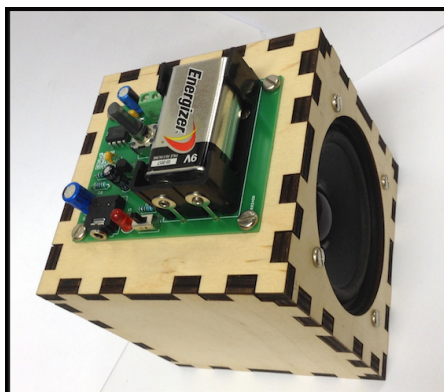


# Labo: Ontwerp van een audio versterker



Figuur 1: E-VUBOX 2k15

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Doelstelling</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Elektronica: componenten en schakelingen</b>	<b>2</b>
2.1	De weerstand . . . . .	3
2.1.1	Serie en parallel . . . . .	3
2.2	De spanningsbron . . . . .	4
2.3	Mini-netwerk . . . . .	4
2.4	Netwerken . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Bouwstenen van de E-VUBOX</b>	<b>6</b>
3.1	Versterken van audio . . . . .	6
3.2	De volumeknop: de spanningsdeler . . . . .	7
3.3	De aan/uit LED: de diode . . . . .	9
3.4	De versterker: de transistor . . . . .	10

## 1 Doelstelling

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

zo'n taak vervuld. We gaan beginnen met een inleiding in de elektronica, kennismaking met basisregels, componenten en schakelingen, naar complexere onderdelen, tot de versterker!

Elektronica kan interessant zijn om te bestuderen omdat veel leuke en/of nuttige objecten mogelijk zijn omwille van elektronica. Alledaagse objecten zoals een GSM of een computer bevatten veel elektronica. In de ziekenhuis kan je ook allerhande toestellen vinden die dagelijks levens redden. In de entertainment wereld vind je elektronica terug in cameras, schermen en spelconsoles. Veel geavanceerde objecten zoals zelfrijdende autos, vliegtuigen, straaljagers en automatische robots in fabrieken zouden niet mogelijk zijn zonder de elektronica.

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

## 2 Elektronica: componenten en schakelingen

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

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

1. de **spanning** (ook voltage of potentiaal genoemd) gemeten in volt [V], vaak aangeduid met de letter  $V$  of  $U$ . Dit stelt het verschil in potentiële elektrische energie **tussen twee punten** <sup>1</sup>.
2. de **stroom** gemeten in ampère [A], vaak aangeduid met de letter  $I$ . Dit stelt de verplaatsing voor van een hoeveelheid ladingen (hier elektronen) door de component per tijdseenheid.

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

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

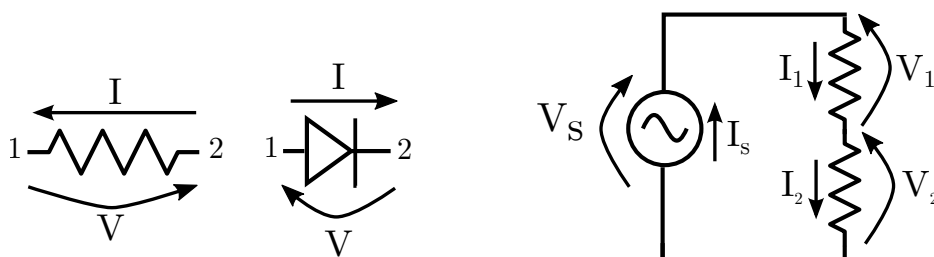
$$V(t) = 4\text{V} \cdot e^{-\frac{t}{10\text{s}}}. \quad (2)$$

waar  $t$  de tijd is in seconden.

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

---

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



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

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

Figuur 2: Componenten en een schakeling.

## 2.1 De weerstand

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

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

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

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

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

### 2.1.1 Serie en parallel

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

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

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

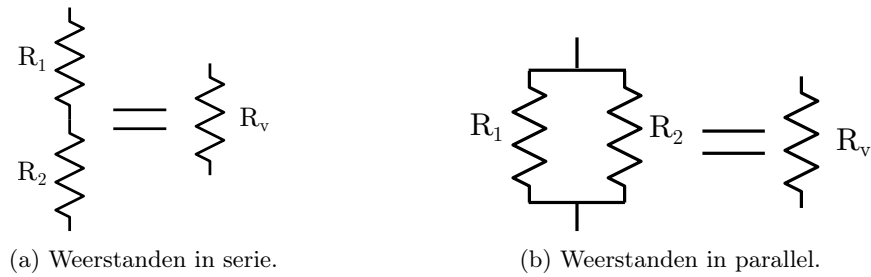
Door weerstanden in serie te plaatsen, krijg je dus een grotere weerstand.

