



Vrije Universiteit Brussel

Basiselektronica

Practicumnota's

ing. Y. Verbelen



Vrije Universiteit Brussel
Bachelor Industriële Wetenschappen
Nijverheidskaai 170, B-1070 Anderlecht
yannick.verbelen@vub.ac.be



This work is licensed under the Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

v3.0

Voorwoord

Weinig technologiedomeinen gaan zo snel vooruit als elektronica. Sinds in 1907 de vacuümtubetriode werd geïntroduceerd en in 1925 het eerste patent voor een veld-effecttransistor (FET) werd aangevraagd, heeft elektronica een steile en niet te stuiten opmars gekend. Amper een eeuw later is elektronica niet meer weg te denken uit ons dagelijkse leven. Onze samenleving wordt in al zijn facetten gestuurd door elektronische toepassingen: in industrie, transport, communicatie, gezondheidszorg en zelfs vrije tijd staan elektronische apparaten vandaag centraal.

Hoewel de elektronica sinds zijn ontstaan talloze evoluties en revoluties heeft ondergaan, voldoen hedendaagse schakelingen nog steeds aan een klein aantal eenvoudige basisregels en -wetten uit de fysica. Aan de hand van deze eenvoudige regels is het mogelijk om, mits het nodige inzicht en ervaring, de werking van zelfs complexe schakelingen en systemen te doorgronden.

In het WPO *Basiselektronica* keren we terug naar de basisbeginselen van de elektriciteit en de elektronica, en onderzoeken we de fundamenteen waarop moderne elektronische schakelingen zijn gebouwd. Gaandeweg leer je elektronische problemen oplossen, schakelingen ontwerpen en logica implementeren, om zo tot ingewikkelde systemen te komen met mogelijkheden die je bekend zullen zijn van toestellen die je elke dag gebruikt. Welkom in de wondere wereld van de elektronica!

Het staat eenieder vrij om deze syllabus geheel of gedeeltelijk te repliceren en te verspreiden voor niet-commerciële doeleinden zoals vastgelegd in de Creative Commons BY-NC-SA 4.0 International licentie. Vrije toegang tot informatie behoort een basisrecht te zijn voor iedereen.

Anderlecht, september 2014
Y. Verbelen

Inhoudstafel

Voorwoord	i
1 Inleiding	1
1.1 Doel van het vak	1
1.2 Inhoud van de cursus	1
1.3 Vorm	2
1.4 Evaluatie	2
1.5 Praktische afspraken	2
1.6 Materiaal en uitrusting	3
1.6.1 Een multimeter kiezen	3
2 Spanningen en stromen	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Doel van het practicum	5
2.3 Herhaling: de Wet van Ohm	5
2.3.1 Serie- en parallelschakelingen	6
2.4 Weerstand	7
2.5 Spanningsdelers	8
2.6 Meetinstrumenten	9
2.6.1 De voltmeter	9
2.6.2 De amperemeter	9
2.6.3 De ohmmeter	10
2.7 Spanningen in serieschakelingen	10
2.8 Reële meetinstrumenten	11
2.8.1 Inwendige weerstand	11
2.9 Vermogen	12
2.10 De I-U-curve	12
2.11 Toepassing 1: varistors	13
2.12 Toepassing 2: toleranties	14
3 Diodes	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Doel van het practicum	17
3.3 Herhaling: de diode	17
3.3.1 Terminologie	18
3.3.2 Types diodes	18
3.4 Diodekarakteristieken	19
3.4.1 Opzet van het experiment	19
3.4.2 Potentiometers	20
3.4.3 Meetresultaten verzamelen	20
3.5 Diodeschakelingen	21
3.5.1 Clipping	21
3.5.2 Clamping	21
3.6 Toepassing 1: RGB-LED's	22
3.7 Toepassing 2: bruggelijkrichters	22

4	Veldeffecttransistors	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Doel van het practicum	25
4.3	Herhaling: FET's	25
4.3.1	Naamgeving	25
4.3.2	Transistortypes	26
4.3.3	Databladen	26
4.3.4	Terminologie	27
4.4	De MOSFET	28
4.4.1	Schakeleigenschappen	28
4.4.2	Drempelspanning	28
4.4.3	Polarisatie	30
4.4.4	CMOS	30
4.5	De JFET	31
4.5.1	Eigenschappen	31
4.6	Toepassing 1: automatische ventilatie	32
4.7	Toepassing 2: half bridges	33
5	Bipolaire junctietransistors	37
5.1	Inleiding	37
5.2	Doel van het practicum	37
5.3	Herhaling: de bipolaire junctietransistor	38
5.3.1	Terminologie	38
5.3.2	Kenmerkende parameters	38
5.4	Stroomversterkingsfactor	39
5.5	Transistormodi	39
5.5.1	Versterker	40
5.5.2	Schakelaar	40
5.5.2.1	Belastingen	40
5.5.2.2	Vrijlooptiodes	41
5.6	Toepassing: stroombronnen	42
6	Oscillators	45
6.1	Inleiding	45
6.2	Doel van het practicum	45
6.3	Herhaling: de condensator	45
6.3.1	Types condensators	46
6.4	RC-schakelingen	47
6.4.1	De tijdsconstante	47
6.4.2	Timing	48
6.5	Oscillators	49
6.5.1	Astabiele multivibrators	49
6.5.2	Timers	50
6.6	De oscilloscoop	52
6.7	Toepassing: inbraakalarm	53
7	Digitale logica	55
7.1	Inleiding	55
7.2	Doel van het practicum	55
7.3	Logische poorten	55
7.3.1	Digitale voeding	56
7.4	Synchrone schakelingen	57
7.4.1	Kloksignalen	57
7.4.2	Flipflops	58
7.5	Adders	59
7.6	Counters	60
7.7	Toepassing: spoorwegovergang	60

1

Inleiding

“When you want to know how things really work, study them when they’re coming apart.”

William Gibson

1.1 Doel van het vak

In de practicasessies *Basiselektronica* maak je kennis met elektronische meetinstrumenten en basiscomponenten die je misschien al kent uit de 3^e graad van het secundair onderwijs en de lessen *Elektriciteit*. Je gaat aan de slag met multimeters, spanningsdelers, eenvoudige RC-netwerken, diode- en transistorschakelingen en MOSFET-schakelingen. Je leert hoe je zelf elektronische experimenten opzet, leert gangbare elektronische meetapparatuur kennen, en beredeneert hoe je experimenten op een wetenschappelijk integere manier moet uitvoeren om correcte meetresultaten te verzamelen.

Na het WPO Basiselektronica ben je in staat om eenvoudige elektronische problemen te analyseren en op te lossen, hypothesen te verifiëren via experimenten, en prototypes op te bouwen op breadboard en te testen.

1.2 Inhoud van de cursus

Tijdens de WPO's *Basiselektronica* komen de volgende onderwerpen aan bod:

- elektronische meetinstrumenten;
- serie- en parallelschakelingen van weerstanden en spanningsdelers;
- diodekarakteristieken en schakelingen;
- transistorkarakteristieken en MOSFETS;
- condensators en RC-schakelingen;
- oscillators.

In functie van vragen uit de groep en bijzondere interesses, kunnen deze onderwerpen nog verder uitgebreid worden afhankelijk van de beschikbare tijd. Microcontrollers vallen buiten het bestek van deze practica omdat ze uitgebreid aan bod komen in het Wekkerproject binnen het vak *Ingenieursvaardigheden*.

1.3 Vorm

Als je door deze nota's bladert, dan zul je merken dat je de typische structuur van laboproeven die je uit het secundair onderwijs kent, niet zal terugvinden. Het verschil zit in de proefopstellingen voor de experimenten. Die wordt in het secundair onderwijs meestal opgegeven, en het enige wat je dan nog restte is die opstelling na te bouwen en de gevraagde grootheden af te lezen. Vanuit een wetenschappelijk perspectief is dit uiteraard weinig zinvol, want het ontwerpen van een proefopstelling is de interessantste fase in de uitvoering van een experiment! Met een goede proefopstelling en correcte keuze van de meetinstrumenten staat of valt het volledige experiment. Bij het ontwerpen van proefopstellingen zal je dus al je kennis én creativiteit moeten tonen om op een efficiënte manier tot de gewenste meetresultaten te komen.

Om deze reden staan er in deze nota's geen proefopstellingen uitgetekend, maar vind je enkel schakelingen en/of hints die je kunnen helpen bij het ontwerpen van je eigen proefopstellingen.

1.4 Evaluatie

Het is de bedoeling dat de laboproeven individueel worden uitgevoerd om je de kans te geven maximaal ervaring op te doen met de praktische aspecten van elektronica (dit staat uiteraard niet in de weg dat je leert van medestudenten en met hen op een constructieve manier in discussie treedt). Van elke labosessie wordt er een verslag van je verwacht waarin je je bevindingen, redeneringen en observaties uiteenzet. Dien verslagen op papier in aan het begin van de volgende labosessie. De labo-assistent zal elke labosessie het verslag van je vorige practicum individueel met jou bespreken.

Je score voor het WPO zal bepaald worden door de verslagen. Er wordt o.a. rekening gehouden met de methodiek die je toepast, je voorbereiding, naleving van veiligheidsaspecten, creativiteit bij oplossen van problemen, zelfstandigheid, orde en netheid, enzovoort.

Vanwege de eindige tijd die aan elke proef kan gespendeerd worden, is het van essentieel belang elke labosessie grondig voor te bereiden. Dit is een noodzaak om de labo's vlot te laten verlopen, maar ook om de veiligheid tijdens de labosessies te waarborgen zodat materiaal noch je medestudenten beschadigingen oplopen. De labo-assistent kan studenten die de sessie onvoldoende voorbereid hebben de toegang tot het labo ontfangen, wat meteen tot een nul leidt voor die sessie.

Een goede voorbereiding laat toe om in het labo meteen van start te gaan met de opbouw van de experimenten. Ze omvat dus

- een uitgewerkt schema van elke schakeling, inclusief voedingsspanningen;
- de berekening van alle waarden van de componenten (of indien berekening niet mogelijk is, suggesties van grootte-orde);
- een lijst met het benodigde materiaal;
- aanduiding van pinouts waar nodig (welke pin is basis, collector en emitter bij een bipolaire junctietransistor van bepaald type, enz.);
- een stappenplan voor de uitvoering van de experimenten

Een goede voorbereiding is al de helft van het verslag!

1.5 Praktische afspraken

Tijdens de labo's zal je werken met geavanceerde en dus dure apparatuur zoals gestabiliseerde voedingen en RLC-meters. Onoordeelkundig gebruik kan deze toestellen beschadigen, en hoewel het natuurlijk

geenszins de bedoeling is om je enthousiasme voor experimenteren te ontmoedigen, is enige voorzichtigheid wel vereist.

Enkele vuistregels kunnen problemen gemakkelijk voorkomen:

- draai de voedingsspanning nooit hoger dan 20 V;
- controleer dat alle draden goed vast zitten voor je de voeding inschakelt;
- schakel de voeding steeds uit vooraleer je wijzigingen aanbrengt in je schakeling.

En bovenal: gebruik je gezond verstand. Als je het gevoel hebt dat er iets niet klopt, dan is dat misschien ook wel zo. Als je eigenaardige waarden uitkomt bij berekeningen, reken ze dan na om te controleren op fouten. En als je materiaal nodig hebt dat niet in het labo aanwezig is of zeer grote schakelingen moet maken om een probleem op te lossen, dan ben je het waarschijnlijk te ver aan het zoeken.

Iedereen maakt fouten, en het is heel normaal dat (delen van) schakelingen hierdoor af en toe eens opbranden. Blijf steeds aandachtig en schakel de spanning uit als je merkt dat er iets misloopt. Vermoed je dat bepaalde componenten defect zijn, werp deze dan meteen in de vuilnisbak (en leg ze zeker niet terug in de componentenbakjes!).

Deze richtlijnen zijn een uitbreiding op, en geen vervanging van, het algemene laboreglement.

Om de practicasessies zo vlot mogelijk te laten verlopen, is toegang tot informatie essentieel zodat je elementen die ontbreken in je voorbereiding tijdens het practicum nog kan aanvullen. Hiervoor breng je dus best een laptop mee naar het labo. In het volledige labo is er draadloos toegang tot het Internet via Wifi (Eduroam). Reken niet steeds op je medestudenten om voor een laptop te zorgen!

Ondanks de aanwezigheid van wifi is het aanbevolen om voor een hard copy van deze hand-outs te zorgen. Je kan ze zelf afdrukken, maar het is voordeliger om ze aan te kopen als bundel bij de cursusdienst.

Bij onduidelijkheden tijdens de voorbereiding van de laboproeven, kan je overleggen met je medestudenten. Technische materie uitleggen aan anderen, is een zeer efficiënte manier om die materie ook zelf beter te leren begrijpen. Het communicatiekanaal bij uitstek is **Slack**¹. In het *channel basiselektronica* kan je je vragen kwijt. Je dient je hiervoor wel eerst te registreren met je VUB-e-mailadres.

1.6 Materiaal en uitrusting

Hoe meer ervaring je hebt met materiaal en apparatuur, hoe efficiënter je het zal leren gebruiken. Om die reden eisen we dat je je **eigen** materiaal meebrengt voor de uitvoering van de labo's. Het volgende materiaal breng je dus **elke** sessie mee:

- een **multimeter** (bij voorkeur digitaal), zie hieronder, met bijhorende probes;
- twee **breadboards**;
- een bundeltje **breadboardkabels**;
- een laptop met draadloze netwerkkaart (2.4 GHz);

1.6.1 Een multimeter kiezen

Zowat elke multimeter voldoet voor de practica Basiselektronica. De minimale specificaties zijn

- meten van gelijkspanningen (DC) met bereik tot 50 V, met minimaal 5 of 10 mV resolutie op het nauwkeurigste bereik;

¹<https://indi-courses.slack.com/>

- meten van gelijkstromen (DC) met bereik tot 200 mA met minimaal 10 μA resolutie op het nauwkeurigste bereik.

We adviseren een handheld (draagbare) digitale multimeter die met een 9 V blokbatterij werkt. Functies voor AC (wisselspanning- en stroom) zijn nutteloos voor elektronica vermits ze alleen voor zuiver sinusoidale signalen van $50\text{ Hz} \pm 0.5\text{ Hz}$ betrouwbaar werken. Deze condities komen in elektronica zelden voor.

Als je geen multimeter hebt liggen die gelijkspanning- en stroom kan meten met bovenstaande specificaties, dan moet je je er één aanschaffen. Multimeters zijn verkrijgbaar in uiteenlopende prijs categorieën, en de prijs is grotendeels afhankelijk van de nauwkeurigheid en de functies die ondersteund worden. Geavanceerde functies zoals transistor- of condensatormetingen zul je echter zelden of nooit gebruiken. Betaalbare multimeters vind je in doe-het-zelf zaken (Gamma, Brico, Obi, Toom, Baywa, ...), online (Ebay, AliExpress, ...) en sporadisch in speciale actie bij harddiscounters (Lidl, Aldi, ...).

Een multimeter met volgende specificaties zal je kunnen gebruiken voor alle elektriciteitgerelateerde opleidingsonderdelen, inclusief Basiselektronica. Het is dan ook een goede investering, die je nog jarenlang nuttig zal kunnen gebruiken.

- **gelijkspanning:** max. bereik van $600\text{ V} \pm 1\text{ V}$, min. bereik $200\text{ mV} \pm 0.5\text{ mV}$.
- **gelijkstroom:** max. bereik van $200\text{ mA} \pm 0.1\text{ mA}$, min. bereik $200\text{ }\mu\text{A} \pm 1\text{ }\mu\text{A}$.
- **gelijkstroom:** bereik 10 A (niet nodig voor Basiselektronica, wel voor vermogenselektronica en robotica).
- **weerstand:** max. bereik van $2\text{ M}\Omega$, min. bereik $200\text{ }\Omega \pm 1\text{ }\Omega$.
- **diode:** doormeten van diodes tot $700\text{ mV} \pm 1\text{ V}$.

Multimeters met deze specificaties vind je online vanaf 10 USD of in de winkel vanaf 15 EUR. Meer dan 50 EUR hoeft een multimeter niet te kosten.

Belangrijker dan de nauwkeurigheid zelf is dat je de nauwkeurigheid op de metingen in elk bereik kent, want deze informatie heb je nodig om de foutberekeningen bij sommige experimenten uit te voeren.

2

Spanningen en stromen

“It doesn’t matter who we are, what matters is our plan.”

Bane

2.1 Inleiding

De menselijke zintuigen zijn hopeloos ontoereikend om alle fysische verschijnselen in ons universum te kunnen waarnemen. Voor veel verschijnselen zijn onze zintuigen quasi ongevoelig – denk maar aan infrarood licht, ioniserende straling, magnetische velden enzovoort – terwijl de perceptie voor anderen afwijkt van de realiteit. Dit is onder meer het geval voor elektrische verschijnselen, waarvoor we van nature quasi ongevoelig zijn. Tot het punt waarop onze haren letterlijk overeind gaan staan.

