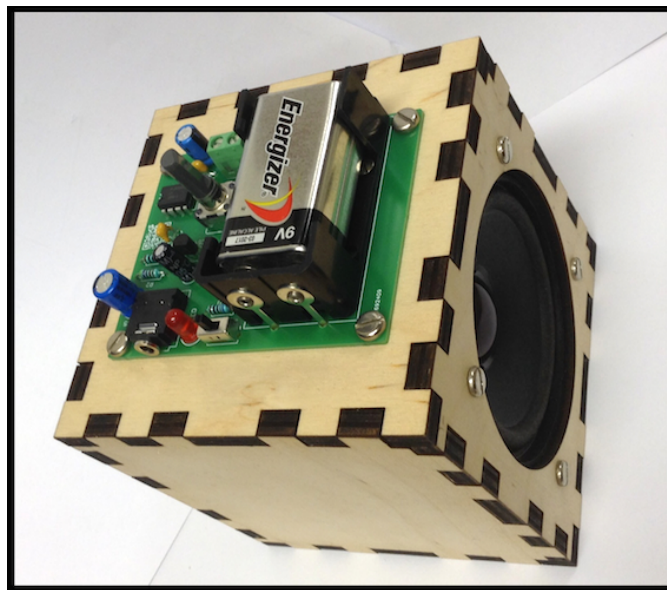


Project Ingenieurswetenschappen: Elektronisch ontwerp van de e-VUBOX

Vrije Universiteit Brussel

Versie 08.2015



Figuur 1: De prachtige e-VUBOX.

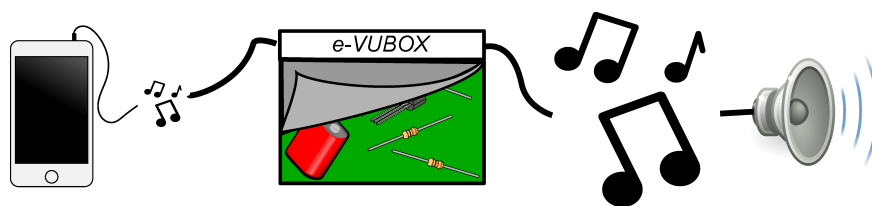
Inhoudsopgave

1	Doelstelling	1
2	Elektronica: componenten en netwerken	1
2.1	De weerstand	3
2.1.1	Serie en parallel	3
2.2	De spanningsbron	4
2.3	De capaciteit	5
2.4	Netwerken	6
3	Bouwstenen van de e-VUBOX	7
3.1	Introductie: het versterken van audio	7
3.2	De volumeknop: de spanningsdeler	9
3.3	Het statusledje: de diode	10
3.4	De versterker: de transistor	11
3.4.1	De bipolaire npn transistor	12
3.4.2	Het versterkingsnetwerk	13
3.5	De magische zwarte doos: de geïntegreerde schakeling	17
3.6	De luidspreker: de (slechte) weerstand.	18
4	Overzicht	20
4.1	Printed Circuit Board	21

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 toestellen te maken, als je maar wist hoe die miraculeuse 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 het muzieksignaal van een muzikspeler. Dit is zodat er genoeg elektrisch vermogen (energie) is om het luid te kunnen afspelen met 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 moeten we een versterker plaatsen tussen het muzieksignaal en de luidspreker?*

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* of *potentiaalverschil* 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.

Soms spreekt men van een spanning in een punt, men bedoelt dan de spanning tussen dat punt en de *aarding* (of *grond*). De aarding is het nulpotentiaal, een vaak gebruikt referentiepunt in een netwerk die word voorgesteld door volgende symbool: \perp . Alle knooppunten die de grond raken zijn onderling verbonden.

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 :*

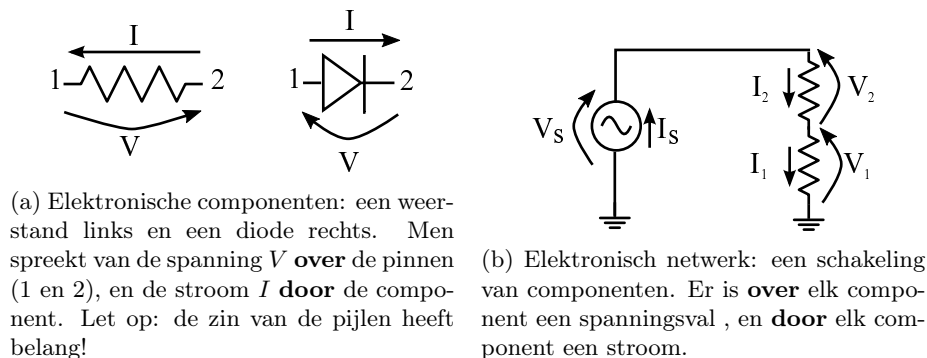
$$V(t) = 3 \text{ V} + 1 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 10 \text{ Hz} \cdot t)$$

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:

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

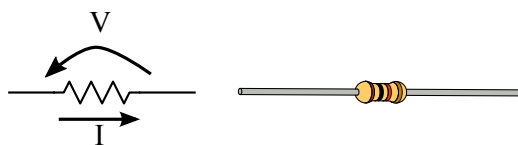
Elektrisch vermogen kan bvb. omgevormd worden door een led in licht, door een luidspreker in geluid of door een weerstand in warmte.