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

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

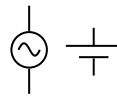
Door weerstanden in parallel te plaatsen, krijg je een kleine weerstand.

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



Figuur 3: Serie en parallel.

## 2.2 De spanningsbron

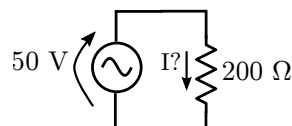


Figuur 4: Spanningsbronnen. Links: de spanning verandert met de tijd. Rechts: de spanning is constant.

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

## 2.3 Mini-netwerk

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



Figuur 5: Voorbeeldnetwerkje.

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

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

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

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

## 2.4 Netwerken

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

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

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

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

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

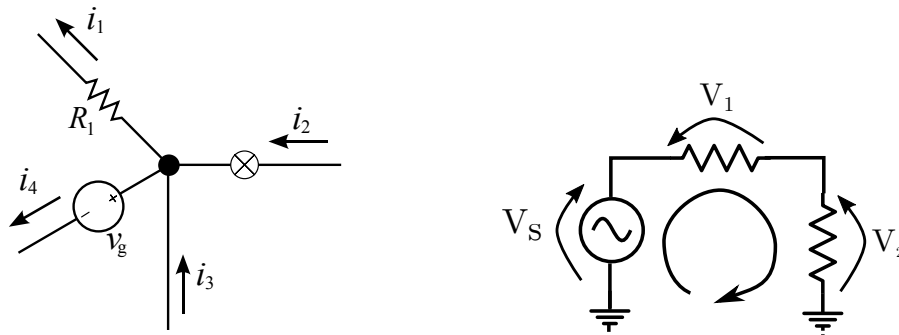
**Voorbeeld** De spanningswet (figuur 6b) pas je zo toe: vind een gesloten lus in het netwerk (vergeet niet dat alle pinnen aan grond met elkaar verbonden zijn). Teken een lus met een zekere richting in het netwerk. Schrijf de som van de spanningen rekening houdend met de volgende regels:

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

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

---

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



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

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

Figuur 6: De wetten van Kirchhoff

**Oefening van Kirchhoff:** - 4 takken met één onbekende: KCL - lus met 5 componenten met één onbekende spanning: KVL

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

### 3 Bouwstenen van de E-VUBOX

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

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

#### 3.1 Versterken van audio

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

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

Een voorbeeld van een specifiek geluid is een muzieknoot. De muzieknoot “la” hoor je wanneer de luchtdruk op een zekere plaats golft met een frequentie<sup>4</sup> van 440 Hz. Je kan de luchtdruk die we horen als een “la” wiskundig voorstellen als een sinus:

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

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

<sup>4</sup>frequentie is het aantal volledige golven (op en neer) per seconde

De microfoon gaat die drukgolf omvormen naar een spanningsgolf, met dezelfde frequentie (zie figuur 7. Men kan die nu versterken met een elektronisch netwerk, omdat we een spanning hebben! Die spanningsgolf kan dan onmiddellijk worden versterkt of opgeslagen in een mp3-bestand en later gebruikt in een muziekspeler.



Figuur 7: Een microfoon vormt de luchtdruk golf (eenheid: Pascal) om in een spanningsgolf (eenheid: Volt).

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

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

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

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

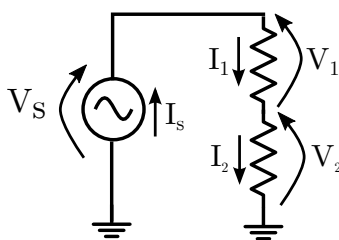
Nu dat we weten waarom ons netwerk nuttig is, kunnen we aan de bouw van onze versterker beginnen!

### 3.2 De volumeknop: de spanningsdeler

We hebben de muziek dus omgevormd naar een spannings-signaal. Stel dat  $V_s$  ons muzieksignaal is, en dat we in serie met die spanningsbron twee weerstanden schakelen (figuur 8), dan hebben we een zogenaamde **spanningsdeler** gebouwd. We gaan aantonen de spanning  $V_2$  een verkleinde versie is van het muzieksignaal  $V_s$ . Dit is handig als het geluid te luid is, en dat we het volume willen regelen.

Met de stroomwet van Kirchhof kunnen we zien dat alle stromen in het circuit gelijk zijn ( $I_s = I_1 = I_2$ ). We kunnen die stroom berekenen door twee weerstanden te vervangen door hun serie-weerstand, en de stroom door de serieweerstand uit te drukken:

$$I_2 = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \quad (9)$$



Figuur 8: Volumeregeling: de spanningsdeler

We gebruiken dan de wet van Ohm om  $V_2$  te vinden:

$$V_2 = R_2 \cdot I_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s \quad (10)$$

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

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

waardes gebruiken die later nuttig gaan zijn voor transistor.