Onbedoeld contact met sommige elektrische verschijnselen kan ook nare neveneffecten tot gevolg hebben, waaronder pijnlijke schokken of, in extreme gevallen, een sterk dalende levensverwachting. Als ingenieur is het dus van levensbelang dat je elektrische verschijnselen kan detecteren en de intensiteit ervan kan kwantificeren. Met andere woorden, je wil elektrische grootheden kunnen *meten*. De meetinstrumenten hiervoor zijn als het ware extra zintuigen voor een elektronisch ingenieur!

2.2 Doel van het practicum

In dit practicum en de volgende maak je kennis met de voornaamste elektrische grootheden – spanning en stroom – en ook de bijhorende meetinstrumenten waarmee je ze kan waarnemen. Je leert hoe je prototypes van elektronische schakelingen kan bouwen op een breadboard en hoe je het gedrag van deze prototypes kan bepalen met behulp van een labovoeding en een multimeter. Tot slot wordt je geconfronteerd met het niet-ideale karakter van de labapparatuur door zelf de inwendige weerstanden ervan te bepalen.

Voor dit practicum heb je een **eigen multimeter** nodig. Beschik je nog niet over dergelijk toestel, dan vind je in het vorige hoofdstuk de nodige info om een exemplaar aan te schaffen.

2.3 Herhaling: de Wet van Ohm

Je hebt wellicht reeds van de Wet van Ohm gehoord. Deze wet geeft het verband tussen de 3 belangrijkste elektrische grootheden, namelijk *spanning* (eng. *voltage*, U), *stroom* (eng. *current*, I) en *weerstand*

(eng. *resistance*, R). De weerstand van een elektrische of elektronische component wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de spanning erover en de stroom erdoor:

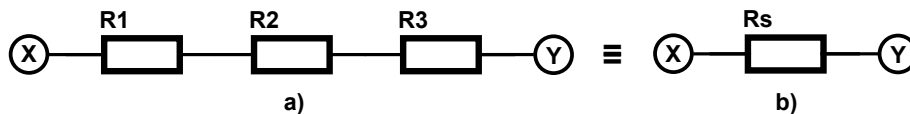
$$R = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

Zoals je weet uit de fysica kan je dit verband ook uitschrijven in functie van de spanning $U = R \cdot I$ of de stroom $I = \frac{U}{R}$. De Wet van Ohm is quasi universeel toepasbaar, en is daarmee met voorsprong de belangrijkste wet in de elektronica!

Uit de Wet van Ohm kan je afleiden dat over een weerstand van 1Ω waardoor een stroom van 1 A vloeit, een spanning van precies 1 V zal staan. Zoals je merkt is dit verband ook lineair: verhoogt de weerstand tot 2Ω dan verdubbelt ook de spanning over de weerstand tot 2 V (bij gelijkblijvende stroom, uiteraard). De Wet van Ohm geldt altijd, ongeacht hoe groot de spanning, stroom of weerstandswaarde wordt. Als je dus 2 van de 3 grootheden kent, dan kan je de derde berekenen. Dit concept is zeer simpel, en nochtans ligt het aan de basis van de analyse van zowat alle elektronische schakelingen ongeacht hun complexiteit.

2.3.1 Serie- en parallelschakelingen

Je kan een elektrische spanning beschouwen als de *aanleiding* die ervoor zorgt dat er stroom gaat lopen. Deze stroom wordt gehinderd door de obstakels op zijn pad, het equivalent van elektrische weerstand. Zonder een spanning of potentiaalverschil zal er geen stroom lopen. Wordt er wel een spanning aangelegd, dan wordt de stroom begrensd door de weerstand waarover die spanning staat.



Figuur 2.1: Equivalent van een serieschakeling van weerstanden.

Bekijk de schakeling in figuur 2.1. Als tussen de punten X en Y een spanning U wordt aangelegd, dan wordt de stroom begrensd door de totale weerstand tussen die 2 punten. Via de Wet van Ohm kunnen we nu de equivalente weerstand van een serieschakeling van R_1 , R_2 en R_3 bepalen door zowel voor schakeling a) als voor b) de vergelijking uit te schrijven. Een equivalente weerstand impliceert een identieke stroom I die zowel door a) als door b) loopt als er een identieke spanning U over staat. Uit de Wet van Ohm volgt dan

$$U = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I = R_s \cdot I \quad (2.2)$$

Delen door I levert

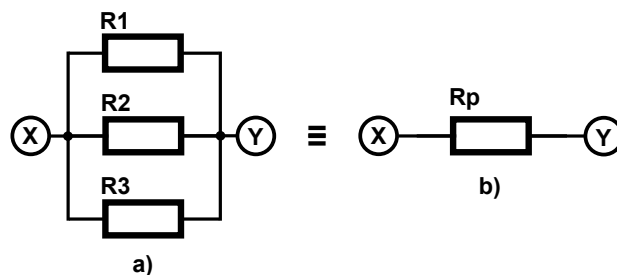
$$\frac{U}{I} = R_1 + R_2 + R_3 = R_s \quad (2.3)$$

Met andere woorden, de equivalente weerstand van een serieschakeling van weerstanden is gelijk aan de som van alle weerstanden. Je kan zelf de afleiding herhalen voor n weerstanden in serie.

Voor parallelschakelingen, zoals weergegeven in figuur 2.2 geldt dezelfde redenering: als a) en b) equivalent zijn, dan moet bij eenzelfde spanning U over de parallelschakeling de totale stroom door zowel a) als b) identiek zijn. Uit de Wet van Ohm volgt dan dat

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = \frac{U}{R_p} \quad (2.4)$$

Dit komt omdat de weerstanden in een parallelschakeling elkaar onderling niet beïnvloeden: de stroom in elke tak hangt enkel af van de spanning erover, niet van de stromen in de andere takken. Delen door



Figuur 2.2: Equivalent van een parallelschakeling van weerstanden.

U levert

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_p} \quad (2.5)$$

De equivalente parallelweerstand is dan $R_p = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1}$. Herhaal zelf de afleiding voor n in parallel geschakelde weerstanden, en noteer deze afleiding in je verslag.

Het is van groot belang voor de toekomstige labo's elektriciteit en elektronica dat je de verbanden hierboven goed begrijpt. Oefen op serie- en parallelschakelingen tot je de Wet van Ohm vlot kan toepassen. Veel complexe componenten en/of schakelingen die je later nog zal bekijken, kunnen immers herleid worden tot serie- en parallelschakelingen van weerstanden.

2.4 Weerstanden

Omdat het wenselijk is om het energieverbruik van elektronica zo laag mogelijk te houden, wordt met zo hoog mogelijke weerstandswaarden gewerkt om de stromen te minimaliseren – voor zover de toepassing dit toelaat, uiteraard. Naar elektronische normen zijn weerstanden onder $100\ \Omega$ *klein*, en boven $100\ \text{k}\Omega$ *groot*.

Er is geen verband tussen de fysieke afmetingen van een elektronische weerstand en zijn weerstandswaarde (= resistiviteit). Weerstanden met een lage weerstandswaarde worden vervaardigd van goed geleidende materialen zoals metaallegeringen, terwijl weerstanden met een hoge weerstandswaarde opgebouwd zijn uit materialen met een minder goede geleidbaarheid zoals keramische materialen. Langs de buitenkant zien ze er echter hetzelfde uit.

Omdat er geen verband is tussen de weerstandswaarde en de fysieke afmetingen van een elektronische weerstand, werd er geopteerd voor een *kleurencode* om visueel aan te geven wat de weerstandswaarde is. Door de kleurencode af te lezen kan je gemakkelijk de weerstandswaarde van een weerstand achterhalen zonder hem te hoeven nameten, wat nogal lastig is als de weerstand bijvoorbeeld op een printplaat gesoldeerd zit. De kleurencode volgt de kleuren van de regenboog, en elke kleur krijgt een bepaalde numerieke waarde toegekend. De weerstandswaarde wordt gecodeerd in 4 gekleurde ringen. De eerste 2 ringen vormen cijfers, de derde een vermenigvuldigingsfactor, en de laatste de tolerantie (= willekeurige fout) op de aangegeven weerstandswaarde. In figuur 2.3 vind je de volledige kleurencode voor weerstanden met 4 kleurenbanden.

Voorbeeld 1: de kleurencode van een weerstand is bruin, rood, geel, goud. De eerste 2 kleuren stellen getallen voor, in dit geval 1 voor bruin en 2 voor rood. De derde kleur is de vermenigvuldigingsfactor, in dit geval geel, wat overeen komt met een factor 10^4 . De weerstandswaarde is dus $12 \cdot 10^4 = 120\ 000\ \Omega = 120\ \text{k}\Omega$. De laatste ring, goud, geeft aan dat de tolerantie op deze weerstand $\pm 5\ %$ is. De effectieve weerstand is dus $120\ \text{k}\Omega \pm 5\ %$.

Ringkleur	1e cijfer	2e cijfer	factor	tolerantie
Zwart	0	0	$\times 10^0$	
Bruin	1	1	$\times 10^1$	1%
Rood	2	2	$\times 10^2$	2%
Oranje	3	3	$\times 10^3$	
Geel	4	4	$\times 10^4$	
Groen	5	5	$\times 10^5$	0.5%
Blauw	6	6	$\times 10^6$	0.25%
Violet	7	7	$\times 10^7$	0.10%
Grijs	8	8	$\times 10^8$	0.05%
Wit	9	9	$\times 10^9$	
Goud			$\times 10^{-1}$	5%
Zilver			$\times 10^{-2}$	10%

Figuur 2.3: Kleurencodering van weerstanden met 4 kleurenbanden.

Voorbeeld 2: de kleurencode van een weerstand is geel, paars, bruin, goud. De eerste 2 kleuren vormen de getallen 4 en 7, de derde kleur geeft een vermenigvuldigingsfactor van 10^1 . De weerstandswaarde is dus $47 \cdot 10^1 = 470 \Omega$ met een tolerantie van $\pm 5\%$.

Voorbeeld 3: de kleurencode van een weerstand is oranje, wit, goud, goud. De eerste 2 kleuren vormen de getallen 3 en 9, de derde kleur geeft een vermenigvuldigingsfactor van 10^{-1} . De weerstandswaarde is dus $39 \cdot 10^{-1} = 3.9 \Omega$ met een tolerantie van $\pm 5\%$.

Voorbeeld 4: de kleurencode van een weerstand is bruin, zwart, blauw, goud. De eerste 2 kleuren vormen de getallen 1 en 0, de derde kleur geeft een vermenigvuldigingsfactor van 10^6 . De weerstandswaarde is dus $10 \cdot 10^6 = 10\,000\,000 \Omega = 10 \text{ M}\Omega \pm 5\%$.

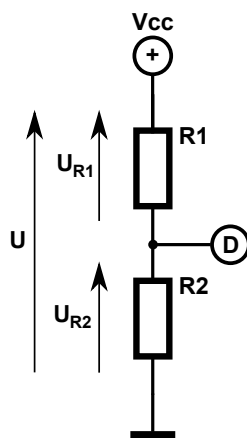
Praktisch hebben veruit de meeste weerstanden een tolerantie van $\pm 5\%$, en je kan de oriëntatie van de kleurbanden dus herkennen aan de gouden kleur van de tolerantieband. Lees de weerstand dus af door de weerstand zodanig te bekijken dat de gouden band uiterst rechts zit. Sporadisch kom je ook weerstanden tegen met 5 of meer kleurenbanden. Dit zijn precisieweerstanden (met een tolerantie kleiner dan $\pm 5\%$), en dus meer dan 2 beduidende cijfers (3 of meer banden die cijfers voorstellen, aangevuld met een band voor de vermenigvuldigingsfactor en een band voor de tolerantie).

Omdat je tijdens je studies honderden keren weerstanden zal moeten identificeren, is de kleurencode één van de weinige zaken die je als ingenieur echt moet memoriseren. **Er wordt van je verwacht dat je de kleurencode van buiten kent, en er zodanig op oefent dat je de standaardweerstanden met 4 kleurenbanden vlot kan identificeren.**

2.5 Spanningsdelers

Veronderstel een serieschakeling van 2 weerstanden R_1 en R_2 waarover een totale spanning U staat, zoals weergegeven in figuur 2.4. Laat ons de respectievelijke spanningen over de weerstanden dan U_{R1} en U_{R2} noemen. Uit de vorige paragraaf weet je dat de Wet van Ohm steeds van toepassing is, dus voor de serieschakeling geldt dat $I = \frac{U}{R_s}$ en dus ook dat $I = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_{R2}}{R_2}$. De stroom door alle weerstanden in serie is immers gelijk. Je merkt dat de spanning over elke weerstand, zoals verwacht, evenredig is met de waarden van deze weerstanden.

We kunnen nu een formule afleiden om de spanning over één van de weerstanden te berekenen als de totale spanning én de beiden weerstandswaarden gekend zijn. Zoals steeds in elektronica beginnen



Figuur 2.4: Spanningsdeler tussen 2 weerstanden R1 en R2. De spanning over de serieschakeling is U.

we met het definiëren van een *referentiepotentiala*, die per definitie 0 is. Elke spanning in de schakeling wordt dan ten opzicht van dit referentiepotentiala gerekend. Met een spanning op een bepaald punt wordt dan bedoeld, de spanning tussen dat punt en dit referentiepotentiala. Door de stroom I door de parallelschakeling uit te schrijven met behulp van de Wet van Ohm bekomen we

$$\frac{U_{R2}}{R2} = \frac{U}{R1 + R2} \quad (2.6)$$

Vermenigvuldigen met R2 levert dan een uitdrukking voor U_{R2} :

$$U_{R2} = U \frac{R2}{R1 + R2} \quad (2.7)$$

Doe nu zelf de afleiding voor een serieschakeling van 3 weerstanden. Teken een duidelijk schema in je verslag met vermelding van referentiepotentiala en alle spanningen en weerstandswaarden. Hoewel het niet meer is dan een afleiding van de Wet van Ohm is de spanningsdelerformule de moeite waard om te onthouden omdat deze zeer frequent van pas komt in de analyse van elektronische schakelingen.

2.6 Meetinstrumenten

In elektronica maken we onderscheid tussen meetinstrumenten voor gelijkspanningen -en stromen (DC, *eng. direct current*) en meetinstrumenten voor wisselspanningen -en stromen (AC, *eng. alternating current*). In dit labo worden enkel instrumenten voor DC behandeld.

2.6.1 De voltmeter

Met een voltmeter kan je spanningen meten. Hiertoe draai je de knop van een multimeter in het VDC-bereik. Je meet tussen de terminals COM (*eng. common*) en VΩHz. De interne weerstand tussen de beide terminals is nu erg hoog (in theorie oneindig) waardoor het meten van de spanning over een elektronische component de werking van de schakeling maar weinig beïnvloedt. Een spanning meet je door de probes te plaatsen op de 2 punten waartussen je de spanning wenst te kennen. Met een voltmeter meet je dus **in parallel** om de spanning **over** een onderdeel te meten. In elektronica zal je vaak de COM terminal/probe verbinden met de referentiepotentiala omdat per definitie elke spanning ten opzichte van deze referentie wordt gerekend.

2.6.2 De amperemeter

Met een amperemeter kan je stromen meten. Hiervoor dien je de amperemeter, in tegenstelling tot de voltmeter, dus **in serie** te schakelen met de tak **waardoor** je de stroom wilt meten. Draai de knop van de multimeter in het mA DC-bereik of μA DC-bereik en meet tussen de terminals COM en mA. De interne weerstand tussen beide terminals is erg laag (ideaal nul) waardoor de meting de stroom door

de tak niet hindert.

Doordat de interne weerstand in amperemeter-modus erg klein is, kunnen de stromen dus erg groot worden als de overige weerstanden in de keten ook klein zijn. Om schade aan de meter te voorkomen is deze intern met een zekering uitgerust die doorbrandt als de stroom een bepaalde limiet – meestal tussen 250 mA en 350 mA – overschrijdt. Krijg je dus geen meetresultaten, check dan deze zekering.

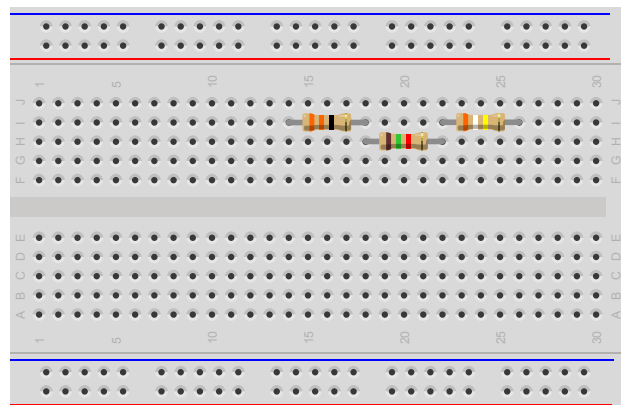
Sommige multimeters zijn ook uitgerust met een ADC-bereik en een bijhorende A terminal die typisch stromen tot 10 A kan meten, weliswaar met een kleinere resolutie. Deze modus wordt voor elektronica zelden gebruikt, maar komt occasioneel wel van pas als je bv. het stroomverbruik van je tablet of laptop zou willen meten. In schakelingen waarin je de stroom niet kan schatten, en bijgevolg dus hoger kan zijn dan 350 mA, kan je deze stand ook gebruiken om een ruwe meting te doen, en zo te verhinderen dat je de 350 mA zekering meteen doorbrandt.