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.



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

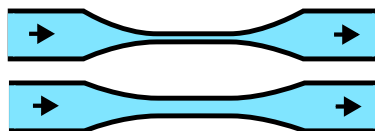
2.1 De weerstand

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 Ohm^2 (Ω). De richting van de pijlen van stroom en spanning is belangrijk (figuur 4) !

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 versmalling.



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

Doe-het-zelf 3 *We hebben een vaste spanning over een weerstand en we willen een grote stroom laten vloeien. Welke weerstand kiezen we dan?*

- 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** (fig. 6a) vormen de weerstand:

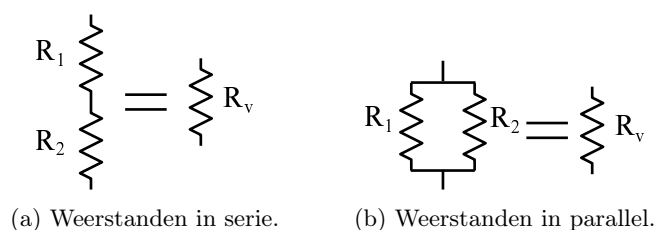
$$R_v = R_1 + R_2. \quad (3)$$

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

2. twee weerstanden in **parallel** (fig. 6b) vormen de weerstand:

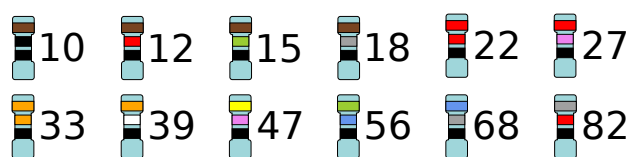
$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

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



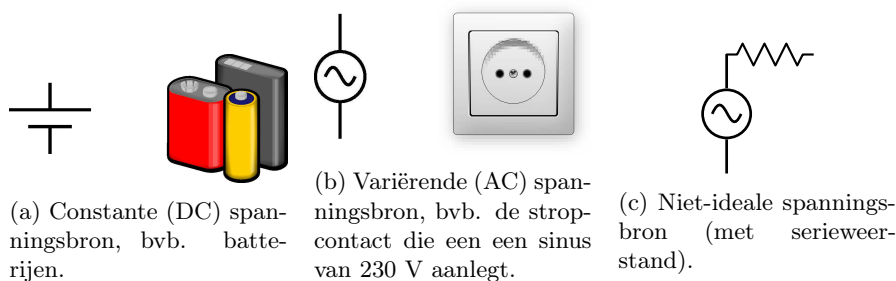
Figuur 6: Serie en parallel.

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.



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 0.47 Ω , 4.7 Ω , 47 Ω , 470 Ω , 4.7 k Ω , etc... (Fig. door Peter Halasz)

2.2 De spanningsbron



Figuur 8: Spanningsbronnen.

We kunnen niet toveren en spanningen doen ontstaan met hocus-pocus, dus we hebben bronnen nodig die ons ladingen gaan leveren. Een perfecte spanningsbron is een simpel elektronisch component met twee pinnen die gehoorzaamt aan een eenvoudige wet: de spanningsbron legt een spanning over zijn pinnen op, onafhankelijk van de rest van het netwerk.

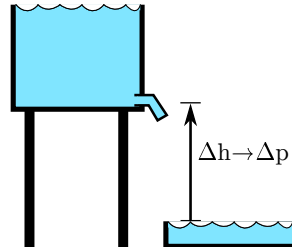
In werkelijkheid kan een spanningsbron maar een beperkte stroom leveren en gedraagt zich dan als een perfecte spanningsbron met een kleine weerstand in serie 8c.

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.

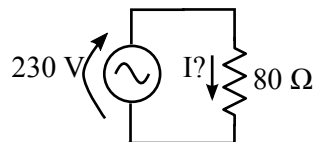
Twee types bron bestaan: DC-bronnen die een vaste waarde aanleggen, of AC-bronnen die een signaal kunnen aanleggen zoals bvb. een sinus. Beide type bronnen hebben een verschillende schematische voorstelling die je kan vinden in figuur 8.

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?