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

In de praktijk wordt een spanningdeler vaak met een regelbare weerstand gemaakt (zie figuur 9a), zodat de verhouding tussen de in- en uitgangsspanning kan veranderd worden. In figuur 9b zie je een **potentiometer**, dat is een regelbare spanningsdeler. Het is eigenlijk een regelbare weerstand die je in het midden kan aftakken, en dat vormt een spanningsdeler omdat boven de aftakking een weerstand is, en eronder ook.

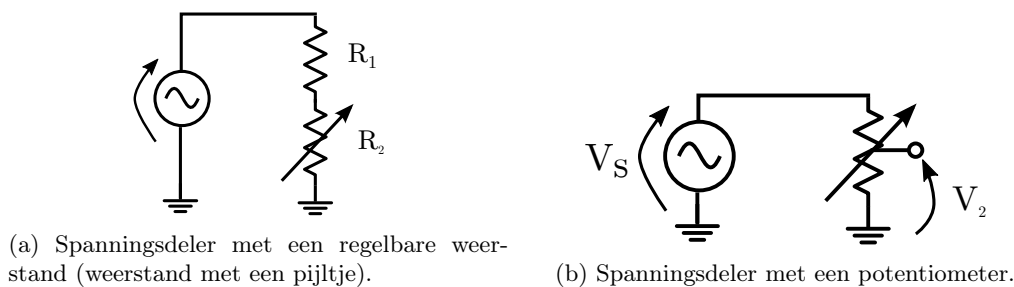
We gaan een potentiometer gebruiken als volumeknop! Omdat je een potentiometer volledig kunt toedraait of opendraaien, maak de grootte van de weerstand niets uit voor de spanningsverhouding, je kan van een verhouding van 0 tot 1 gaan. Maar wat wel belangrijk is, is dat er niet te veel stroom door de potentiometer vloeit, want anders wordt er vermogen gebruikt door de volumeknop en gaan onze batterij zeer snel plat zijn.

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

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

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

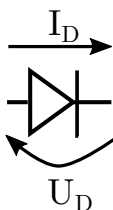




Figuur 9: Types spanningsdelers.

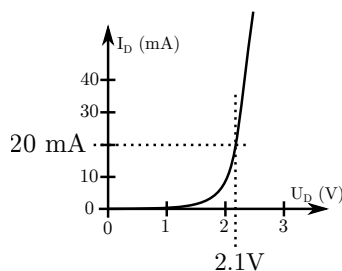
### 3.3 De aan/uit LED: de diode

Een handig onderdeel op veel elektronische toestellen is het LED-lampje dat brandt om aan te geven dat het toestel aan is. LED staat voor Light Emitting Diode, lichtgevende diode<sup>5</sup>. Laten we eens kennismaken met de diode... Een diode (figuur 10) is een heel belangrijke en nuttige elektronische component, die alleen stroom doorlaat in één richting.



Figuur 10: Een diode met voorwaarte spanning  $U_d$  en stroom  $I_D$ . De diode laat alleen stroom toe in de positieve stroomrichting (richting van de stroompijl).

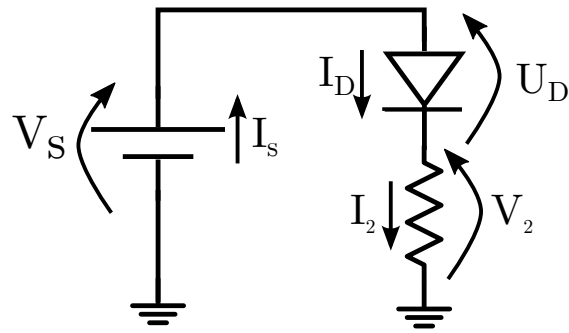
Wanneer een stroom loop door de diode, ontstaat een voorwaarte spanning over de diode. In figuur 11 zie de grafiek van de stroom in functie van de spanning van de diode die we gaan gebruiken in onze versterker. In tegenstelling met de weerstand is de fysische wet van de diode niet-linear (= het is geen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



Figuur 11: Grafiek van de stroom in functie van de spanning van een diode.

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

<sup>5</sup>Er bestaan ook niet-lichtgevende diodes.



Figuur 12: Diode netwerk.

- 20 mA omdat leuk lichtje
- komt overeen met 2.1 V
- moeten we zorgen dat rest van spanning over weerstand
- bereken de weerstand die nodig is.

### 3.4 De versterker: de transistor