2.6.3 De ohmmeter

Met een ohmmeter ten slotte kan je weerstanden meten. Hiertoe stuurt de multimeter een gekende stroom door een onbekende weerstand en meet vervolgens de spanning om daaruit de onbekende weerstandswaarde te kunnen berekenen. Om weerstanden te kunnen meten draai je de knop van de multimeter in het Ω -bereik en sluit je de onbekende weerstand aan tussen de terminals COM en $V\Omega Hz$ net zoals je spanningen zou meten. Let op: als er andere spanningen en stromen aanwezig zijn in de schakeling dan zal de meting foutief zijn doordat de referentiestroom door de weerstand wordt beïnvloed.

2.7 Spanningen in serieschakelingen

Experiment: Kies 3 weerstanden tussen $10\ \Omega$ en $1\ M\Omega$ die minstens een grootte-orde (= een factor 10) van elkaar verschillen. Bouw een serieschakeling van deze weerstanden op een breadboard en voedt deze met een spanning tussen 5 V en 12 V. De precieze spanning is in deze experimenten niet belangrijk. Meet de spanning over de serieschakeling. Hoeveel wijkt dit af t.o.v. de display van de voeding?



Figuur 2.5: Serieschakeling van 3 weerstanden ($33\ \Omega$, $1.5\ k\Omega$ en $390\ k\Omega$) op een breadboard. Aangepaste illustratie via Fritzing.org onder Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported licentie.

In figuur 2.5 wordt een voorbeeld van zo'n serieschakeling op een breadboard weergegeven. De meeste breadboards bestaan uit 2 keer 2 voedingsrails aangeduid met een blauwe en rode streep, die zich over de hele breedte van het breadboard uitstrekken. Daartussen zit een verbindingsmatrix opgedeeld in rijen en kolommen, in het voorbeeldbreadboard uit figuur 2.5 zijn de kolommen genummerd van 1 tot 30 en de rijen van A tot J. De elektrische contacten van de kolommen 1 tot 30 zijn onderling doorverbonden tot het midden van het breadboard. Door de pennen van 2 componenten in dezelfde kolom te pluggen, kan je ze dus met elkaar verbinden. In het voorbeeld dienen kolommen 18 en 22 dus als knooppunten die telkens 2 weerstanden in serie schakelen. De onderste helft van het breadboard

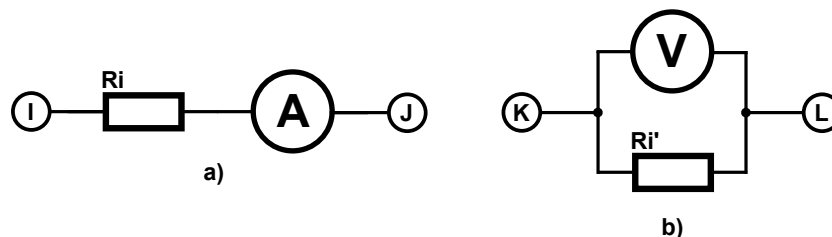
wordt niet gebruikt in dit voorbeeld.

Experiment: Schets de schakeling in je verslag en meet met een voltmeter de spanning over de serieschakeling en de spanningen over elke individuele weerstand. Noteer alle spanningen op de schets en duidt zowel de zin van de spanningen als de stroomzin aan. Maak de som van alle spanningen en vergelijk met de gemeten spanning over de serieschakeling. Wat merk je?

Experiment: Meet met een amperemeter de stroom door de serieschakeling en duidt deze eveneens aan in je schets. Pas de Wet van Ohm toe om de waarden van de 3 weerstanden te berekenen en meet deze vervolgens na met een ohmmeter. Komt dit overeen? Waarom wel of waarom niet?

2.8 Reële meetinstrumenten

Een ideale voltmeter bezit een oneindig hoge weerstand en een ideale amperemeter een weerstand die nul is. In reële instrumenten worden spanningen en stromen gemeten door, hoe kan het ook anders, gebruik te maken van de Wet van Ohm. In een amperemeter wordt de gemeten stroom via een weerstand omgezet in een spanning, in een voltmeter wordt gebruik gemaakt van een spanningsdeler met 2 of meerdere weerstanden om de gemeten spanning te herschalen naar een meetbaar bereik. Deze weerstanden hebben eindige waarden, en de inwendige weerstand van de corresponderende meetinstrumenten is dus ook niet nul of oneindig (zie figuur 2.6). In de volgende experimenten zal je trachten om de inwendige weerstand van de multimeter in voltmeter en amperemetermodus te bepalen.



Figuur 2.6: Equivalente schema's van een reële amperemeter (a) en voltmeter (b).

2.8.1 Inwendige weerstand

Een voltmeter kan worden voorgesteld als een ideale voltmeter in parallel met een shuntweerstand R_i' (zie figuur 2.6b). Het equivalent van een reële amperemeter is dan een ideale amperemeter in serie met een shuntweerstand R_i (zie figuur 2.6a). Idealiter is de shuntweerstand van de voltmeter zeer groot en die van de amperemeter zeer klein, maar hoe groot of klein dan precies?

Experiment: Pas de serieschakeling op je breadboard nu zodanig aan dat je er de inwendige weerstand van de amperemeter mee kan meten. Tip: hoewel de inwendige weerstand een onbekende is, geldt ook hier de Wet van Ohm. Je kan de weerstanden in de serieschakeling wisselen om de totale weerstand in de schakeling te wijzigen. Let erop in je verslag alle spanningen, stromen en weerstanden te vermelden, en je redenering duidelijk uiteen te zetten!

Experiment: Verdraai de resolutie van de amperemeter door het bereik te verhogen of verlagen (van mA naar μ A of omgekeerd). Herhaal de metingen. Wat stel je vast?

Experiment: Maak gebruik van een voltmeter om de spanning over de amperemeter te meten terwijl deze in de serieschakeling is opgenomen. Lig de gemeten waarde in de lijn van je verwachtingen? Waarom wel/waarom niet?

Experiment: Pas de schakeling zodanig aan dat je ook de inwendige weerstand van de voltmeter kan bepalen en herhaal het experiment. Schets opnieuw je schakeling in je verslag en vermeld alle berekeningen en gemeten waarden.

2.9 Vermogen

Naast spanning, stroom en weerstand is ook het *vermogen* (eng. *power*) een belangrijke grootte in de elektronica. Het symbool voor vermogen is P , de eenheid is de Watt, symbool W. Het vermogen van een elektronische schakeling geeft aan hoe snel elektrische energie in arbeid wordt omgezet. Hoe groter het vermogen, hoe sneller energie in arbeid wordt omgezet. Het verband tussen vermogen P en arbeid W wordt dus gegeven door de tijd t :

$$P = \frac{W}{t}$$

Voorbeeld: Een LED-lampje voor de verlichting van je bureau heeft een vermogen van ca. 10 W. Een straatlamp daarentegen heeft een vermogen van 150 W, waardoor er veel sneller elektrische energie in licht kan omgezet worden, en de straatlamp dus veel meer licht geeft dan je bureaulampje. Uiteraard in de veronderstelling dat beiden een vergelijkbaar rendement (eng. *efficiency*) hebben.

Het elektrisch vermogen van een component wordt gedefinieerd als het product van de spanning erover en de stroom erdoor:

$$P = U \cdot I$$

Door U te substitueren via de Wet van Ohm verkrijgt men $P = R \cdot I^2$. In elke component met een eindige elektrische weerstand, waardoor een bepaalde stroom loopt, zal dus elektrisch vermogen worden ontwikkeld. In het geval van een weerstand wordt de elektrische energie omgezet in warmte. Soms is dit nuttig (bv. in het geval van een koffiezetapparaat, waar de ontwikkelde warmte wordt gebruikt om water te laten koken) maar in veruit de meeste gevallen gaat deze energie verloren. Denk bv. aan de warme lucht die onderaan je laptop wordt weggeblazen door een ventilator.

Experiment: Bouw op een breadboard een parallelschakeling van 3 weerstanden van resp. $8.2\ \Omega$, $390\ \Omega$ en $27\ \text{k}\Omega$. Let erop dat de weerstanden elkaar niet raken. Voed deze parallelschakeling vervolgens met een spanning van 9 V en observeer de weerstanden. Wat merk je? Bereken het elektrisch vermogen dat in elk van de 3 weerstanden ontwikkeld wordt, met bijhorende fout.

Wat concludeer je? De courante weerstanden in het labo zijn bedoeld voor een vermogen van 250 mW ongeacht hun weerstandswaarde. Je merkt dat je deze waarde met kleine weerstandswaarden relatief gemakkelijk kan overschrijden!

2.10 De I-U-curve

Een I-U-grafiek (waar 'I' staat voor stroom en 'U' voor spanning) is een efficiënte en overzichtelijke manier om het gedrag van elektronische componenten of schakelingen voor te stellen. De grootte op de x-as is de spanning (U), die op de y-as de stroom (I). Door voor verschillende spanningen over de component de bijhorende stromen op te meten en deze koppels uit te zetten in de grafiek, wordt het gedrag van de component zichtbaar. Alle koppels samen vormen dan de I-U-curve.

Uit de Wet van Ohm kan je afleiden dat er een lineair verband bestaat tussen de spanning over een weerstand en de stroom erdoor, dit verband is de weerstandswaarde zelf. Tracht nu zelf dit lineaire verband experimenteel aan te tonen.

Experiment: Bouw een proefopstelling die je toelaat om de spanning over een weerstand te laten variëren in een bereik tussen ca. -10 V en 10 V, en tegelijk ook de bijhorende stromen op te meten. Hou bij het ontwerp van je proefopstelling rekening met de volgende randvoorwaarden:

- de multimeters kunnen maximaal een stroom van ca. 250 mA - 500 mA meten in het mA-bereik, afhankelijk van het type;
- het maximale vermogen dat je in een weerstand mag dissiperen is 250 mW.

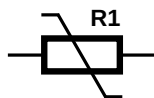
Controleer op voorhand dat bij de gekozen weerstandswaarde in het bereik van -10 V tot 10 V geen van beide randvoorwaarden overschreden worden. Noteer in je verslag de minimale en maximale stroom die je verwacht te meten, en het minimale en maximale vermogen dat in de weerstand zal gedissipeerd worden.

Om een vloeiende curve te kunnen tekenen, moeten de koppels in de grafiek natuurlijk voldoende dicht bij elkaar liggen. Zorg dat je minstens een 16-tal metingen doet, en dus ten minste 16 koppels kan uitzetten in de grafiek. Om dit op een ordelijke manier te doen, maak je best gebruik van computerprogramma's zoals LibreOffice Calc (zie cursus *Ingenieursvaardigheden* voor de nodige aanwijzingen).

Voeg een lineaire trendlijn toe aan je grafiek en bepaal de vergelijking van deze rechte. Door wat wordt de richtingscoëfficiënt (rico) van deze rechte bepaald? Kan je uit de vergelijking de weerstandswaarde afleiden? Komt die overeen met de werkelijke waarde van de weerstand die je hebt gemeten? Maak gebruik van de RLC-meter in het labo om de waarde van de weerstand precies te bepalen.

2.11 Toepassing 1: varistors

De weerstanden waarmee je tot nu toe gewerkt hebt, vertonen een lineair verband tussen spanning en stroom, zoals je in het vorige experiment zelf hebt kunnen ontdekken. Er bestaan echter ook weerstanden waarbij het verband tussen spanning en stroom niet meer lineair is, en de I-U-curve van deze componenten zal dus ook geen rechte meer zijn. Een voorbeeld van een niet-lineaire weerstand is een *varistor*, ook wel *spanningsafhankelijke weerstand* genoemd. Zoals de naam doet vermoeden, verandert de weerstandswaarde van varistors met de spanning die erover aangelegd wordt. Het schemasymbool van varistors lijkt erg op dat van ohmse weerstanden, zoals weergegeven in figuur 2.7.



Figuur 2.7: Schemasymbool van een varistor.

Experiment: Zoek in de componentenbakjes een varistor van type V8ZA2P. Vermits het gedrag van varistors niet meer eenvoudig kan beschreven worden met een weerstandswaarde (impedantie, in Ω) en maximaal vermogen (in W) zoals bij “gewone” weerstanden, worden ze aangeduid met typenummers die door de fabrikant gespecificeerd worden. Het is weinig zinvol om zulke typenummers van buiten te leren.

- Ontwerp een schakeling om de I-U-curve van de varistor uit te meten. Zorg dat je de spanning kan variëren tussen -10 V en 10 V zoals in het vorige experiment.
- Verzamel ten minste 32 metingen die min of meer homogeen verdeeld zijn over het spanningsbereik van -10 V tot 10 V, en plot ze in een I-U grafiek. Wat merk je?
- Bereken in je spreadsheet op basis van de I-U koppels de weerstand in een derde kolom met behulp van de Wet van Ohm, en voeg een tweede plot toe aan de grafiek die het U-R verband (weerstand in functie van spanning) weergeeft. Aligneer de I-U plot met de primaire (linkse) Y-as en voeg een secundaire (rechtse) Y-as toe waarop je het bereik van de weerstand uitzet. Maak voor de Y-assen indien nodig gebruik van een logaritmische schaal.

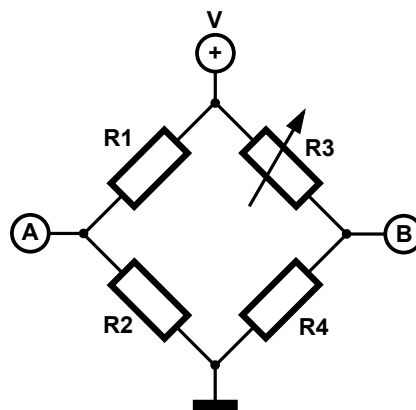
Bekijk de varistorcurves die je hebt uitgemeten, en tracht het gedrag van deze component in je eigen woorden te beschrijven. Welke toepassingen zou je kunnen bedenken voor componenten met deze eigenschappen? Hoe is deze component aan zijn schemasymbool geraakt?

2.12 Toepassing 2: toleranties

Je merkt dat de berekende spanningen, stromen en weerstandswaarden nooit exact overeen komen met de gemeten waarden. Hiervoor zijn een aantal verklaringen: de fout op de meters zelf, bv. ten gevolge van slechte kalibratie (een systematische fout), ruis in de schakeling ten gevolge van interferentie (een toevallige fout) en uiteraard een eindige nauwkeurigheid van de spanningsbron en weerstanden zelf.

De weerstanden in de componentenbakjes hebben, net zoals alle elektronische componenten, een eindige precisie. Dat betekent dat de aangegeven waarde systematisch afwijkt van de reële waarde. De effectieve weerstand kan dus hoger of lager zijn dan de aangegeven waarde. Je weet intussen dat de vierde (laatste) ring op weerstanden de tolerantie aangeeft, en de weerstanden in het labo elektronica met een gouden ring hebben dus een tolerantie van 5 %. Die 5 % is de relatieve fout op de aangegeven waarde, en een maat voor de precisie waarmee de weerstandswaarde wordt afgemeten bij productie. Met de gouden ring garandeert de fabrikant van de weerstanden dat voor een weerstand van 18 kΩ met een gouden ring (= tolerantie 5 %) de werkelijke waarde steeds tussen 17.1 kΩ en 18.9 kΩ ligt. Maar hoe groot is de werkelijke precisie?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden moet de effectieve weerstandswaarde (impedantie) van een steekproef willekeurige weerstanden zo nauwkeurig mogelijk gemeten worden, zodat de afwijking ten opzichte van de opgegeven referentiewaarde kan berekend worden. Deze afwijking kan dus zowel positief (effectieve weerstandswaarde boven de referentiewaarde) als negatief (effectieve weerstandswaarde onder de referentiewaarde) zijn. Het probleem wordt dus schijnbaar gereduceerd tot het nauwkeurig opmeten van weerstanden, maar dat is in de praktijk niet zo evident met low-cost multimeters. Deze toestellen kunnen weliswaar weerstanden opmeten, maar de fout op de metingen is meestal van dezelfde grootte-orde als de tolerantie op de weerstanden zelf. Multimeters kunnen dus niet rechtstreeks gebruikt worden om weerstanden met voldoende precisie voor dit experiment uit te meten. Je zou elke weerstand individueel kunnen uitmeten met de nauwkeurige RLC-meter, maar dat wordt dan weer een omslachtige aangelegenheid.



Figuur 2.8: Principeschema van een Wheatstonebrug.

