V} \\ V_E &= V_B - 0.7 \text{ V} \end{aligned}$$

De spanning V_E veroorzaakt een stroom door de weerstand R_E (met minteken omdat I_E en V_E dezelfde pijlrichting hebben)

$$I_E = -\frac{V_E}{R_E} = -\frac{V_B - 0.7 \text{ V}}{R_E}$$

Weeral omwille van de transistor gaat dezelfde stroom lopen door de weerstand R_C :

$$I_C = -I_E = \frac{V_B - 0.7 \text{ V}}{R_E}$$

De spanning over de weerstand R_C is dan:

$$V_{RC} = R_C \cdot I_C = \frac{R_C}{R_E} \cdot (V_B - 0.7 \text{ V})$$

Je ziet al dat de verhouding van R_C en R_E de spanning bepaalt. We drukken als laatste stap de spanning V_C uit:

$$V_C = V_{CC} - V_{RC} = V_{CC} - \frac{R_C}{R_E} \cdot (V_B - 0.7 \text{ V})$$

Doe-het-zelf 10 Door de ontkoppelcapaciteit C en de weerstandsdeler $R_1 R_2$ is

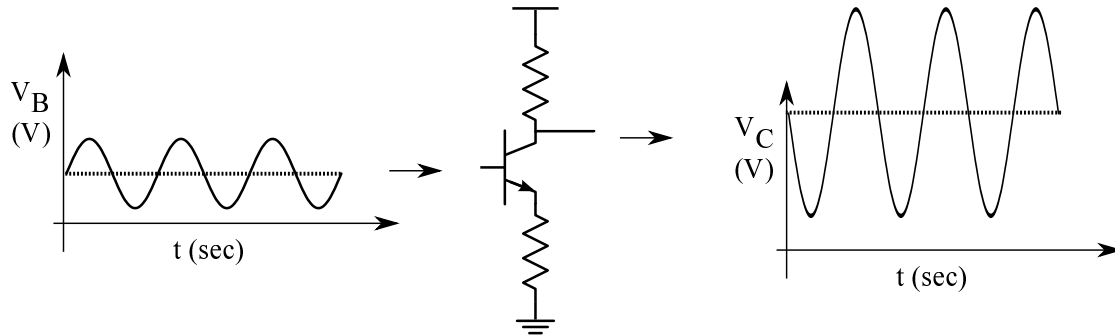
$$V_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} + V_S$$

V_{CC} is een DC spanning, de muziek V_S is een AC spanning. Vul dit in vergelijking 18, en splits de spanning V_C op in een AC en DC gedeelte:

$$(AC) v_C = \dots$$

$$(DC) V_C = \dots$$

Deze schakeling versterkt dus de AC spanning met een factor $-\frac{R_C}{R_E}$, de muziekgolf wordt dus omgedraaid en de amplitude versterkt! De andere DC waarden 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.

Tjongejonge, dat was heel een geworstel om tot die conclusie te komen... Gelukkig zijn we klaar met dingen af te leiden, we hebben alle informatie vergaard die nodig is om dit onderdeel te ontwerpen.

De keuze van R_1, R_2, R_E en R_C doen we met volgende ontwerpmethode. 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!

Zoals vaak bestaat de methode uit het kiezen van DC-waarden van enkele grootheden:

1. Kies de DC-waarde van de stroom I_C .

De maximumwaarde die de BC 547 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 bijvoorbeeld:

$$I_C = 10\text{ mA} \quad (18)$$

2. Kies een DC-voltage V_C .

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. Het 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 wie hier maken is:

$$V_C = 3.5\text{ V} \quad (19)$$

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. 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 .

$$-\frac{R_C}{R_E} = -5 \quad (20)$$

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

Doe-het-zelf 11 *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.*

$$R_C = \dots \quad (21)$$

$$R_E = \dots \quad (22)$$

De DC-waarde van V_B ligt nu al vast (omdat $V_{BE} = 0.7\text{ V}$), en noemen we het biaspunt. De weerstandsdeler dient om die DC-waarde op te leggen. Alhoewel het geen zuivere weerstandsdeler is (normaal gezien is niets aangesloten aan een weerstandsdeler), kunnen we toch de formule van de weerstandsdeler gebruiken hier.