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

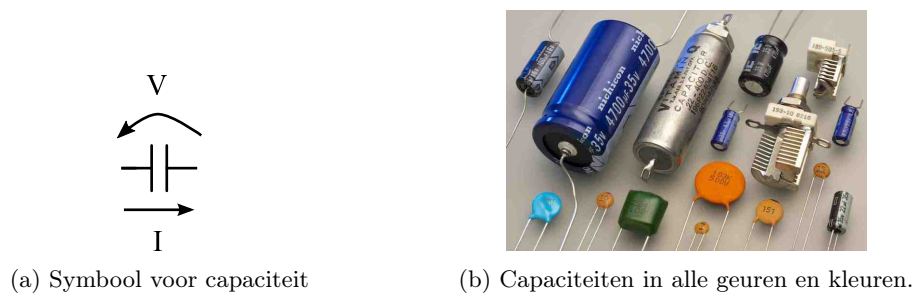
2.3 De capaciteit

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

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.

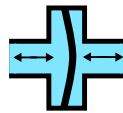


Figuur 11: De capaciteit.

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.

Elektronica is meer dan 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**.

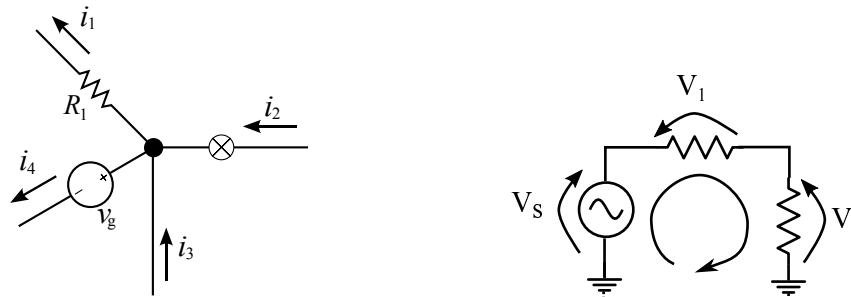
Er zijn maar twee regels die gelden voor elektrische/elektronische netwerken: de wetten van Kirchhoff⁴. Samen met de fysische wetten van de componenten kan je dan alle netwerken van de wereld oplossen. Een netwerk oplossen wilt zeggen dat je alle stromen en spanningen bepaalt in dat netwerk.

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.

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

⁴ 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.



(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

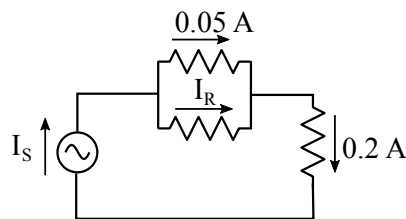
Doe-het-zelf 5 Pas de stroomwet van Kirchhoff toe in figuur 14a, en vind de missende stromen. Doe hetzelfde voor de spanningen in figuur 14b.

$$I_S = \dots$$

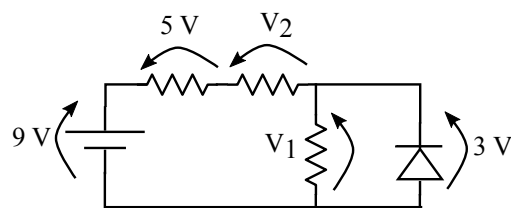
$$I_R = \dots$$

$$V_1 = \dots$$

$$V_2 = \dots$$



(a) Vind I_R en I_S .



(b) Vind V_R en U_C .

Figuur 14: De wetten van Kirchhoff

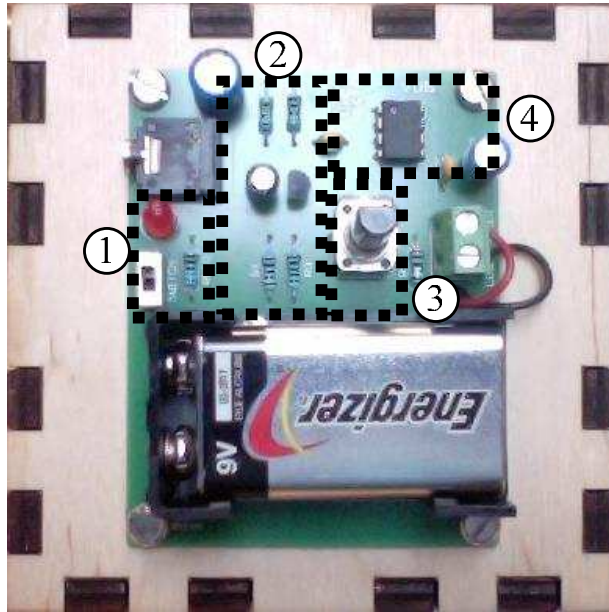
Dit beëindigt de kennismaking met de elektronica. Je hebt nu alle basis die nodig is om aan de bouw van een versterker te beginnen! Daar gaan we alleen nieuwe componenten leren kennen zoals de diode en de transistor, maar voor de rest komt er niets nieuws onder de zon!