Een oplossing voor dit probleem is variaties in weerstandswaarde om te zetten naar variaties in spanning, die wel met voldoende precisie kunnen gemeten worden met een multimeter. De schakeling die hiervoor gebruikt wordt heet een *Wheatstonebrug* (eng. *Wheatstone bridge*) en bestaat uit 4 weerstanden waarvan één weerstand onbekend is. De weerstanden zijn zodanig geschakeld dat ze 2 spanningsdelers vormen, zoals weergegeven in figuur 2.8. Met de formule om spanningsdelers te berekenen – niet meer dan een variatie op de Wet van Ohm – wordt de spanning tussen de 2 spanningsdelers (punten U_A en U_B) gegeven door

$$U = U_A - U_B = V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = V \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (2.8)$$

Hieruit volgt dat, als de spanning over de brug U (= tussen de spanningsdelers) is gekend, de voe-

dingsspanning V is gekend, en de 3 constante weerstanden zijn nauwkeurig bepaald, dan blijft enkel R_3 over als onbekende die dus berekend kan worden. Werk bovenstaande vergelijking uit naar de onbekende weerstand R_3 .

Experiment: Kies een weerstandswaarde tussen $1\text{ k}\Omega$ en $47\text{ k}\Omega$. Neem een steekproef van een twintigtal weerstanden uit het gekozen bakje. Bouw een Wheatstonebrug zoals in figuur 2.8 is voorgesteld op basis van 3 nauwkeurig afgemeten weerstanden, waarvan je de waarde bijvoorbeeld hebt gemeten met de RLC-meter. Als vierde weerstand neem je telkens één van de twintig weerstanden uit je steekproef, en meet je de bijhorende spanning over de brug. Regel de voedingsspanning V zodanig af dat het bereik van je multimeter optimaal benut wordt. Noteer voor de 20 weerstanden de bijhorende gemeten spanningen, en bereken daaruit de effectieve waarde van de onbekende weerstanden. Uiteraard hou je hierbij rekening met beduidende cijfers.

Bereken voor deze steekproef vervolgens de gemiddelde effectieve waarde en de bijhorende spreiding (standaardafwijking op de steekproef). Zet de 20 meetpunten uit in een grafiek met effectieve weerstandswaarde op de Y-as, en voeg 2 horizontale lijnen toe die de tolerantie aangeven (één voor $R + 5\%$ en één voor $R - 5\%$). Welke conclusies kan je op basis van de grafiek, het gemiddelde en de standaardafwijking trekken over de precisie van weerstanden in de bakjes? Hoeveel weerstanden in je sample van 20 exemplaren overschrijden de tolerantie van 5% ? Is de tolerantie van 5% een onderschatting of overschatting van de reële precisie?

3

Diodes

“I have no special talents. I am only passionately curious.”

Albert Einstein

3.1 Inleiding

In het vorige labo maakte je kennis met enkele meettoestellen en een eerste component, namelijk de elektrische weerstand. Je kon aan de hand van eenvoudige experimenten achterhalen dat het verband tussen spanning, stroom en weerstandswaarde steeds een eenvoudig verband volgt: de Wet van Ohm. Dit verband maakt het gemakkelijk om eenvoudige weerstandennetwerkjes zoals serie- en parallelschakelingen uit te rekenen, maar verder kan je met enkel weerstanden niet veel nuttige creaties bouwen.

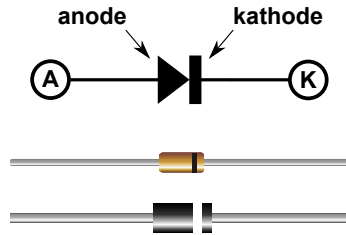
Eén van de verschillen tussen elektrische en elektronische schakelingen is de aanwezigheid van halfgeleiders. In dit practicum maak je kennis met een eerste halfgeleidercomponent, de *diode*, en in het volgende practicum met *transistors*. Diodes kennen talloze toepassingen, en in dit practicum zal je met enkelen experimenteren.

3.2 Doel van het practicum

In dit practicum ga je aan de slag met diodes. Je zal enkele gangbare diodetypes leren herkennen en de karakteristieken ervan opmeten. Je maakt gebruik van grafische gegevensverwerking om de belangrijkste diodeparameters zoals drempelspanning en zenerspanning te bepalen. Je ontdekt het gedrag van serieschakelingen van diodes en past dit toe om clipping- en clampingschakelingen te ontwerpen. Tot slot maak je gebruik van potentiometers om de lichtsterkte en kleur van RGB-LED's te regelen.

3.3 Herhaling: de diode

De term *diode* slaat eigenlijk op een groep componenten die, in tegenstelling tot weerstanden, een asymmetrische geleiding voor elektrische stroom vertonen. Bij weerstanden kon je immers vaststellen dat het niet uitmaakt met welke oriëntatie je in het breadboard prikt, bij diodes zal je merken dat dit wel het geval is. De meeste diodes worden gekenmerkt door de eigenschap dat stroom in de ene richting goed geleid wordt en in de andere richting zeer slecht. Een diode is dus een **dipool**. De polen heten respectievelijk *anode* en *kathode*.



Figuur 3.1: Het symbool van een diode met aanduiding van anode en kathode, en 2 veel voorkomende behuizingen (eng. packages): DO-35 (midden) en DO-41 (onderaan).

Een diode geleidt goed als ze voorwaarts gepolariseerd wordt, dit betekent dat de stroom van de anode naar de kathode vloeit. In omgekeerde richting, van kathode naar anode, ondervindt stroom veel weerstand. Men zegt dat de diode dan omgekeerd is gepolariseerd en spert. In figuur 3.1 zie je het schemasymbool van een diode: een pijl en een dikke streep. In voorwaartse polarisatie volgt de stroom de richting van de pijl. Bij conventie wordt op de behuizing van een diode steeds de zijde van de kathode gemarkeerd, gebruikelijk met een dun streepje.

Net zoals een elektrische weerstand is ook een diode een passieve component. Met diodes kan je dus geen signalen versterken, maar diodes vinden veel andere toepassingen in de elektronica. Je zal doorheen je opleiding een groot aantal van deze toepassingen tegen komen.

3.3.1 Terminologie

Een ideale diode (zie theorie) heeft in voorwaartse polarisatie (van anode naar kathode) een nulweerstand en in omgekeerde polarisatie (van kathode naar anode) een oneindige weerstand. In de realiteit is dit niet het geval. In voorwaartse polarisatie moet er een bepaalde spanning over de diode worden aangelegd tussen anode en kathode vooraleer de diode in geleiding komt. Dit heet de *drempelspanning* (eng. *threshold voltage*). De waarde van deze drempelspanning hangt af van het type diode. In omgekeerde polarisatie is de weerstand niet oneindig en zal er toch een kleine stroom lopen, dit heet de *lekstroom* (eng. *leakage current*). Bij een bepaalde spanning zal de lekstroom fors toenemen, een ongewenst effect bij de meeste diodes. De spanning waarbij dit gebeurt heet de *doorslagspanning* (eng. *reverse breakdown voltage*).

3.3.2 Types diodes

Intern zijn diodes opgebouwd uit 2 verschillende laagjes van verschillende materialen, een junctie (eng. *junction*). Afhankelijk van de eigenschappen van deze 2 materialen in combinatie met de dikte, vorm en grootte van de laagjes krijgt de diode andere karakteristieken.

- **Siliciumdiode:**
Bestaat uit een laagje positief gedopeerd silicium (p) en een laagje negatief gedopeerd silicium (n). Siliciumdiodes worden het meest courant toegepast, en hebben een drempelspanning van ca. 650 mV.
- **Germaniumdiode:**
Identiek aan siliciumdiodes, maar met Ge in plaats van Si. De drempelspanning is ongeveer de helft, ca. 300 mV. Tegenwoordig nog maar zelden gebruikt.
- **Schottkydiode:**
Een siliciumdiode waarbij het p -halfgeleiderlaagje werd vervangen door een metaallaagje zoals Mo, Pt, Cr of W. Schottkydiodes zijn sneller dan silicium- en germaniumdiodes, en hebben een lagere drempelspanning tussen ca. 150 mV en 450 mV. Momenteel het meest gebruikte diodetype.
- **LED:**
Een lichtgevend diode (eng. *light emitting diode*) waarvan de behuizing werd vervangen door

een doorschijnende epoxy lens. Verkrijgbaar in verschillende kleuren, vormen en maten. De drempelspanning hangt af van de kleur.

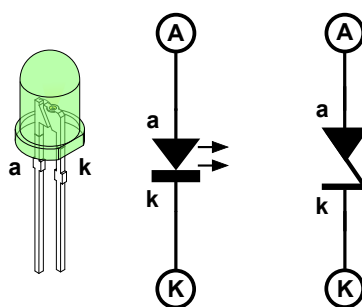
- **Fotodiode:**

Een lichtgevoelige diode die wordt toegepast als lichtsensor.

- **Zenerdiode:**

Een sterk gedopeerde siliciumdiode met een precies gekende doorslagspanning, die dan de *zener-spanning* wordt genoemd (zie figuur 3.2).

Buiten deze diodetypes zijn er nog veel anderen, zoals varicapdiodes, TVS-diodes, tunneldiodes, lawinediodes, enzovoort. Deze hebben ingewikkeldere eigenschappen en vallen buiten het bestek van het WPO Basiselektronica. Je maakt ermee kennis in de komende jaren.



Figuur 3.2: Symbool van een LED en een typische 5 mm LED. Het langste draadje is steeds de anode, de kathode wordt gekenmerkt door een afgeschuinde lens. Rechts is het symbool van een zenerdiode weergegeven.

3.4 Diodekarakteristieken

Weerstand staat helaas eenzaam aan de top van elektronica-componenten wat betreft eenvoud van hun I-U-curve. Voor andere componenten, waaronder diodes, bestaat er geen lineair verband tussen de spanning erover en de stroom erdoor, en dus zijn de bijhorende I-U-curves ook geen rechten.

In het volgende experiment ga je de karakteristiek van enkele diodes gaan opmeten: een siliciumdiode van type 1N4004, een LED met een kleur naar keuze, een 5.6 V zenerdiode en een schottkydiode van type 1N5817.

3.4.1 Opzet van het experiment

Met de bouw van je proefopstelling staat of valt de kwaliteit van de metingen, en het is dus belangrijk om hier goed over na te denken vooraleer je begint. Je weet bijvoorbeeld al dat diodes in voorwaartse polarisatie boven hun drempelspanning een zeer lage weerstand vertonen, en de te verwachten stroom erdoor kan dus behoorlijk groot worden. Dat is een probleem omdat

- de multimeters slechts een bereik hebben van 250 mA - 500 mA in $\mu\text{A}/\text{mA}$ -modus;
- diodes vernield worden als de stroom oploopt boven hun maximumwaarde.

De maximale stroom die door een diode mag vloeien als ze voorwaarts gepolariseerd is hangt af van eigenschappen zoals type en fysieke grootte. Je vindt deze parameter als I_O of I_F in diodedatasheets. Consulteer de datasheet van de 1N4004 siliciumdiode, zoek de maximale gemiddelde voorwaartse stroom, en noteer deze in je verslag.

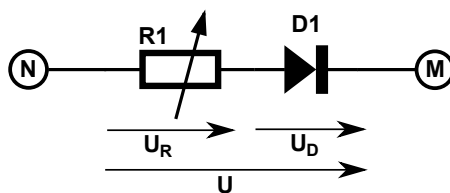
Voor LED's is de maximaal toegelaten stroom veel lager, meestal rond 40 mA. In praktische toepassingen, als verklikkerlampje op USB-stick bijvoorbeeld, blijf je hier natuurlijk liefst ver onder!

Bij zenerdiodes wordt ook het maximale vermogen aangegeven dat in tegengestelde polarisatie mag verstoekt worden. De stroom die hiermee overeen komt kan je vinden met behulp van de zenerspanning vermits $P = U \cdot I$.

Voor alle experimenten moet dus de spanning over de diode kunnen gevarieerd worden terwijl je er tegelijk voor moet zorgen dat de maximale stroom nooit overschreden wordt.

3.4.2 Potentiometers

De eenvoudigste manier om de stroom door een diode te begrenzen is door er een weerstand mee in serie te schakelen. Weerstanden die voor dit doel in serie geschakeld worden met diodes heten *voorschakelweerstand*en of *stroombegrenzingsweerstand*en. Het voordeel aan zo'n serieweerstand is dat de stroom door de diode zeer nauwkeurig kan afgeregeld worden, ook als de curve grillige sprongen maakt.



Figuur 3.3: Serieschakeling van potentiometer en diode. De totale spanning U over de serieschakeling is de som van de spanning over de diode U_D en de spanning over de potentiometer U_R .

Het is natuurlijk nogal vervelend om voor elke meting en voor elke diode steeds de weerstand te wisselen door een andere waarde. Een eenvoudigere oplossing hiervoor is gebruik te maken van een regelbare weerstand, ook wel *potentiometer* geheten. Potentiometers bestaan in verschillende maten, vormen en types. De meest courante vorm is die met een draaiknop, die je onder andere kan vinden als volumeregeling op headsets, om het vermogen van een keukenrobot of stofzuiger mee te regelen, enzovoort.

Een potentiometer heeft 3 aansluitingen: twee uiteinden en een middenaftakking. De weerstand tussen de uiteinden is steeds constant, en is de maximale weerstand waarop de potentiometer kan ingesteld worden. Via de middenaftakking wordt dan een interne spanningsdeler gevormd. De “ingestelde” weerstandswaarde is dus de weerstand tussen één van de uiteinden en de middenaftakking.

Potentiometers met een grote draaiknop worden in de behuizing van apparaten gemonteerd als regelknoppen, bv. op stereo-installaties, thermostaat enzovoort. De kleinere variant is uitgerust met een gleuf waar je een schroevendraaier moet insteken om de waarde te verdraaien. Deze worden gebruikt om de weerstandswaarde af te trimmen bij de kalibratie van nauwkeurige toestellen, en daarom *trimpots* genoemd.

Let op: wanneer je de knop van een potentiometer op 0 draait, dan is de weerstand tussen dat uiteinde en de middenaftakking ook (quasi) 0. De stroom die er in je schakeling kan gaan lopen kan dus erg hoog worden! Zorg er dus voor dat de stroombegrenzing van je voeding op een veilige waarde staat ingesteld. Je kan ook gebruik maken van een vaste weerstand in serie met de potentiometer.

3.4.3 Meetresultaten verzamelen

Je zal een groot aantal metingen moeten uitvoeren om de I-U-curves van de 4 diodes te kunnen bepalen tussen -10 V en 10 V. Het is dus belangrijk dat je nauwgezet werkt, zodat je de metingen van de verschillende diodes uit elkaar kan houden. Je kan ze eerst noteren op papier, wat doorgaans gemakkelijker werkt, of meteen invoeren in een elektronisch rekenblad (*eng. spreadsheet*) zoals LibreOffice Calc van waaruit je dan ook meteen de I-U-curves kan plotten in een grafiek.

Experiment: Ontwerp een proefopstelling die toelaat om de karakteristiek van de hierboven vermelde diodes te bepalen. Ontwerp de opstelling zodanig dat voor de geteste diodes de randvoorwaarden van multimeters en diodes inzake maximale stroom en/of spanning niet overschreden worden. Gebruik de opstelling daarna om de karakteristieken van een siliciumdiode (1N4148/1N4007), een Schottkydiode (1N5817), zenerdiode (BZY5V6) en een LED met een kleur naar keuze te bepalen.

Teken de 4 curves in één enkele grafiek en bepaal van elke curve de best passende regressie. Het is mogelijk dat de curve niet kan beschreven worden met slechts één enkel regressietype, in dat geval moet je het domein van de curve opdelen en voor elk stuk een afzonderlijke regressielijn en bijhorende vergelijking zoeken. Maak de grafiek groot genoeg zodat details duidelijk zichtbaar zijn. Indien nodig maak je gebruik van een logaritmische schaal (zie cursus *Ingenieursvaardigheden*).

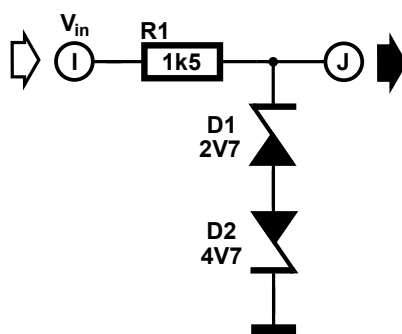
Maak tot slot een tabel waarin je voor elk gemeten diodetype de voorwaartse drempelspanning en omgekeerde doorslagspanning of zenerspanning vergelijkt. Duidt deze punten ook aan in je grafiek.

3.5 Diodeschakelingen

Tijdens de vorige experimenten heb je gemerkt dat de spanning over een diode in voorwaartse polarisatie nog maar weinig toeneemt naarmate de stroom door de diode stijgt dankzij het exponentiële verband tussen beide grootheden. In elektronische schakelingen kan de stroom immers niet onbeperkt toenemen! Hetzelfde geldt voor zenerdiodes in omgekeerde polarisatie, die sterk gaan geleiden als ze over hun zenerspanning worden gestuurd.

3.5.1 Clipping

Dit effect kan nuttig toegepast worden in situaties waarbij een bepaalde ingang moet begrensd worden. Als je bijvoorbeeld wil vermijden dat een audioversterker wordt beschadigd als de ingangsspanning te sterk toeneemt (bv. als iemand in de microfoon staat te schreeuwen), dan kan je te hoge signalen afsnijden (*eng. clipping*) door gebruik te maken van de goede geleiding van diodes boven hun drempelspanning.