Doe-het-zelf 12 *Bereken het biasvoltage V_B uit V_E . Kies dan de weerstand R_2 zodat de uitgangsspanning V_B de gewenste waarde heeft. Het staat al vast dat $R_1 = 1\text{ k}\Omega$. **Tip:** Vergeet niet de ingangsspanning V_{CC} is 9 V .*

$$V_B = \dots \quad (23)$$

$$R_1 = 1\text{ k}\Omega \quad (24)$$

$$R_2 = \dots \quad (25)$$

Alle weerstanden zijn nu bepaald! Schrijf ze over in het elektronisch schema op pagina 29, vergeet niet E12 weerstanden te kiezen.

Je kan nu zien dat we vermogen hebben versterkt van het ingangssignaal:

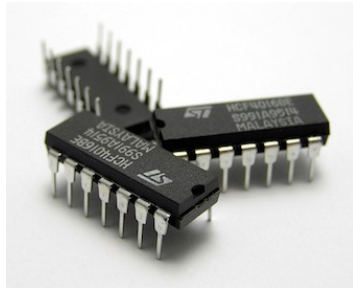
1. de amplitude van de stroom I_B is enkele μA \rightarrow de amplitude van I_C is enkele mA
2. de amplitude van de spanning V_B is enkele mV \rightarrow de amplitude van V_E in de grootteorde van 1 Volt

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 .

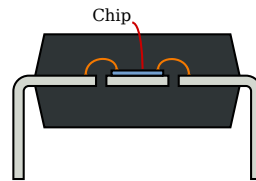
3.5 De magische zwarte doos: de geïntegreerde schakeling

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.



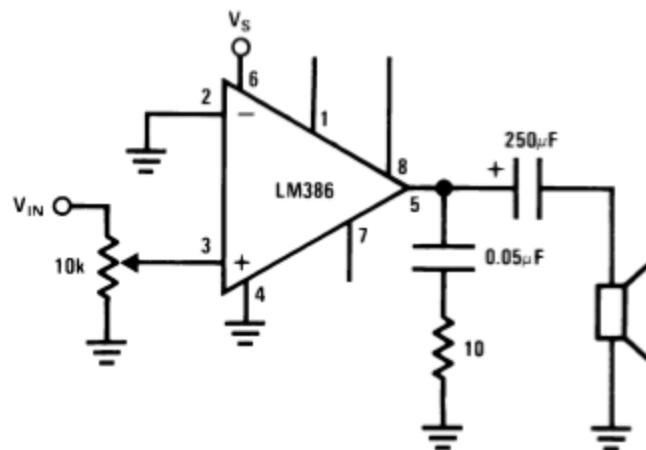
(a) Voorbeelden van IC's, in een DIP (Dual-in-line Packaging) behuizing.



(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 spanningsversterkingsfactor 20.



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.

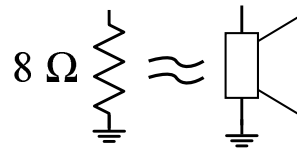
Een IC is niets magisch: het netwerk binnen de behuizing heeft vaak als basisingrediënt transistoren, en werkt in principe zoals de netwerken die we net hebben besproken, alleen op

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!

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:

$$V(t) = 3 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t) \quad (26)$$

$$(27)$$

De stroom door de versterker is dan

$$I(t) = \frac{3 \text{ V}}{8 \Omega} \cdot \sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t) \quad (28)$$

$$(29)$$

Het vermogen is dan

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) = 1.125 \text{ W} \cdot (\sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t))^2 \quad (30)$$

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 $T = 1/440\text{Hz} \approx 2\text{ms}$.

$$P_{gemm} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (31)$$

$$= \frac{1}{1/440\text{Hz}} \int_0^{1/440\text{Hz}} 1.125 \text{ W} \cdot (\sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t))^2 dt \quad (32)$$

Doe-het-zelf 13 *Bereken het gemiddeld vermogen via de integraal:*

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

Met behulp van de goniometrische formule:

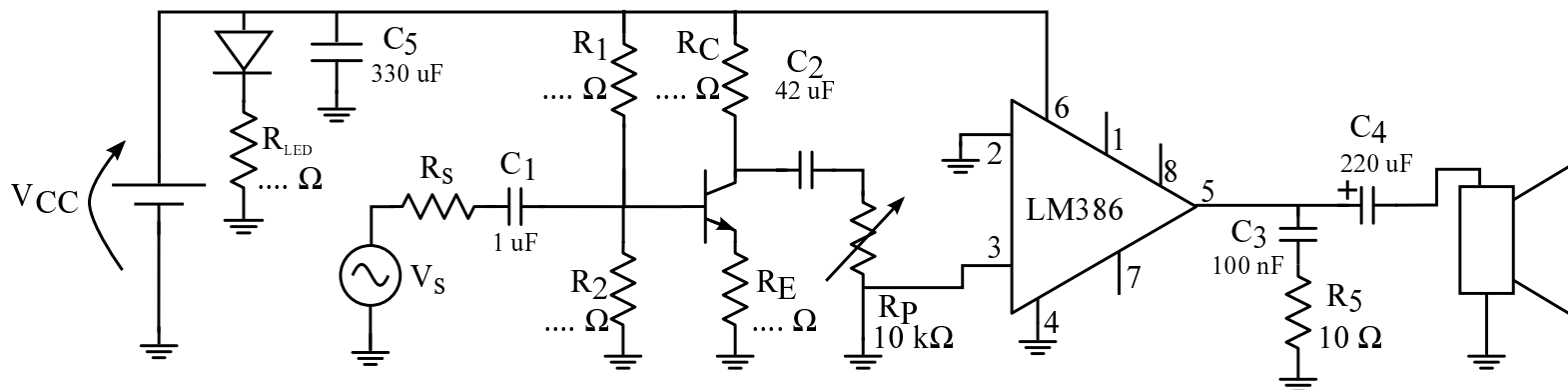
$$\sin^2(\theta) = \frac{1 - \cos(2\theta)}{2}$$

Niet alle elektrische energie wordt omgevormd naar deluidsgolven, 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.



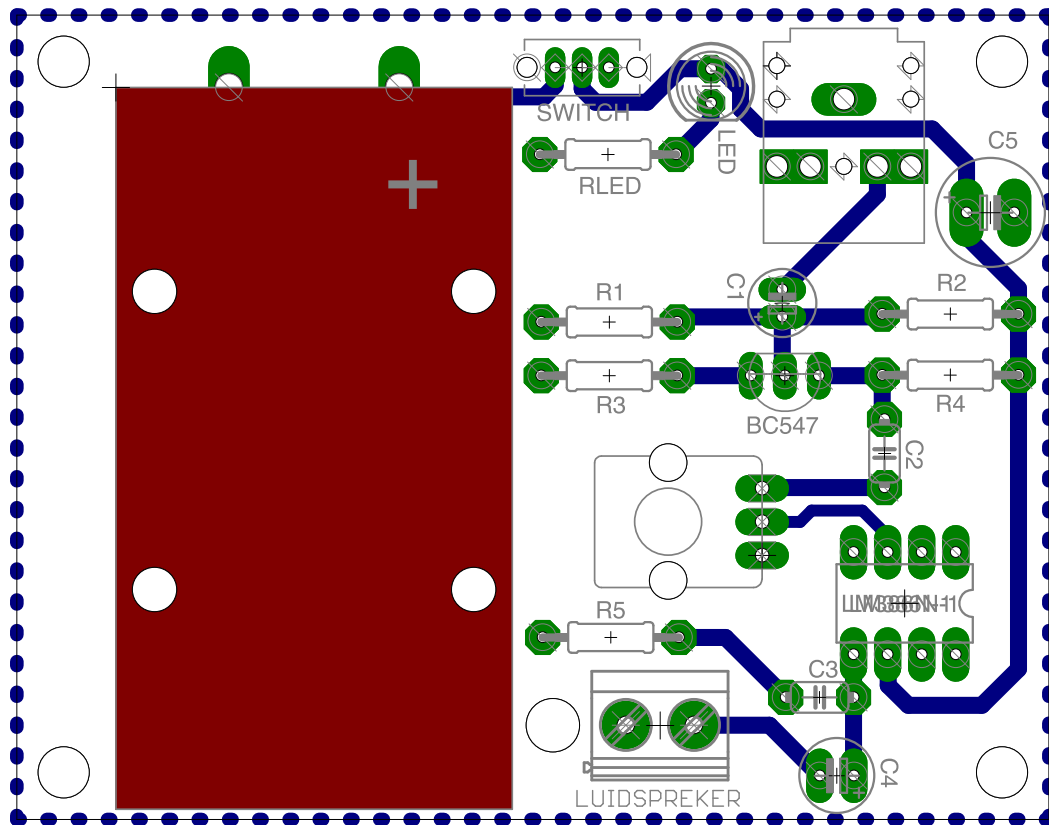
Figuur 29: Volledig Schema

Je kan 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.

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

4.1 Printed Circuit Board

Voor de e-VUBOX werd een printplaatje gemaakt, waarop je zelf gaat solderen. Figuur 30 kan je zeker helpen om de componenten juist te plaatsen. Let op de richting van de LED, de elektrolytische capaciteit en het IC.



Figuur 30: PCB van de e-VUBOX.