3 Bouwstenen van de e-VUBOX

In dit deel gaan we stap voor stap de onderdelen van onze versterker ontwerpen 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).

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?

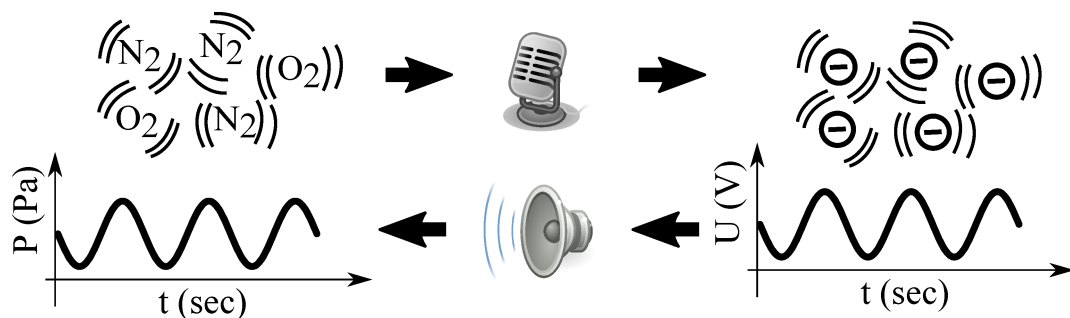


Figuur 15: Het circuit met de onderdelen die we gaan ontwerpen. 1) Statusledje 2) Versterker 3) Volumeknopje 4) Geïntegreerde schakeling

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.

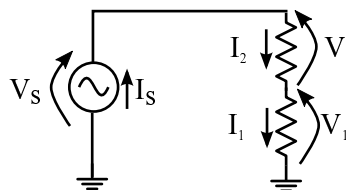
Om luid muziek te kunnen afspelen, moet er veel energie gepompt worden in de luidspreker. Het vermogen in de luidspreker moet dus hoog zijn! Dat is wat een verserker doet: het vermogen versterken van een signaal. Nu dat je weet waarom ons netwerk nodig is, kunnen we aan het ontwerp beginnen.

3.2 De volumeknop: de spanningsdeler

Laten we eerst de volumeknop maken, zodat we het volume kunnen regelen. Dit kan met een spanningsdeler, dat een basisonderdeel is in elektronische 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 de spanning 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:

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

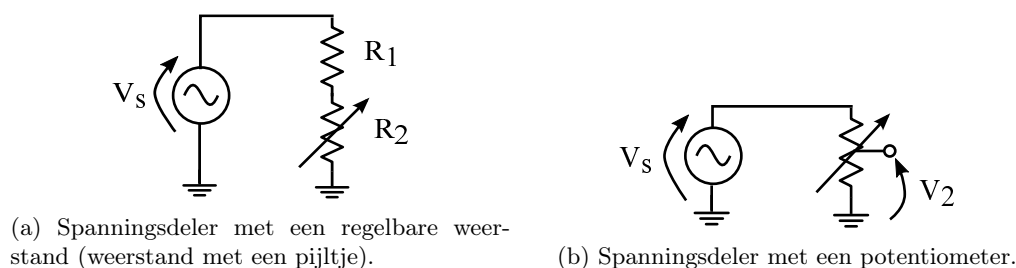
Je kan zien dat de spanning V_1 , die we de uitgangsspanning noemen, altijd kleiner is dan (of gelijk aan) de ingangsspanning V_s . Daarom noemen we dit een spanningsdeler.

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.

spanningsdelers 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 ook gemaakt worden met een enkele regelbare weerstand met een aftakking, of *potentiometer* (figuur 18b).



Figuur 18: Types spanningsdelers.

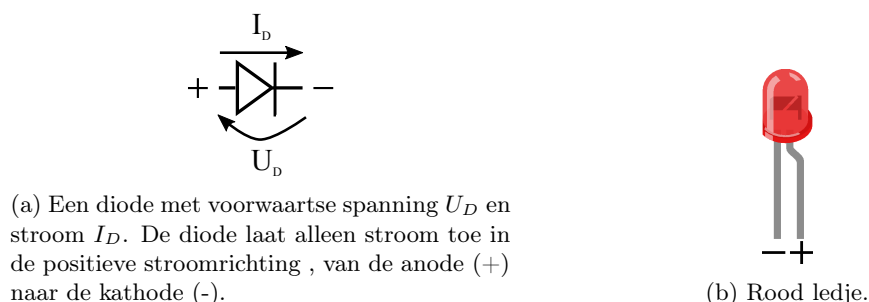
Doe-het-zelf 7 Welke weerstand R_{pot} moet de potentiometer hebben, wetend dat deingangsspanning V maximaal 200 mV ($= 200 \cdot 10^{-3}\text{ V}$) is en we het vermogen P door de potentiometer willen beperken tot $4\text{ }\mu\text{W}$ ($= 4 \cdot 10^{-6}\text{ W}$)?