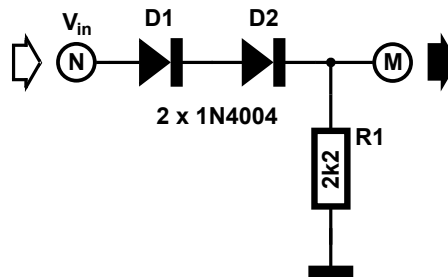
Figuur 3.4: Beveiliging van een signaal met een diodeclippingschakeling.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 3.4 op een breadboard en meet voor ingangsspanningen tussen -10 V en 10 V (ingang I) de spanning over de serieschakeling van 2 zenerdiodes in oppositie (uitgang J). Zet de meetresultaten uit in een duidelijke grafiek met op de x-as de ingangsspanning op punt I en op de y-as de uitgangsspanning op punt J. Wat is de minimale en maximale spanning op de uitgang? Wat gebeurt er als je de spanning laat variëren tussen -20 V en 20 V?

3.5.2 Clamping

Doordat de spanning over een geleidende diode nagenoeg constant is, is het spanningsverschil tussen de anode en de kathode ook constant. Als de spanning op de anode van een gewone 1N4004 siliciumdiode

bijvoorbeeld stijgt van 4 V naar 9 V dan zal de spanning op de kathode met dezelfde waarde verhogen. Doordat beide spanningen aan elkaar “vastgeklampt” zitten (*eng. clamping*) is het dus mogelijk om eenvoudige spanningsvolgers te maken.



Figuur 3.5: Spanningsvolger met 2 siliciumdiodes.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 3.5 en varieer op de ingang N de spanning van 0 tot 10 V. Maak een grafiek met de ingangsspanning op de x-as en zet in deze grafiek 2 curves uit, één voor de spanning op punt N en één voor de spanning op punt M. Bepaal de vergelijking van de curves en maak daarvan gebruik om een wiskundig verband voor de spanningen op punten N en M af te leiden.

3.6 Toepassing 1: RGB-LED's

RGB-LED's bestaan uit een rode (R), een groene (G) en een blauwe (B) LED die in één behuizing zijn ondergebracht, en waarvan ofwel de anodes of de kathodes intern verbonden zijn (respectievelijk *common anode RGB* of *common kathode RGB*). RGB-LED's hebben dus 4 pennen. Er bestaan ook varianten met 2 kleuren, die dan 3 pennen hebben (één voor de gemeenschappelijke anode of kathode, en één voor elke kleur).

Als alle kleuren even sterk oplichten, dan wordt wit licht geproduceerd. Andere kleuren kunnen gevormd worden door de intensiteit van de 3 LED's individueel te regelen. Om een RGB-LED paars te laten oplichten, moet je bijvoorbeeld rood en blauw mengen, en groen uitgeschakeld laten.

Experiment: Ontwerp nu zelf een schakeling waarmee je een RGB-LED in verschillende kleuren kan laten oplichten door de lichtintensiteit van elke kleur afzonderlijk aan te passen. Dimensioneer je schakeling zodanig dat er bij een voedingsspanning van 5 V een maximale stroom van 35 mA per LED kan lopen. Test je ontwerp uit en schets je schakeling in je verslag. Je schakeling werkt als je de RGB-LED wit kan laten oplichten. Noteer bij een witte kleur de voedingsspanning en de weerstandswaarde(n) in je verslag. Meet ook de spanning over elke individuele kleur.

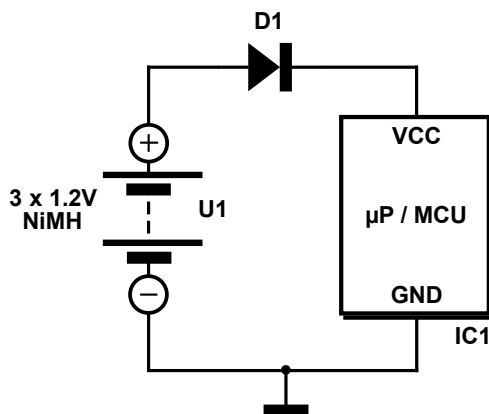
Pro tip: maak gebruik van draden in dezelfde kleur als de LED's om je breadboardschakeling overzichtelijk te houden!

Experiment: Eens de LED wit oplicht zet je de spanning van de voeding op 0. Draai de voedingsspanning vervolgens terug langzaam omhoog. Welke kleur licht eerst op? Waarom? Verklaar je antwoord aan de hand van een I-U-schets.

3.7 Toepassing 2: bruggelijkrichters

Elke elektronische schakeling heeft een voeding nodig, en ongeacht of die uit een (herlaadbare) batterij of een netstroomadapter komt, zal je in elke schakeling ergens één of meerdere aansluitpunten voor externe voedingsspanningen moeten voorzien. In het labo wordt de voedingsspanning voor schakelingen steeds geleverd door een regelbare *lab power supply*, maar in reële applicaties is dat niet zo praktisch. Voor een TV-afstandsbediening bijvoorbeeld maak je gebruik van batterijen of *energy harvesters*, bij

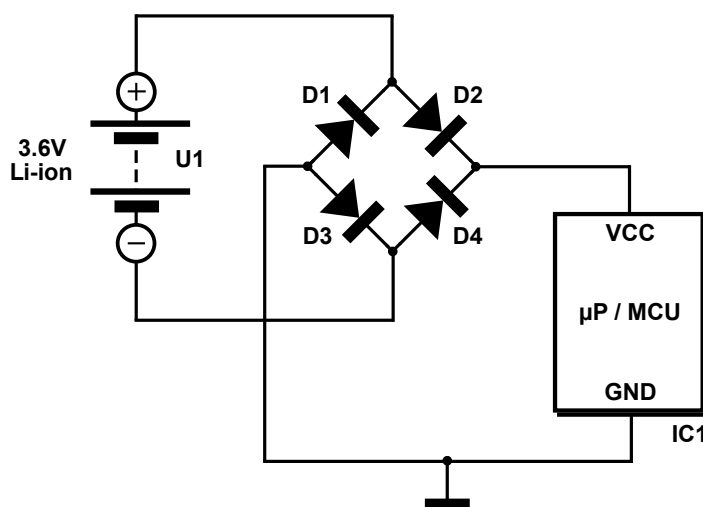
printers van een netadapter, enzovoort. Hierbij is de *polarisatie* van de spanning steeds van groot belang. Wordt de polariteit omgedraaid, door bijvoorbeeld de batterijen omgekeerd in een afstandsbediening te steken, dan heeft dit gevolgen voor de schakeling die ermee gevoed wordt. In het beste geval zal de schakeling niet meer werken tot je de batterijen er “correct” in steekt, in het slechtste geval wordt de schakeling onherroepelijk beschadigd. Als je de 19 V voedingsspanning van je laptoplader ompoolt bijvoorbeeld, dan zal je moederbord dat hoogstwaarschijnlijk niet overleven.



Figuur 3.6: Diode als ompoolbeveiliging bij microprocessors of microcontrollers.

Zoals je in de vorige experimenten hebt kunnen vaststellen, zijn diodes ideaal geschikt als ompoolbeveiliging. In de ene polarisatierichting geleiden ze immers uitstekend, in de andere minimaal. Door een diode in serie op te nemen tussen voeding en belasting, zoals in figuur 3.6, wordt de microprocessor (μP) of microcontroller (MCU, *microcontroller unit*) beveiligd tegen ompoling van de batterijen (U1). Als die correct zijn gepolariseerd, dan is diode D1 ook voorwaarts gepolariseerd, en wordt de microcontroller normaal van stroom voorzien. Als de batterijen echter worden omgedraaid dan zal D1 sperren. De volledige batterijspanning zal dan over D1 vallen en er loopt geen stroom door de kring waardoor de microcontroller niet beschadigd wordt. Er gebeurt in dat geval niks tot je de batterijen “correct” aansluit.

Bekijk de grafiek met diodecurves, waarin je de karakteristieken van een siliciumdiode, LED, zenerdiode en schottkydiode met elkaar vergeleken hebt. Welk diodetype is best geschikt om te dienen als ompoolbeveiliging, zoals gebruikt in figuur 3.6? Heeft de seriediode ook een nadeel?



Figuur 3.7: Een betere ompoolbeveiliging: de bruggelijkrichter.

Hoewel schakeling 3.6 de belasting beschermt tegen ompoling, zal die belasting ook niet meer werken tot het euvel is opgelost. Dit kan voor frustratie zorgen, bv. USB-connectors die maar op één enkele

manier in USB-poorten passen. In het geval van een TV-afstandsbediening is het voor de gebruiker ook niet meteen duidelijk waar het probleem ligt: kapotte afstandsbediening, lege batterijen, of batterijen er verkeerd in gestoken? Een elegante oplossing voor dit probleem is de bruggelijkrichter (*eng. bridge rectifier*), zoals weergegeven in figuur 3.7. Bruggelijkrichters bestaan uit 4 diodes in een ruitvormige configuratie. Afhankelijk van de polarisatie van de bron zullen op elk ogenblik maar 2 van de 4 diodes in geleiding zijn, die de voedingsspanning zodanig draaien dat de belasting steeds correct gepolariseerd is ongeacht de polarisatie van de voedingsspanning. Met behulp van een bruggelijkrichter maakt het dus niet meer uit hoe je de batterijen in de TV-afstandsbediening steekt, of hoe je een USB-connector inpluigt.

Experiment: Bouw een bruggelijkrichter met 4 LED's als diodes, zodat je gemakkelijk visueel kan waarnemen welke diodes in geleiding zijn. Ga uit van een voedingsspanning van ± 10 V. Belast de bruggelijkrichter met een weerstand, en dimensioneer deze zodanig dat de stroom door de LED's maximaal 10 mA is bij een voedingsspanning van ± 10 V. Laat de voedingsspanning vervolgens variëren tussen -10 V en 10 V, en meet de spanning over de belastingsweerstand. Zet deze spanning vervolgens uit in functie van de voedingsspanning. Hoe zou je het gedrag van de bruggelijkrichter bij variabele spanningen en polarisaties samenvatten?

4

Veldeffecttransistors

“I love it when a plan comes together.”

Hannibal Smith

4.1 Inleiding

Je hebt reeds kennis kunnen maken met de *diode*. Die kan opgebouwd worden uit twee laagjes halfgeleider met verschillende dopering, waarvan één laagje occasioneel kan vervangen worden door een metaallaagje om specifieke effecten te verkrijgen. Het gedrag wordt bepaald door een specifieke combinatie van gebruikte materialen (types halfgeleider) en de mechanische constructie van de diode. Dit resulteert in de diodetypes waarmee je in het vorige practicum aan de slag bent gegaan: siliciumdiodes, schottkydiodes, zenerdiodes, germaniumdiodes, LED's enzovoort.

Een alternatieve manier om de diode te gebruiken is de stroom door één van beide laagjes te sturen en de geleidbaarheid te controleren door een spanning aan te leggen tussen beide laagjes om zo het verarmingsgebied (zone arm aan vrije ladingsdragers) te controleren. Het resultaat is een *veldeffecttransistor*, die zich gedraagt als een potentiometer waarvan de weerstandswaarde (= impedantie of resistiviteit) via een extra sturingang kan gecontroleerd worden.

4.2 Doel van het practicum

In dit practicum onderzoek je de eigenschappen van de eenvoudigste actieve elektronische componenten, *veldeffecttransistors* (eng. *field effect transistors*), en bepaal je de belangrijkste parameters experimenteel. Je bestudeert de verschillen tussen MOSFET's en JFET's, analyseert hun gedrag in verschillende configuraties, en leert de verschillende werkingsmodi kennen. Tot slot maak je kennis met enkele toepassingen van MOSFET's.

4.3 Herhaling: FET's

4.3.1 Naamgeving

Er heerst nogal wat verwarring rond de term “*transistor*”. Deze slaat technisch gezien op elke halfgeleidercomponent die in staat is om een elektrische signalen te versterken of elektrische vermogens

te schakelen. Stapels maken van laagjes halfgeleider is immers niet de enige manier om tot een driedimensionale structuur te komen, dus je kan je voorstellen dat er een erg groot aantal verschillende driedimensionale halfgeleiderstructuren bestaat die allemaal ook verschillende eigenschappen hebben, maar wel allemaal – technische gezien – “*transistor*” heten.

Historisch sloeg de term *transistor* enkel op een stapel van 3 alternerende laagjes halfgeleider die elk afzonderlijk naar buiten gebracht werden. Dit was de eerste concrete implementatie van een transistor, zoals in 1947 door het team van Willam Shockley in Bell Labs werd ontwikkeld. Het principe achter veldeffecttransistors was echter al bekend sinds het werd beschreven door Julius E. Lilienfeld in 1926, en de ontwikkelingen volgden elkaar zeer snel op. In de loop der jaren werden er steeds meer varianten met compleet andere eigenschappen ontwikkeld, waardoor de term *transistor* tot verwarring leidde. Om dit op te lossen heeft men de bestaande transistors het retroniem *bipolaire junctietransistors* toegewezen, om het onderscheid te maken met modernere types zoals *veldeffecttransistors*, en een brede waaier andere halfgeleiders zoals thyristors, triacs, IGBT's, enzovoort. Maar wees je er dus van bewust dat men in de literatuur naar quasi elke halfgeleidercreatie kan refereren met de term “transistor”. In deze hand-outs refereren we naar bipolaire junctietransistors met de afkorting “BJT” en naar veldeffecttransistors met de afkorting “FET”.

4.3.2 Transistortypes

De 3 meest gebruikte types transistors zijn MOSFET's, BJT's en JFET's, in die volgorde van voorkomen. MOSFET's en JFET's zijn beide veldeffecttransistors (FET's) en zijn *spanningsgestuurde* componenten. Ze zijn daarom gemakkelijker in gebruik dan BJT's, die *stroomgestuurd* zijn.

In deze practicumssessie wordt gefocussed op de spanningsgestuurde FET's, in de volgende practicumssessie worden stroomgestuurde BJT's behandeld.

4.3.3 Databladen

De meeste transistors zijn behoorlijk complexe componenten waarin een groot aantal fysische halfgeleiderprocessen spelen. Een gevolg hiervan is dat ze worden gekenmerkt door minstens evenveel eigenschappen die hun gedrag beschrijven onder verschillende omstandigheden. Om het gedrag van een MOSFET te beschrijven, de eenvoudigste van alle transistors, zijn al gauw een 5-tal parameters nodig. Voor BJT's kan dit oplopen tot meer dan 15!

Het gedrag van elke transistor wordt uitvoerig beschreven in zijn datablad (*eng. datasheet*). Je kan dit beschouwen als de “identiteitskaart” van de transistor. Fabrikanten van transistors publiceren deze datasheets – vroeger in boeken maar tegenwoordig online op het Internet – om je als ingenieur de mogelijkheid te geven de eigenschappen van verschillende types transistors te vergelijken en er de meest geschikte uit te kiezen voor jouw specifieke toepassing.

De datasheet van een transistor kan je dus het gemakkelijkst vinden door te googelen op het typenummer van de transistor die je zoekt. Om bijvoorbeeld de datasheet van een IRF540 MOSFET te vinden, een veel voorkomende N-MOSFET, kan je de query `IRF540 datasheet filetype:pdf` gebruiken. Dit werkt overigens ook voor diodes en de meeste andere elektronische componenten. De query `BAT83 datasheet filetype:pdf` levert je bijvoorbeeld de datasheet voor de Schottkydiode die je in het vorige practicum hebt gebruikt.

Datasheets stellen parameters gebruikelijk voor in één of meerdere overzichtelijke tabellen. Het is erg belangrijk om het onderscheid te maken tussen de **maximumwaarden** (*eng. absolute maximum ratings*) enerzijds en de **elektrische eigenschappen** (*eng. electrical characteristics*) anderzijds. De maximumwaarden waarschuwen voor de fysieke grenzen van de component. Het overschrijden van deze maximumwaarden kan resulteren in beschadigingen aan de component en in ieder geval een sterk verkorte levensduur. Als je dus zelf aan de slag gaat met het ontwerpen van schakelingen, let er dan bij de

keuze van je componenten op dat hun maximumwaarden nooit overschreden worden. Veiligheidshalve blijf je natuurlijk best voldoende ver uit de buurt van deze maximumwaarden. Een veiligheidsfactor van 20 % tot 25 % is gangbaar.

Voorbeeld: Je bent op zoek naar een gelijkrichterdiode die in je schakeling onder maximale belasting een gemiddelde stroom van 2.2 A te verwerken krijgt. Veiligheidshalve kies je dan voor een diode die 25 % meer stroom aan kan. De maximumstroom $I_{max} = 2.2 \text{ A} \cdot (1 + 0.25) = 2.8 \text{ A}$. Een UF3008 diode zou dus een goede keuze zijn, want volgens de datasheet is de maximale stroom voor deze diode 3.0 A.