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

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.



Figuur 19: De Diode

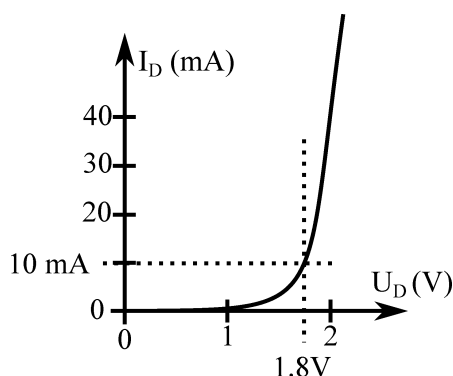
In figuur 20 zie je de grafiek van de stroom in functie van de spanning van de diode die we gaan gebruiken in onze versterker. In tegenstelling met de weerstand is de fysische wet van de diode niet-lineair (= het is geen rechte): het is een exponentiële functie. Als je het voltage verdubbelt over de 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.

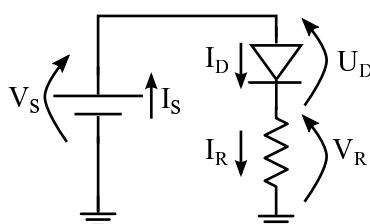
We kiezen de stroom I_D dat door de LED vloeit, dat bepaalt de lichtintensiteit. De datasheet⁶ zegt dat 10 mA een typische stroomwaarde is voor onze LED. Op het grafiek 20 zien we dat de spanning over de diode dan 1.8 V moet zijn (Deze waarde hangt af van de kleur van de LED).

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

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



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



Figuur 21: Diode netwerk.

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 $V_s = 9\text{ V}$. We zijn op zoek naar de weerstand die nodig is zodat $U_D = 1.8\text{ V}$ en $I_D = 10\text{ mA}$. Gebruik de wetten van Kirchhoff in het netwerk 21:

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

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

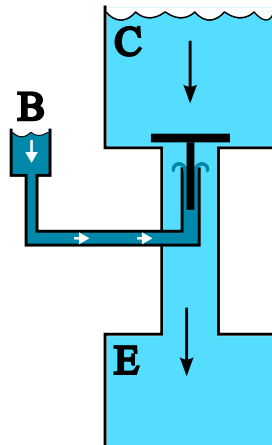
Kan je de waarde vinden van de weerstand die nodig is? **Tip:** bepaal I_R en V_R uit de wetten van Kirchhoff.

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

Kies zeker een E12-weerstand en schrijf de waarde over in de schakeling op pagina 20. We gaan een schakelaar plaatsen tussen de bron en de diode zodat het licht alleen brandt wanneer het toestel aan is, natuurlijk.

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



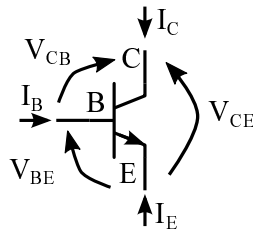
Figuur 22: Hydraulische analogie van de transistor.

extra energiebron (bvb. een batterij) energie inpompen in een netwerk, en zijn dus handig voor versterking.

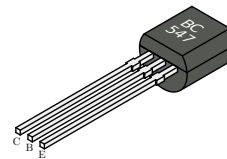
We gaan de werking van de transistor uitleggen met zijn waterequivalent (figuur 22). De watertransistor werkt als volgt: als er geen stroom vloeit in de basis (B), dan sluit het ventiel het contact tussen collector (C) en emitter (E), er loopt geen stroom door de transistor. Een kleine stroom in de basis 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!

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 de 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) is de stroomversterkingsfactor, typisch ten minste 50 maar kan veel groter zijn. Dit is waarom de transistor nuttig is: een 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 een niet echt 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.*

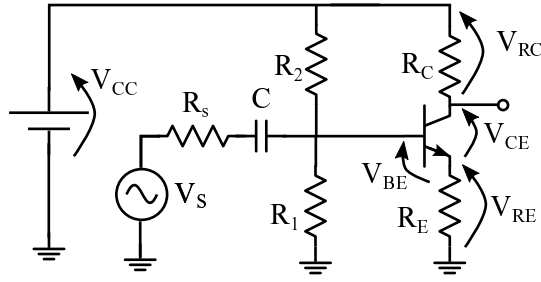
$$I_C \approx \lim_{\beta \rightarrow \infty} -\frac{\beta}{\beta+1} I_E = \dots$$

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

De transistor gaan we dus gebruiken om de muziek te versterken. 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 .

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.

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

Om de versterker te ontwerpen moeten we de weerstanden R_1, R_2, R_E en R_C kiezen. We gaan zien dat onze schakeling de ingangsspanning V_B versterkt aan de uitgangsspanning V_C . (V_B is de spanning van de basis ten opzichte van de grond, hetzelfde voor V_E en V_C). Probeer zeker de redenering te volgen met het schema!

De ingangsspanning V_B bepaalt de spanning V_E dankzij de transistorwerking:

$$V_{BE} = V_B - V_E = 0.7 \text{ V} \quad (18)$$

$$V_E = V_B - 0.7 \text{ V} \quad (19)$$

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

$$I_E = -\frac{V_E}{R_E} = -\frac{V_B - 0.7 \text{ V}}{R_E} \quad (20)$$

Dankzij de transistor gaat dezelfde stroom lopen door de weerstand R_C :

$$I_C = -I_E = \frac{V_B - 0.7 \text{ V}}{R_E} \quad (21)$$

De spanning over de weerstand R_C is dan:

$$V_{RC} = R_C \cdot I_C = \frac{R_C}{R_E} \cdot (V_B - 0.7 \text{ V}) \quad (22)$$

En we drukken, als laatste stap, de spanning V_C uit:

$$V_C = V_{CC} - V_{RC} = V_{CC} - \frac{R_C}{R_E} \cdot (V_B - 0.7 \text{ V}) \quad (23)$$

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

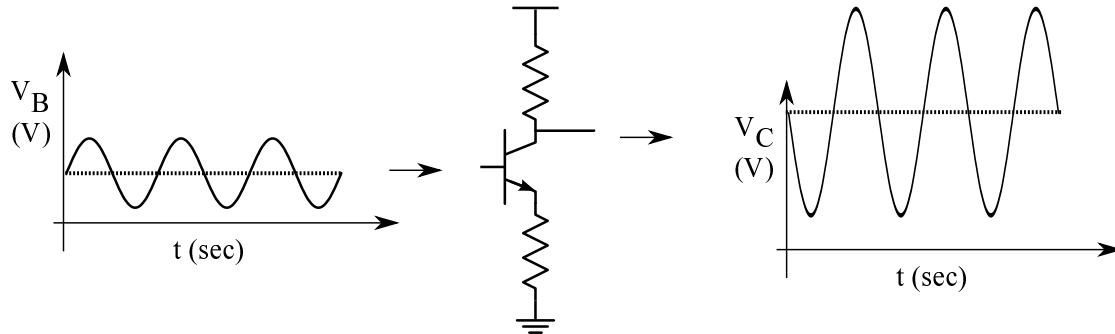
$$V_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} + V_S$$

V_{CC} is een DC spanning, de muziek V_S is een AC spanning. Vul dit in vergelijking 23, en splits de spanning V_C op in een AC en DC gedeelte:

$$(AC) v_C = \dots$$

$$(DC) V_C = \dots$$

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

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 de versterkerschakeling te ontwerpen. We moeten de weerstanden kiezen zodat we de muziek versterken!

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:

$$I_C = 10\text{ mA} \quad (24)$$

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 $V_{CC} = 9\text{ V}$. We moeten dus V_C kiezen zodat $0.7\text{ V} < V_C < V_{CC}$. Let 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:

$$V_C = 3.5\text{ V} \quad (25)$$

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.

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 1V willen krijgen, we hebben dus een versterkingsfactor nodig van -5 .

$$-\frac{R_C}{R_E} = -5 \quad (26)$$

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:** $V_{R_C} = V_{CC} - V_C$

$$R_C = \dots \quad (27)$$

$$R_E = \dots \quad (28)$$

De DC-waarde van V_B ligt nu al vast (omdat $V_{BE} = 0.7V$), en noemen we het biaspunt. De spanningsdeler $R_1 R_2$ dient om die DC-waarde op te leggen. Alhoewel het geen zuivere spanningsdeler is (normaal gezien is niets aangesloten aan een spanningsdeler), kunnen we toch de formule van de spanningsdeler 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 $R_1 = 1k\Omega$. **Tip:** Vergeet niet de ingangsspanning V_{CC} is 9V.

$$V_B = \dots \quad (29)$$

$$R_1 = 1k\Omega \quad (30)$$

$$R_2 = \dots \quad (31)$$

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

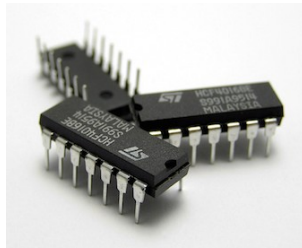
Je kan nu zien dat we vermogen hebben versterkt van het ingangssignaal:

1. de amplitude van de ingangsstroom I_B is enkele $\mu A \rightarrow$ de amplitude van de uitgangsstroom I_C is enkele mA
2. de amplitude van de ingangsspanning V_B is enkele mV \rightarrow de amplitude van de uitgangsspanning V_E in de grootteorde van 1 Volt

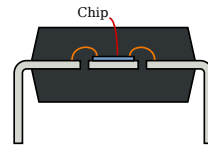
De stroom en de spanning zijn versterkt, dus het vermogen is gestegen! We zijn vertrokken van een signaal van enkele μW en we hebben nu uiteindelijk een signaal van enkele mW.