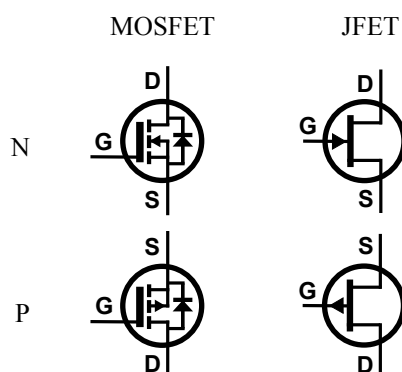
4.3.4 Terminologie

Veldeffecttransistors (FET's) bestaan uit een kanaal (*eng. channel*) dat bestaat uit gedopeerde halfgeleider (N of P) of een ongedopeerd substraat. Langs weerszijde van dit kanaal is een elektrode aangebracht uit omgekeerd gepolariseerd materiaal dat met het kanaal een PN-junctie vormt. Beide elektrodes zijn doorgaans met elkaar verbonden en heten de *gate* (afgekort G). De ingang van het kanaal heet *drain* (D), de uitgang *source* (S). Als je op een printplaat de 3 pinnen van een component aangeduid ziet als G, D en S dan weet je dus dat het om één of ander type FET gaat!

Bij alle FET's wordt de geleiding van het kanaal bepaald door een spanning die wordt aangelegd tussen de gate en de source, aangeduid met V_{GS} (de gate-sourcespanning). Als het kanaal in geleiding is bij $V_{GS} = 0$ dan spreekt men over een *verarmingstype* (*eng. depletion mode FET*), aangegeven in het symbool (zie figuur 4.1) met een volle lijn als kanaal. Als het kanaal spert bij $V_{GS} = 0$ dan heet dit een *verrijkingstype* (*eng. enhancement mode FET*), en wordt het kanaal als stippelijntje weergegeven.

De 2 belangrijkste types veldeffecttransistors zijn MOSFET en JFET, en zijn elektrisch elkaars tegengestelde. Bij een JFET bereikt het kanaal de maximale geleiding als er geen spanning wordt aangelegd op de gate, en dus $V_{GS} = 0$ (= depletion mode). Als er een spanning wordt aangelegd, dan zorgt injectie van tegengestelde ladingsdragers in de gate voor recombinatie met ladingsdragers in het kanaal, waardoor de geleiding van het kanaal vermindert.

Een MOSFET (*eng. Metal Oxide Substrate Field Effect Transistor*) werkt net omgekeerd. Het kanaal is hier onderbroken door een stukje materiaal zonder vrije ladingsdragers, waardoor geen stroom kan vloeien. Een MOSFET spert dus als $V_{GS} = 0$ (= enhancement mode). Wordt er echter een spanning aangelegd tussen gate en source, dan zal het resulterende elektrische veld ladingsdragers met dezelfde polariteit wegduwen uit het niet geleidende stukje waardoor het de zelfde polarisatie krijgt als de rest van het kanaal. Hierdoor wordt het kanaal hersteld, en kan er dus stroom door lopen.



Figuur 4.1: Schemasymbolen voor FET's. De bovenste rij geeft de symbolen voor FET's met een N-type kanaal, de onderste voor P-type kanalen. Links staan enhancement mode MOSFET's (let op het onderbroken kanaal), rechts depletion mode JFET's (met een doorlopend kanaal).

Figuur 4.1 toont de gangbare symbolen voor JFET's en MOSFET's. De meeste JFET's zijn deple-

tion mode, de meeste MOSFET's enhancement mode, zoals weergegeven in de symbolen, hoewel er ook depletion mode MOSFET's en enhancement mode JFET's bestaan (deze laatste 2 zijn niet weergegeven).

Het kanaal van JFET's of MOSFET's kan zowel uit negatief materiaal (N) als positief materiaal (P) bestaan, en dus wordt het onderscheid gemaakt tussen N-MOSFET's en P-MOSFET's enerzijds, en N-JFET's en P-JFET's anderzijds. N en P types zijn qua polarisatie elkaars exact tegengestelde. Zo stuur je een (enhancement mode) N-MOSFET in geleiding als $V_{GS} > 0$ en een P-MOSFET als $V_{GS} < 0$. Omgekeerd breng je een (depletion mode) N-JFET uit geleiding als $V_{GS} < 0$ en een P-JFET als $V_{GS} > 0$. In figuur 4.1 zie je het onderscheid tussen N en P types in de schemasymbolen. Zowel bij JFET's als MOSFET's worden N-types meer gebruikt als P-types omdat de weerstand van een N-kanaal lager is dan van een P-kanaal. Voor een Vishay IRF630 N-MOSFET is de minimale kanaalweerstand bijvoorbeeld $0.40 \Omega^1$ terwijl dit voor de complementaire P-variant IRF9630 al 0.80Ω is². De weerstand van het kanaal wordt aangeduid als R_{DS} (de weerstand tussen drain en source). Bij MOSFET's wordt de weerstand in geleiding genoteerd als $R_{DS(ON)}$. In het geval van de IRF630 is $R_{DS(ON)} = 0.40 \Omega$.

4.4 De MOSFET

MOSFET's zijn het eenvoudigste type FET's in gebruik, en daarom het best geschikt om mee te beginnen. MOSFET's zijn ontworpen als spanningsgestuurde schakelaars. In de volgende experimenten ga je zelf aan de slag met MOSFET's.

4.4.1 Schakeleigenschappen

Bij een MOSFET is de weerstand van het kanaal, gemeten tussen drain en source, enkel afhankelijk van de aangelegde externe spanning en de dopering van het kanaal zelf. Deze weerstand R_{DS} (de weerstand tussen drain en source) en kan een factor 10^{10} verschillen tussen geleidende en sperrende toestand. De laatste jaren is de productietechnologie sterk verbeterd, en er zijn nu MOSFET's verkrijgbaar die in geleidende toestand ($R_{DS(ON)}$) een weerstand hebben in de grootte-orde van $1 \text{ m}\Omega$ en in sperrende toestand van meer dan $10 \text{ M}\Omega$.

Het belangrijkste verschil tussen een MOSFET en een JFET is de overgang van geleidende naar sperrende toestand. Bij een JFET gebeurt dit geleidelijk, maar bij een MOSFET vrij abrupt. Als de spanning tussen gate en source, V_{GS} , boven de drempelspanning van de MOSFET stijgt dan zal de weerstand R_{DS} sterk afnemen tot de minimumwaarde $R_{DS(ON)}$. Een geleidende MOSFET heeft dus een erg lage R_{DS} , een sperrende MOSFET een zeer hoge R_{DS} . De spanning V_{GS} waarbij deze verandering optreedt heet de drempelspanning (eng. *threshold voltage*) $V_{GS(th)}$ en is één van de belangrijkste karakteristieken van een MOSFET.

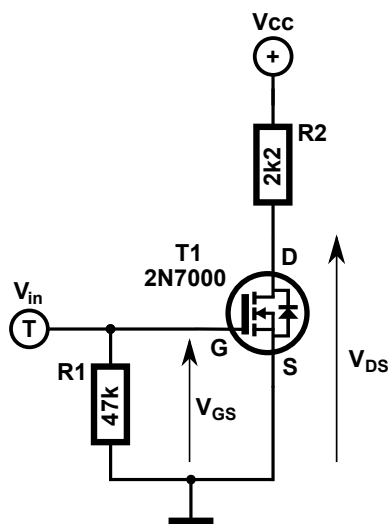
Experiment: Bouw de schakeling in figuur 4.2 en leg een voedingsspanning aan tussen 5 V en 10 V. De MOSFET van type 2N7000 is een N-MOSFET voor huis-, tuin- en keukentoepassingen ("general purpose"). Let op de aansluitingen van de gate, de drain en de source. Ontwerp zelf een experiment om de drain-sourceweerstand R_{DS} in functie van de gate-sourcespanning V_{GS} te kunnen uitzetten in een grafiek. De methodiek is gelijkaardig aan die je hebt toegepast om de diodekarakteristieken in het vorige hoofdstuk op te meten. Hoe zou je, op basis van deze grafiek, de werking van de MOSFET beschrijven? Bepaal de drempelspanning $V_{GS(th)}$ en de minimale $R_{DS(ON)}$.

4.4.2 Drempelspanning

Je merkt dat heel wat componenten zoals diodes en MOSFET's een minimale spanning vereisen om in geleiding te komen. Dit is een gevolg van het verarmingsgebied dat moet overwonnen worden, en bijgevolg zijn drempelspanningen afhankelijk van de constructie van de component. Net zoals de meeste

¹<http://www.vishay.com/docs/91031/sihf630p.pdf>

²<http://www.vishay.com/docs/91084/91084.pdf>



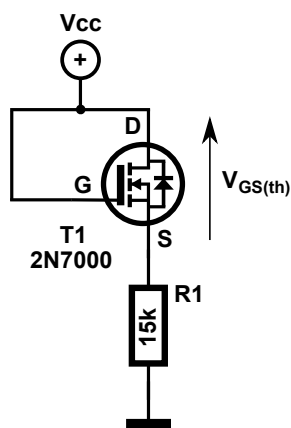
Figuur 4.2: Bepaling van de drain-sourceweerstand R_{DS} van een N-MOSFET.

andere parameters variëren drempelspanningen sterk tussen verschillende types binnen dezelfde familie, en zelfs binnen eenzelfde type onderling. Dit fenomeen ken je reeds als *componentspreiding*.

Dankzij het spanningsgestuurde karakter van N-MOSFET's is hun drempelspanning eenvoudig te bepalen door middel van de schakeling in figuur 4.3. Per definitie komt de N-MOSFET in geleiding als de drempelspanning overschreden wordt. De weerstand tussen drain en source wordt dan erg laag. In figuur 4.3 wordt de drain rechtstreeks aan de voedingsspanning gelegd. Dit resulteert in een interessant oscillerend gedrag.

- Als $V_{GS} = 0$ dan zal het drain-sourcekanaal van de MOSFET sperren en is $V_S \approx 0$ vermits er geen stroom door R1 loopt en de spanning erover bijgevolg 0 is.
- Als $V_{GS} = V_{cc}$ dan zal de MOSFET in geleiding komen. Op dat moment wordt $V_S \approx V_{cc}$. Hierdoor is het spanningsverschil tussen gate en source nu erg klein, de drempel is niet langer overschreden, dus de MOSFET gaat opnieuw sperren. Daardoor daalt V_S opnieuw tot 0, stijgt V_{GS} weer boven de drempel uit waardoor de MOSFET weer in geleiding komt, enzovoort.

In werkelijkheid gaan deze oscillaties zodanig snel dat het drain-sourcekanaal niet de tijd heeft om tussen een volledig geleidende en volledig isolerende toestand te schakelen. Van zodra V_{GS} immers nét boven of nét onder de drempel komt, wordt het proces weer omgekeerd.



Figuur 4.3: Experimenteel bepalen van $V_{GS(th)}$ bij een N-MOSFET.

Experiment: Bepaal de drempelspanning van de 2N7000 N-MOSFET uit het vorige experiment. Vervang de 2N7000 vervolgens door een vermogen-MOSFET van type IRF540 of IRF630, en herhaal de meting. Welk verschil merk je op wat betreft $V_{GS(th)}$ van beide MOSFET's? Bereken ook het vermogen P dat in beide MOSFET's gedissipeerd wordt.

De drempelspanning van een P-MOSFET kan op een analoge (no pun intended) manier bepaald worden.

Experiment: Wijzig de schakeling in figuur 4.3 zodanig dat je er nu de drempelspanning van een P-MOSFET mee kan meten, schets de schakeling in je verslag, en verifieer je theorie aan de hand van een BS250 P-MOSFET.

In het 2^e deeltraject van je Bachelor zal je tijdens het Ontwerpproject kennis maken met gevorderde toepassingen van MOSFET's in het ontwerp van mechatronische motorsturingen.

4.4.3 Polarisation

Je vraagt je waarschijnlijk af waarom een onderscheid wordt gemaakt tussen drain en source, hoewel ze beiden identieke verbindingen zijn aan hetzelfde kanaal. Zijn beiden niet gelijk? Kan je drain en source niet gewoon omdraaien? In principe wel, want het kanaal is symmetrisch.

In de praktijk wordt het ontwerp van MOSFET's echter zodanig geoptimaliseerd dat de overgang tussen sperrende en geleidende toestand zo kort mogelijk is. Hoe korter deze schakeltijd, hoe minder verliezen er optreden bij het schakelen tussen geleidende en sperrende toestand. In de stroomadapter van je laptop bijvoorbeeld worden MOSFET's aan- en uitgeschakeld aan een frequentie tussen 500 kHz en 2 MHz, dus daarbij is het cruciaal om verliezen te minimaliseren om te verhinderen dat je adapter te warm wordt! Door deze optimalisatie is het kanaal van de MOSFET echter niet langer symmetrisch: de drain-zijde wordt breder gemaakt zodanig dat de warmte beter kan afgevoerd worden, en tussen source en drain wordt een diode aangebracht die voorkomt dat de PN-junctie tussen gate en kanaal voorwaarts kan gepolariseerd worden. Bovendien wordt het isolerende stuk van het kanaal (*bulk* genaamd) vaak verbonden met de source. Dit zie je ook in het symbool van MOSFET's in figuur 4.1.

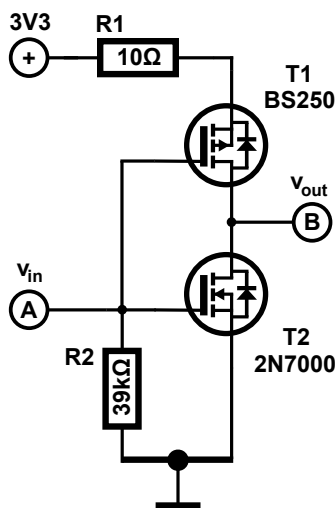
Je kan de aanwezigheid van de source-drain diode gemakkelijk zelf meten met een multimeter in *diode*-stand. Bij een N-MOSFET dien je een geleidende diode te vinden tussen source en drain, in de andere richting moet deze diode sperren. Bij een P-MOSFET staat de diode net andersom.

Desondanks wordt de geleiding van de MOSFET enkel bepaald door V_{GS} , en niet door de polarisatie van het kanaal zelf. De stroom kan dus in beide richtingen door het kanaal lopen, afhankelijk van hoe je de MOSFET gebruikt!

4.4.4 CMOS

Door hun eigenschappen als digitale schakelaars kennen MOSFET's veel toepassingen, bijvoorbeeld voor elektronisch schakelen van vermogens (denk maar aan LED-verlichting, allerhande voedingsschakelingen, motorsturingen enzovoort). Op chipniveau worden ze ook gebruikt om digitale logica te implementeren. MOSFET's (en hun afgeleiden) vormen zo de basis van geïntegreerde schakelingen. In dat geval worden N-MOSFET's gebruikt samen met hun complementaire P-equivalent. Zulke configuratie van complementaire N-MOSFET's en P-MOSFET's heet CMOS.

Bekijk de schakeling in figuur 4.4. Ze bestaat uit een serieschakeling van de kanalen van een P-MOSFET (T1) en een N-MOSFET (T2). Er is ook een kleine weerstand toegevoegd om de stroom te begrenzen als beide MOSFET's gelijktijdig in geleiding worden gestuurd. De gates zijn met elkaar verbonden, en worden met een grote weerstand (R2) naar de massa getrokken zodanig dat de schakeling niet gevoelig is voor elektromagnetische interferentie.



Figuur 4.4: Schakeling voor het uitmeten van het gedrag van complexere MOSFET-schakelingen met CMOS-topologie.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 4.4 en hou de voedingsspanning constant op 3.3 V (check dit met een multimeter) en laat nu de ingangsspanning variëren tussen 0 en 3.3 V, bijvoorbeeld in stappen van 100 mV of 200 mV. Stel een grafiek op waarin je V_{out} uitzet in functie van V_{in} . Wat is het (digitale) verband tussen V_{in} en V_{out} ? Tip: als je beide spanningen uitzet als afzonderlijke curves in functie van de het aantal samples in plaats van in functie van elkaar kan je het verband gemakkelijker afleiden!

4.5 De JFET

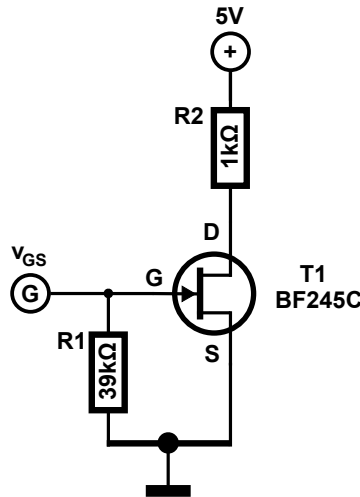
Waar een MOSFET geoptimaliseerd is om de overgangsperiode tussen zo hoog en zo laag mogelijk kanaalweerstand te minimaliseren, is een JFET geoptimaliseerd om de weerstand van het kanaal zo linear mogelijk te kunnen instellen. Een MOSFET is dus bedoeld als digitale spanningsgestuurde schakelaar, een JFET is bedoeld als spanningsgestuurde regelbare weerstand die ook als constante stroombron kan ingezet worden.