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.



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

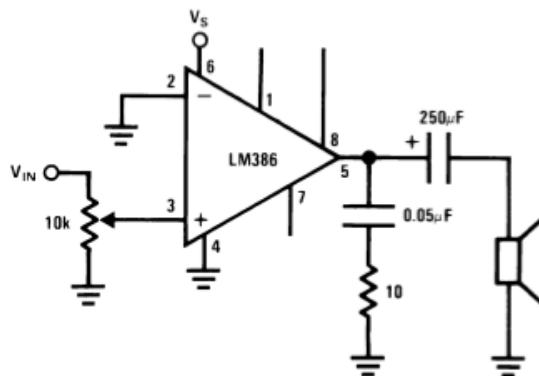


(b) Doorsnede van een IC, het circuit (of chip) in de behuizing wordt verbonden met de buitenwereld via de pinnetjes.

Figuur 26: Geïntegreerde schakelingen.

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.

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!

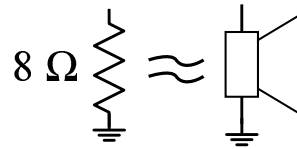
Het praktische aan een IC is dat we de schakeling in figuur 27 gewoonweg moeten bouwen, alles is al ontworpen. We vervangen alleen de capaciteiten van $0.05\mu\text{F}$ en $250\mu\text{F}$ door capaciteiten van $0.1\mu\text{F}$ en $220\mu\text{F}$, omdat deze in het lab beschikbaar zijn. Geen nood, het circuit gaat zich niet anders gedragen omwille van die kleine verandering.

Let op: 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:

$$V(t) = 3 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t) \quad (32)$$

$$(33)$$

De stroom door de versterker is dan

$$I(t) = \frac{3 \text{ V}}{8 \Omega} \cdot \sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t) \quad (34)$$

$$(35)$$

Het vermogen is dan

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) = 1.125 \text{ W} \cdot (\sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t))^2 \quad (36)$$

Het vermogen in functie van de tijd zegt niet zo veel, we spreken liever van het gemiddeld vermogen van een luidspreker. Het gemiddelde van een periodieke functie kunnen we uitrekenen met een leuke integraal! De integraal hangt af van de periode T van de functie, die het inverse is van de frequentie. In ons geval is $T = 1/440 \text{ Hz} \approx 2 \text{ ms}$.

$$P_{gemm} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (37)$$

$$= \frac{1}{1/440 \text{ Hz}} \int_0^{1/440 \text{ Hz}} 1.125 \text{ W} \cdot (\sin(2\pi \cdot 440 \text{ Hz} \cdot t))^2 dt \quad (38)$$

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

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

Met behulp van de goniometrische formule:

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

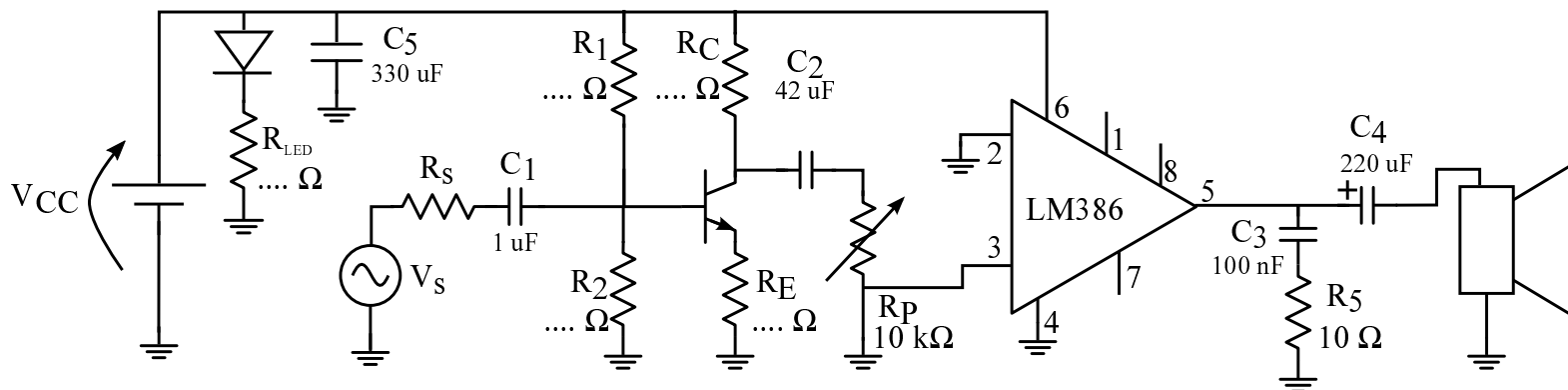
$$P_{gemm} = \dots$$

Niet alle elektrische energie wordt omgevormd naar geluidsgolven, veel wordt spijtig genoeg verloren als warmte. Toch komt er een goed volume uit de luidspreker (indien je alles juist gaat solderen)!

Het denkwerk is gedaan! We hebben gezien dat met enkele wiskundige regels een volledig elektronisch circuit kan ontworpen worden. Als je dit een leuke ervaring vond, zijn ingenieursstudies misschien iets voor jou. We gaan nu alle onderdelen bij elkaar plaatsen om de volledige e-VUBOX te maken.

4 Overzicht

In figuur 29 zie je het volledig elektronisch schema van de e-VUBOX. Je herkent de twee trappen: de transistorversterker als eerste stap, het IC-circuit als tweede stap. Het ledje zie je ook aan de ingang. Omdat zeker te zijn dat alles zou werken, zijn er enkele componenten



Figuur 29: Volledig Schema

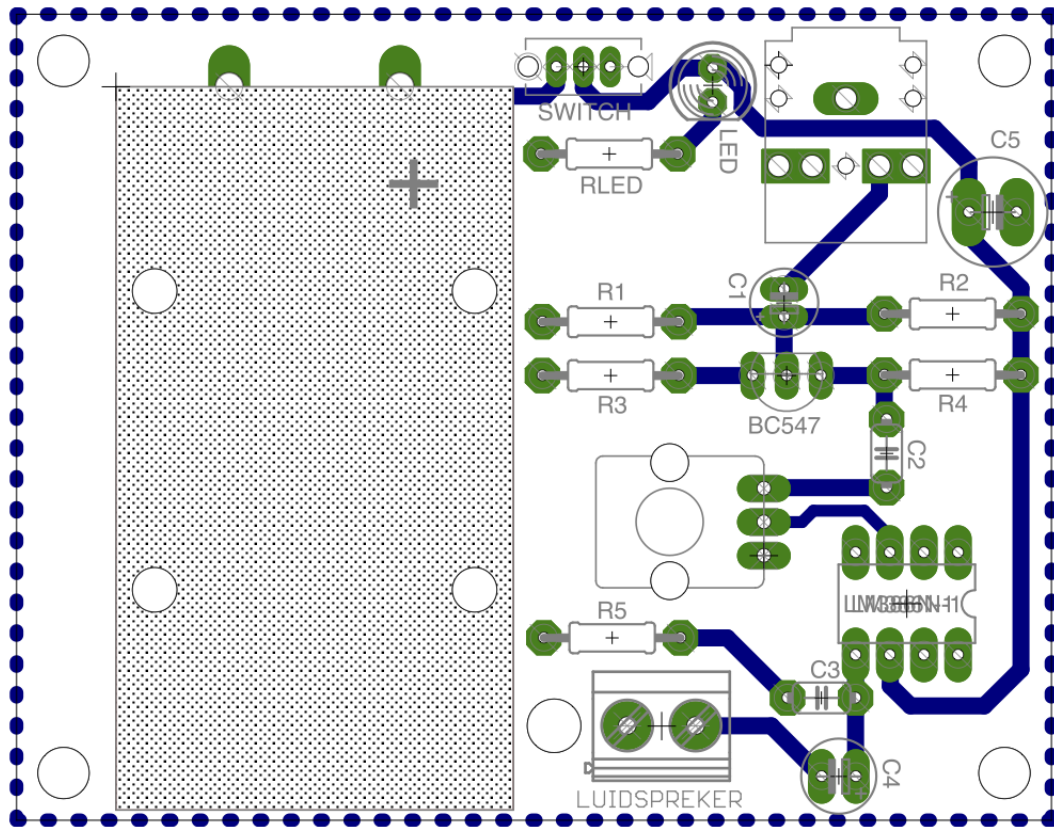
toegevoegd: C_1 en C_2 zijn ont koppelcapaciteiten en dienen om DC signalen te blokkeren, C_5 werkt als een hulpbatterij.

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 (E12) 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.

Referenties

- [1] Horowitz, Paul, and W. Hill. "The Art of Electronics. 2nd edition." Cambridge University (1989).
- [2] Cornelis, Jan. "Cursus Elektronica." Vrije Universiteit Brussel (2013).