4.5.1 Eigenschappen

Anders dan bij een MOSFET is een JFET in geleiding als er geen spanning tussen gate en source (V_{GS}) wordt aangelegd. De $R_{DS(ON)}$ is in dat geval significant hoger dan bij MOSFET's, gebruikelijk in de grootte-orde $10^1 - 10^2 \Omega$. Naarmate het kanaal wordt dichtgeknepen door een V_{GS} aan te leggen, neemt de weerstand van het kanaal toe. Bij een N-JFET moet de $V_{GS(ON)}$ hiervoor **negatief** zijn, bij een P-JFET **positief**.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 4.5 op een breadboard gebruik makend van een BF245C N-JFET. Weerstand R1 trekt V_{GS} naar 0 als de gate wordt opengelaten zodanig dat de schakeling ongevoelig wordt voor elektromagnetische interferentie op de gate. R2 staat in serie met het kanaal, en begrenst de stroom als het kanaal in geleiding komt om beschadiging van de JFET te voorkomen. Pas de schakeling zodanig aan dat zowel de drain-sourcespanning V_{DS} als de gate-sourcespanning V_{GS} kan geregeld worden tussen 0 en -10 V, en dat de stroom door het kanaal kan gemeten worden. Denk er hierbij aan dat, om een depletion mode N-JFET zoals de BF245C in geleiding te brengen, $V_{GS} \leq 0$!

Teken een grafiek waarin je I_{DS} (de stroom door het kanaal) uitzet in functie van V_{DS} , en voeg een curve toe voor verschillende V_{GS} spanningen. Begin bijvoorbeeld bij $V_{GS} = 0$, vervolgens $V_{GS} = -1$ enzovoort totdat je een duidelijk patroon ziet. Een belangrijke curve hierbij is die waarbij $V_{GS} = 0$,



Figuur 4.5: Schakeling met een BF245 N-type JFET, met aanduiding van gate (G), drain (D) en source (S).

omdat je hierop de *saturatiestroom* I_{DSS} kan aflezen op de I_{DS} -as. Duidt deze limiet aan op de grafiek.

Leid uit de grafiek de waarde van R_{DS} af in het lineaire gebied door gebruik te maken van het functievoorschrift van de trendlijn. Verklaar je werkwijze in je verslag.

Je merkt dat de controleerbaarheid van R_{DS} bij JFET's behoorlijk lineair verloopt.

4.6 Toepassing 1: automatische ventilatie

In de meeste schakelingen die je tot nu toe bent tegengekomen, stonden waarden voor weerstanden en typenummers voor diodes of FET's vermeld. Deze waarden en typenummers zijn uiteraard niet willekeurig, maar zo gekozen om welbepaalde redenen. In de vorige schakelingen, die demonstratiedoeleinden hebben, zijn de waarden zodanig gekozen dat de te demonstreren effecten worden gemaximaliseerd, terwijl allerlei interferentie wordt geminimaliseerd. Sommige waarden kunnen exact berekend worden.

Voorbeeld: bekijk de schakeling in figuur 4.4 aandachtig. Er werd reeds vermeld dat weerstand R1 de stroom begrenst als beide MOSFET's gelijktijdig in geleiding zijn. Hoe werd de waarde van 10Ω gekozen? Het antwoord op deze vraag is te vinden in de datasheets van de BS250 en 2N7000. De maximale stroom door deze MOSFET's is 180 mA resp. 200 mA. De gevoeligste component is dus de BS250, waarbij $I_D \leq 180\text{ mA}$ om beschadiging te voorkomen. Wat is de maximale stroom die er loopt als beide MOSFET's dan in geleiding zijn? De totale weerstand is de som van de $R_{DS(ON)}$'s van beide MOSFET's, resp. 14Ω en 1.2Ω . De maximale stroom $I_D = \frac{3.3\text{ V}}{14\Omega + 1.2\Omega} = 217\text{ mA}$. Dit is dus nét te hoog. We moeten dus een serieweerstand R_s toevoegen om de stroom te begrenzen, en die kunnen we bepalen door de vergelijking op te lossen naar R_s . We houden hierbij rekening met een 25 % veiligheidsfactor op I_D door de MOSFETs:

$$0.18\text{ A} \cdot (1 - 0.25) = \frac{3.3\text{ V}}{14\Omega + 1.2\Omega + R_s} \Leftrightarrow R_s \approx 9.2\Omega$$

De dichtstbijzijnde hogere standaardwaarde is 10Ω .

Voor andere waarden is exacte berekening niet evident omdat ze afhangt van een groot aantal factoren die soms zelfs niet gekend zijn. Voorbeelden zijn typisch pull-up en pull-down weerstanden.

Voorbeeld: de gate van elke FET moet naar een gekende potentiaal getrokken worden om te verhinderen dat opgebouwde statische lading in de gate de FET onverwacht in geleiding brengt. Hiervoor

wordt typisch een grote weerstand toegepast, ofwel naar grond (pull-down-weerstand) of naar de voedingsrail (pull-up-weerstand). De grootte van de weerstand hangt af van factoren zoals de capaciteit tussen de gate en het kanaal, de impedantie van de drive schakeling, en zelfs van de vloerbekleding die statische elektriciteit kan genereren! Het is dus quasi onmogelijk om ene pull-up of pull-down-weerstand exact te berekenen. In het voorbeeld van de schakeling in figuur 4.4 zou elke weerstand tussen 4.7 k Ω en 47 k Ω wel volstaan. De waarde van 39 k Ω is dus eerder arbitrair gekozen.

Nu is het aan jou om zelf een schakeling te dimensioneren, en daarbij al de kennis die je tot nu toe hebt opgebouwd, aan te wenden!

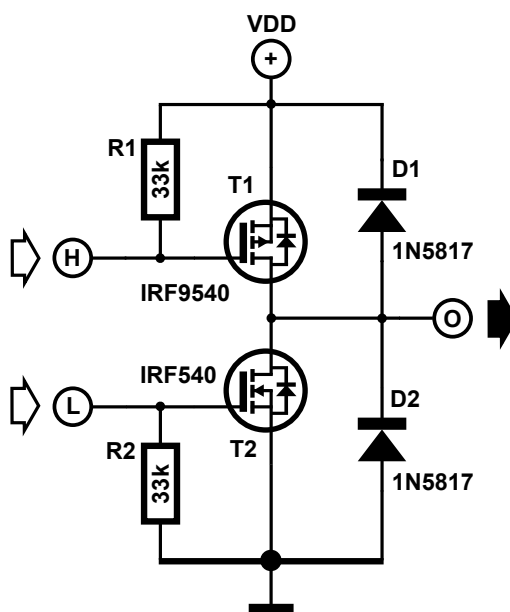
Experiment: Ontwerp zelf een schakeling die de temperatuur meet, en als deze temperatuur te hoog wordt, een ventilator activeert. De ventilator kan een standaardtype uit pc's zijn, zoals die typisch gebruikt worden om de power supply of processor te koelen. Om deze ventilator aan te sturen gebruik je uiteraard een MOSFET.

De temperatuur kan je “meten” met behulp van een temperatuurgevoelige weerstand. Er zijn 2 soorten, bij de ene (PTC genaamd) neemt de weerstand toe met de temperatuur, bij de andere (NTC) neemt de weerstand af met de temperatuur. Je kan NTC's vinden in de voorraadbakjes.

Denk vooraleer je begint te bouwen op breadboard goed na over je schakeling. Maak een schets op een blad papier en dimensioneer alle waarden aan de hand van berekeningen die je uiteraard ook in je verslag noteert. Motiveer je componentkeuze, en beschrijf de werking van je schakeling. Je kan de NTC opwarmen met je vingers en weer afkoelen met *freeze spray*.

4.7 Toepassing 2: half bridges

In figuur 4.4 werd een serieschakeling van een P-MOSFET en een N-MOSFET geïntroduceerd als inverter. Doordat beide MOSFET's afwisselend in geleiding komen en hun gates aan elkaar hangen, kan deze schakeling ofwel dienst doen als buffer ofwel als inverter, afhankelijk van welk type MOSFET waar staat.

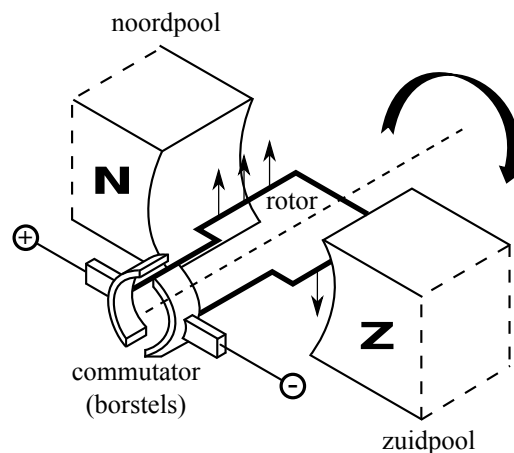


Figuur 4.6: Een half bridge met een IRF9540 P-MOSFET aan de “high side” en een IRF540 N-MOSFET aan de “low side”.

Beschouw een variant op deze schakeling waarbij de gates van elkaar losgekoppeld worden. Zowel de gate van de P-MOSFET als die van de N-MOSFET wordt met een pullup respectievelijk pulldown-

weerstand naar een gekend potentiaal getrokken, zoals in figuur 4.6. Als de P-MOSFET aan de “bovenkant” (*eng. high side*) van de schakeling in geleiding wordt gebracht, dan wordt de uitgang met de voedingsspanning verbonden. Wordt daarentegen de N-MOSFET aan de “onderkant” (*eng. low side*) in geleiding gebracht, dan wordt de uitgang aan de grond gelegd. Als geen van beide MOSFET's in geleiding wordt gestuurd, dan wordt de uitgang met geen enkel potentiaal verbonden. Dit is een derde staat (*eng. tri-state*) waarin de schijnbare uitgangsweerstand zeer hoog is, men zegt dat de uitgang *hoog-impedant* is. Uiteraard mogen beide MOSFET's nooit gelijktijdig in geleiding worden gebracht. In dat geval zou de voedingsspanning namelijk kortgesloten worden met de grond, waardoor een zeer hoge stroom door de MOSFET's zal vloeien, die daar beslist niet tegen kunnen! Zulke kortsluitingen (*eng. dead shorts*) dienen dus ten alle tijde vermeden te worden.

Omdat de schakeling fungeert als 2 digitale schakelaars waarmee de uitgang hoog, laag of uitgeschakeld kan worden, leent ze zich uitstekend voor het schakelen van belastingen (*eng. loads*), meer bepaald het sturen van *elektrische motors*.



Figuur 4.7: Werkingsprincipe van een DC-motor: een elektromagnetische rotor met wisselende velden in een stator met permanente magneten.

Elektrische motors maken gebruik van de Wet van Lorentz om een elektrische stroom I om te zetten in een kracht $\vec{F}$ met behulp van een extern magnetisch veld $\vec{B}$ volgens $\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$. In het eenvoudigste type elektrische motor, een DC-motor die gebruik maakt van gelijkstroom, wordt de stroom door een geleider in een constant magnetisch veld gestuurd. De geleider is gewikkeld op een draaibare rotor die haaks staat op het constante magnetisch veld. Op de geleider zal dus een kracht uitgeoefend worden, die een moment genereert om de as van de rotor, zoals weergegeven in figuur 4.7. Daardoor roteert de rotor volgens de draairichting aangegeven door het vectorieel product. Eens de rotor zodanig gedraaid is dat beide vectorvelden dezelfde zin hebben, dan is de resulterende kracht 0. Echter, DC-motors maken gebruik van een commutator met borstels (*eng. brushes*) die op dat moment de polariteit van de stroom omkeren, waardoor de kracht weer toeneemt, en de rotor verder draait. In het tweede jaar wordt dieper ingegaan op het werkingsprincipe van DC-motors.

Uit de Wet van Lorentz volgt dat de rotatie-richting afhankelijk is van de stroomzin door de geleider. Zolang deze stroomzin constant is, zal de motor in dezelfde richting blijven draaien. Om de draairichting van de motor om te keren, moet de stroomzin omgekeerd worden, en dus ook de polariteit van de externe spanning die wordt aangelegd om die stroom te laten lopen. Beide contacten van de motor moeten bijgevolg zowel met de voedingsspanning VDD als met de grond kunnen verbonden worden. De MOSFET-schakeling van figuur 4.6 is geschikt om die taak te vervullen.

Experiment: Schets de volledige schakeling, en geef aan welke MOSFET(s) in geleiding moet(en) gebracht worden om een DC-motor in wijzerzin en in tegenwijzerzin te laten draaien. Geef ook aan welke spanningen op de respectievelijke gates moeten gezet worden om de MOSFET's in of uit ge-

leiding te brengen, rekening houdend met de tegengestelde spanningspolarisaties van N-MOSFET's en P-MOSFET's. Verifiëer je logica experimenteel met behulp van een kleine DC-motor, die je o.a. in het fablab kan vinden. Met een stuk plakband rond de as van de motor kan je de draairichting gemakkelijk visualiseren.

Hoeveel verschillende inputs heeft je schakeling nodig om de motor in beide richtingen te laten draaien? Hoe kan je de schakeling aanpassen zodanig dat je minder inputs nodig hebt? Schets je voorgestelde oplossing in je verslag en test ze uit.

Wat is de functie van de diodes in deze schakeling?

Met wat verbeelding lijkt de schakeling op papier op een hoofdletter “H”, waarbij de motor de brug vormt tussen beide verticale streepjes van de “H”. De schakeling die je hebt gebouwd wordt daarom ook wel een H-brug (*eng. H-bridge*) genoemd. De helft van zo'n brug, zoals in figuur 4.6 weergegeven, wordt dan een halfbrug (*eng. half bridge*) genoemd en vormt de basis voor zowat alle hedendaagse motorsturingen. Je kan er zowel DC-motors (het motortype in speelgoedtreintjes), stappenmotors (gebruikt in 3D-printers of lasercutters) en brushless motors (die quadcopters en drones aandrijven) mee aansturen. In het tweede jaar zal je in het Ontwerpproject uitgebreid kennis maken met de voor- en nadelen van deze motortypes.

5

Bipolaire junctietransistors

“No matter how great the talent or efforts, some things just take time.”

Warren Buffett

5.1 Inleiding

Tijdens de voorbije 2 practica heb je uitvoerig kennis gemaakt met de PN-junctie, de combinatie van een positief en negatief halfgeleiderlaagje. Zo'n junctie kan als diode gebruikt worden door aan beide laagjes een aansluiting te solderen, en als veld-effecttransistor door het ene laagje te gebruiken als kanaal en het andere als *poort* waarmee dit kanaal kan open of gesloten worden. MOSFET's en JFET's bestaan in essentie dus net zoals een diode uit 2 halfgeleiderlaagjes, die weliswaar op een andere manier gebruikt worden.

Als een stapel (*eng. stack*) van 2 laagjes bijzondere elektrische eigenschappen blijkt te hebben, dan werpt dit meteen de vraag op welke eigenschappen stapels van 3 of meer laagjes zullen hebben, en belangrijker, welke interessante toepassingen ervoor kunnen bedacht worden in elektronische schakelingen! Door 3 alternerende laagjes op te stapelen wordt een *bipolaire junctietransistor* verkregen.

Zoals je wellicht kunt vermoeden bestaan er ook stacks met 4 laagjes (thyristors), 5 laagjes (triacs) en zelfs driedimensionale stacks die bestaan uit serie- en parallelschakelingen van stacks! Hoewel deze stacks ook zeer interessante elektronische toepassingen hebben, is hun gedrag veel moeilijker om te beschrijven. Stacks met meer dan 3 laagjes vallen om die reden buiten het bestek van deze syllabus. Later in je opleiding komen we er echter uitgebreid op terug bij de bespreking van vermogenselektronica.

5.2 Doel van het practicum

In dit practicum zal je de voornaamste parameters van de meest voorkomende types bipolaire junctietransistors leren kennen, en hun karakteristieken uitmeten in eenvoudige proefopstellingen. Je bestudeert de verschillende modi waarin bipolaire junctietransistors kunnen gebruikt worden en observeert hun gedrag als stroomversterkers.

5.3 Herhaling: de bipolaire junctietransistor

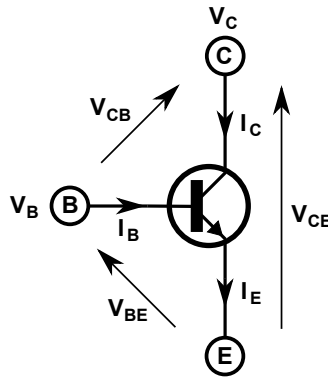
Wanneer 3 laagjes halfgeleidermateriaal dat ofwel positief ofwel negatief gedopeerd is (P resp. N) met elkaar gecombineerd worden, dan zijn er 2 mogelijkheden:

- ofwel een laagje P -halfgeleider dat gesandwiched wordt tussen 2 laagjes N -halfgeleider;
- ofwel een laagje N -halfgeleider dat gesandwiched wordt tussen 2 laagjes P -halfgeleider.

Door deze bijzondere constructie ontstaat het zogenaamde *transistoreffect*, waar het komende practicum om draait. Afhankelijk van de combinatie van laagjes bestaan er dus 2 types transistors, NPN-transistors en PNP-transistors.

5.3.1 Terminologie

Fysisch wordt elk halfgeleiderlaagje van de transistor naar buiten gebracht via een afzonderlijke pen, en bijgevolg heeft een transistor 3 pennen. Deze heten respectievelijk *basis* (eng. *base*), *collector* en *emitter*. De basis fungeert als sturingang waarmee het gedrag van de junctieovergang tussen collector en emitter kan geregeld worden.



Figuur 5.1: Een NPN-transistor met aanduiding van de basis (B), collector (C) en emitter (E), met bijhorende spanningen en stromen.

De spanningen tussen de 3 pennen onderling bepaalt grotendeels de werking van de transistor, zoals aangegeven in figuur 5.1. De diodeovergang tussen basis en emitter moet in geleiding gebracht worden, en de spanning tussen basis en emitter (V_{BE}) moet dus hoger zijn dan de drempelspanning van de basis-emitterdiode ($V_{BE} \geq 0.6 \text{ V}$). Als er tussen collector en emitter voldoende spanning aanwezig is (V_{CE}) dan bestaat er een lineair verband tussen collectorstroom I_C en basisstroom I_B via de uitdrukking

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (5.1)$$

Figuur 5.1 geeft een overzicht van de spanningen en stromen waarmee gerekend wordt in een typische transistorschakeling. Bij conventie worden gelijkspanningen- en stromen aangeduid met een hoofdletter (V en I) en wisselspanningen- en stromen met een kleine letter (v en i). Zo verwijst i_B naar een wisselstroom in de basis, en V_E naar een gelijkspanning op de emitter.

5.3.2 Kenmerkende parameters

Gelukkig zijn niet alle parameters die in datasheets beschreven staan even noodzakelijk om aan de slag te kunnen. Praktisch zijn er maar een handvol relevante parameters die je dagelijks nodig hebt bij het uitrekenen of ontwerpen van schakelingen met bipolaire junctietransistors. De andere parameters zal je enkel nodig hebben als je transistors gebruikt in erg ongewone schakelingen.

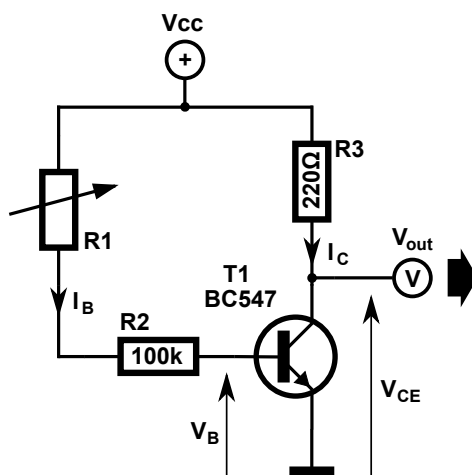
De vier belangrijkste parameters zijn

- de maximale collectorstroom I_C ;
- de maximale collector-emitterspanning V_{CEO} ;
- de maximale collector-basisspanning V_{CBO} ;
- de stroomversterkingsfactor β (soms ook h_{FE} genoemd).

Zoek nu zelf de waarden van deze parameters op in de datasheet van de BC547 en noteer ze in je verslag.

5.4 Stroomversterkingsfactor

De parameter β van een transistor geeft de stroomversterkingsfactor aan. Je weet uit de theorie dat per definitie $I_C = \beta I_B$. Bekijk de schakeling in figuur 5.2 en veronderstel een transistor met $\beta = 250$, een gangbare waarde voor kleine signaaltransistors. Welk gedrag verwacht je?



Figuur 5.2: Transistor geschakeld als lineaire stroomversterker.

Experiment: Bouw de schakeling op een breadboard, leg een voedingsspanning tussen 10 V en 15 V aan, en injecteer via de basisweerstand R1 en R2 een basisstroom I_B van $25 \mu\text{A} \pm 50\%$ in de transistor. Controleer deze stroom met een amperemeter. Meet vervolgens de voedingsspanning V_{cc} en de collectorspanning V_{out} van de transistor, die in dit geval ook overeenkomt met V_{CE} . Maak gebruik van de Wet van Ohm om hieruit de collectorstroom I_C te berekenen. Als je weet dat $I_C = \beta I_B$ en dus $\beta = \frac{I_C}{I_B}$, wat is dan de stroomversterkingsfactor van deze transistor in jouw schakeling? Vermeld alle berekeningen in je verslag.

5.5 Transistormodi

Bekijk opnieuw de schakeling in figuur 5.2 en veronderstel dat er een basisstroom van 3 mA wordt geïnjecteerd. Zelfs als de transistor een stroomversterkingsfactor $\beta = 100$ zou hebben, wat aan de lage kant is voor een signaaltransistor, dan zou de verwachte bijhorende collectorstroom $I_C = 300 \text{ mA}$ bedragen. Zelfs als CE-junctie van de transistor een nulimpedantie zou bezitten, dan nog blijft de Wet van Ohm geldig voor R3. De maximale stroom in deze tak bedraagt dus $I_C = \frac{V_{cc}}{R3} = \frac{15 \text{ V}}{220 \Omega} = 68 \text{ mA}$.

Je merkt dus dat er veel situaties denkbaar zijn waarin niet aan het verband $I_C = \beta I_B$ kan voldaan worden. Wordt er wel aan voldaan, dan vormt β het lineaire verband tussen I_C en I_B , en spreekt men van het *lineaire gebied* van de transistor. In deze modus fungeert de transistor als een *stroomversterker* (eng. *current amplifier*).

5.5.1 Versterker

Als de transistor in zijn lineaire gebied opereert en een aangelegde basisstroom versterkt, dan spreekt men van een *transistorversterker*. De audioversterkers in mp3-spelers, tv's en dergelijke zijn op deze wijze opgebouwd met transistors. Met behulp van de schakeling in 5.2 kan je de BC547 transistor gemakkelijk in zijn lineaire gebied sturen.

Experiment: Pas de schakeling indien nodig aan zodanig dat je de basisstroom kan regelen tussen $5\text{ }\mu\text{A}$ en $100\text{ }\mu\text{A}$, en dat je bovendien ook de collector-emitterspanning V_{CE} kan regelen **onafhankelijk** van I_B . Denk eraan de stroombegrenzing van de voeding in te stellen! Stel de basisstroom I_B in op $5\text{ }\mu\text{A}$ en hou deze constant. Regel V_{CE} in een bereik van 0 V tot ca. 10 V en meet telkens de bijhorende collectorstroom I_C . Mogelijk zal je I_B licht moeten bijregelen om een constante waarde aan te houden. Plot nu de $[V_{CE}; I_C]$ koppels in een grafiek met V_{CE} op de x-as en I_C op de y-as.

Experiment: Herhaal het experiment voor $I_B = 25\text{ }\mu\text{A}$ en $I_B = 100\text{ }\mu\text{A}$, en plot de bijhorende koppels in dezelfde grafiek zodat je 3 curves bekomt. Welke tendens bemerk je? Kan je het lineaire gebied van de transistor identificeren? Doe indien nodig bijkomende metingen met andere waarden voor I_B , of voer meer metingen uit in het krommende gebied van de curves. Leid uit het lineaire gebied van de curves grafisch de versterkingsfactor van de transistor af. Pro tip: beperk de trendlijn tot het lineaire deel van de curve.

5.5.2 Schakelaar

Buiten hun lineaire gebied zijn transistors niet direct bruikbaar als versterker omdat dit zal leiden tot distorsie (= vervorming) van het signaal. In audioversterkers zou je bijvoorbeeld meteen waarnemen dat er iets “mis” is met de muziekkwaliteit omdat de klanken vervormd worden. De transistor kan dan wel gebruikt worden als elektronische schakelaar (*eng. electronic switch*).

Buiten het lineaire gebied zijn er 2 toestanden mogelijk:

- **saturatie:**

In deze toestand heeft een verhoging van I_B geen proportionele verhoging van I_C tot gevolg doordat V_{CE} een minimale waarde heeft bereikt en niet verder kan dalen. De V_{CE} waarbij dit gebeurt heet de collector-emitter saturatiespanning en wordt in datasheets aangeduid met $V_{CE(sat)}$. Deze toestand kan verholpen worden door de voedingsspanning te verhogen of R_C te verlagen.

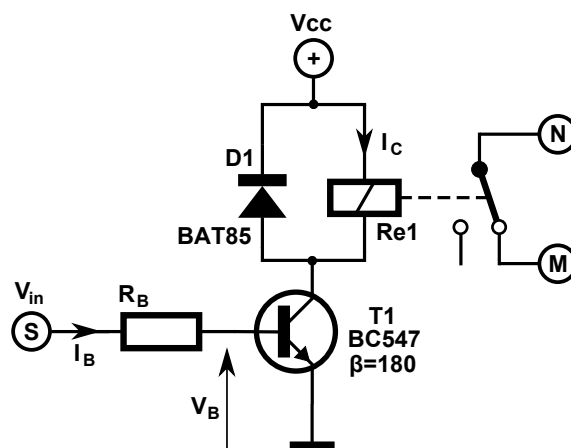
- **cut-off:**

In deze toestand wordt de drempelspanning van de transistor niet bereikt ($V_{BE} < 0.6\text{ V}$) en geleidt de transistor nauwelijks of niet. Deze toestand kan verholpen worden door V_{BE} te verhogen.

Als de transistor in cut-off wordt gestuurd dan is de weerstand tussen collector en emitter erg hoog, omgekeerd wordt de weerstand in saturatie erg laag. Dit zijn precies de eigenschappen van een goede schakelaar. Door een transistor van cut-off naar saturatie te sturen en omgekeerd, kan een belasting in de collectortak aan- of uitgeschakeld worden. Voorbeelden van belastingen zijn motoren, relais, verlichting, enzovoort.

5.5.2.1 Belastingen

Bouw de schakeling in figuur 5.3 op een breadboard. Deze schakeling maakt gebruik van een transistor om een relais te schakelen. Een relais bestaat uit een elektromagneet die een schakelaar bekrachtigt. Deze elektromagneet, in essentie een eenvoudige spoel die op een ferromagnetische kern werd gewikkeld, trekt de schakelaar toe door een magnetisch veld op te wekken. Er is dus geen direct elektrisch contact tussen de spoel en de schakelaar. Deze eigenschap, die *galvanische scheiding* wordt genoemd (*eng. galvanic isolation*), maakt een relais bijzonder interessant om kringen op verschillende spanningsniveaus te schakelen. Door een relais langs de spoelkant met 12 V te bekrachtigen kan je zo een belasting op 220 V netspanning aan- of afschakelen. Denk bijvoorbeeld aan verlichting, ventilators, computers,



Figuur 5.3: Transistor gebruikt als schakelaar om een relais te bekrachtigen.

microgolfovens enzovoort.

Dimensioneer nu zelf de basisweerstand R_B zodanig dat bij het aanleggen van eeningangsspanning $V_{in} = 5\text{ V}$ de transistor met zekerheid (= veiligheidsfactor 25 %) in saturatie wordt gestuurd. Veronderstel dat de transistor een stroomversterkingsfactor $\beta = 180$ heeft. Bovendien moet bij eeningangsspanning van 0 V de transistor in cut-off mode gestuurd worden. Vermeld de toegepaste formules en berekeningen in je verslag.

Experiment: Maak gebruik van de schakelaarkant van het relais om een belasting naar keuze, zoals een gloeilampje of LED-strip, aan te sturen. Let er hierbij op dat de maximale collectorstroom van de transistor niet overschreden wordt. Schets de volledige schakeling in je verslag. Is er een verband tussen de stroom door het gloeilampje en I_C ? Verklaar je antwoord.

5.5.2.2 Vrijlooppdiodes

Zoals je weet uit de lessen *Elektriciteit* kan de stroom door een spoel geen sprongen maken vermits $U_L = L \frac{dI}{dt}$ waarbij L de zelfinductiecoëfficiënt van de spoel is en de differentiaal de stroomverandering door de spoel voorstelt. Als de stroom door een spoel plots wordt uitgeschakeld, bijvoorbeeld door de stuurtransistor in cut-off te sturen, dan wordt $\frac{dI}{dt}$ zeer hoog en dus ook de spanning over de spoel vermits L een eindige waarde heeft. Als deze spanning V_{CEO} overschrijdt dan zal de transistor beschadigd of vernietigd worden.

In de praktijk zal zelfs een kleine spoel de V_{CEO} van de transistor reeds overschrijden, en daarom is het dus noodzakelijk om alle inductieve belastingen zoals spoelen, motors, relais, solenoïdes enzovoort te beschermen. Dit gebeurt door middel van een *vrijlooppdiode* (eng. *flyback diode*). Deze wordt zodanig in parallel met de spoel geplaatst dat de diode spert als de spoel stroom geleidt. Wanneer de stroom wordt uitgeschakeld, dan zal de spanning op de collector van de transistor fors toenemen. Op het moment dat $V_C > V_{cc} + V_D$ zal de diode in geleiding komen, en verhinderen dat V_C verder toeneemt. Op deze manier wordt de transistor dus beschermd doordat V_C nooit hoger dan $V_{cc} + V_D$ kan stijgen (V_D is de drempelspanning van de geleidende diode).

Om schade aan de transistor te voorkomen is het van belang dat de diode zo snel mogelijk in geleiding komt. Om deze reden wordt er vaak voor een Schottkydiode gekozen als vrijlooppdiode. Denk er dus steeds aan om Schottkydiodes te voorzien over elke inductieve last die plots kan uitgeschakeld worden.

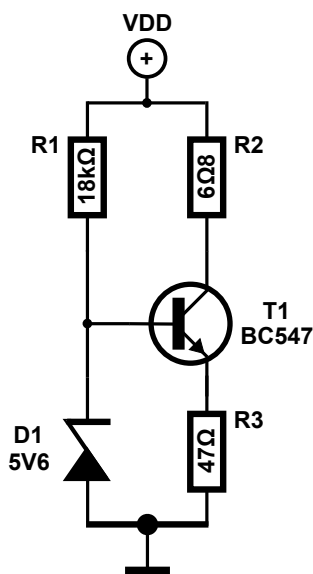
Merk op dat in het vorige practicum in de toepassing ook een inductieve last (een ventilator) werd

aangestuurd met een MOSFET. De reden dat daar geen vrijlooptiode werd toegepast, is omdat de diode in de MOSFET zelf deze taak vrij behoorlijk vervult. Een ventilator is immers geen bijzonder zware last. Voor ventilators die groter zijn dan gangbare pc-ventilators, of andere inductieve belastingen, volstaat de ingebouwde diode van de MOSFET echter niet meer en is het ook daar noodzakelijk om een vrijlooptiode toe te voegen.

5.6 Toepassing: stroombronnen

Tot nu toe heb je in zowat alle schakelingen gebruik gemaakt van *spanningsbronnen* omdat die het gemakkelijkst te gebruiken zijn. Alle reële bronnen zoals batterijen zijn immers ook spanningsbronnen. De enige uitzondering op deze regel is zonnepanelen, die in feite stroombronnen zijn. Nochtans hebben stroombronnen ook toepassingen, waar je de stroom door een bepaalde tak in je schakeling wil constant houden bijvoorbeeld. Onder andere LED's dienen gestuurd te worden met een constante stroom, want door hun diode-eigenschappen is het zeer moeilijk om de lichtintensiteit met een spanningsbron te regelen. Voor deze toepassingen is het heel eenvoudig om met een bipolaire junctietransistor en een handvol passieve componenten een stroombron te bouwen.

De schakeling in figuur 5.4 is een voorbeeld van een stroombron opgebouwd rond een bipolaire junctietransistor. Reken de collectorstroom van de transistor uit voor de waarden in het schema. Ga het niet te ver zoeken: je hoeft enkel de Wet van Ohm toe te passen. Denk eraan dat bij een geleidende transistor $V_{BE} \approx 0.6 \text{ V}$.



Figuur 5.4: Bipolaire junctietransistor als constante stroombron.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 5.4 op een breadboard en verifieer experimenteel de stroom die je berekend hebt. Hoeveel wijkt die af van je berekening? Welke verklaringen kan je hiervoor bedenken?

Experiment: Draai de voedingsspanning omhoog en controleer de collectorstroom. Wat merk je op? Let erop dat je de maximale V_{CE} van de transistor niet overschrijdt! Draai de voedingsspanning vervolgens naar beneden. Bij welke spanning stopt de stroombron met werken? Waarom?

Om een LED te voeden is deze geïmproviseerde stroombron duidelijk veel te hoog ingesteld! Een LED'je vergt immers een stroom tussen ca. 1 mA en 10 mA, afhankelijk van het type.

Experiment: Pas de schakeling zodanig aan dat de stroombron wordt bijgesteld tot een stroom van $5\text{ mA} \pm 3\text{ mA}$. Noteer de berekening in je verslag, en verifieer de stroom met een multimeter vooraleer je een LED'je met een kleur naar keuze opneemt in de collectortak. Controleer dat je stroombron constant blijft door de voedingsspanning weer hoger te draaien.

6

Oscillators

“The good thing about science is that it’s true whether or not you believe in it.”

Neil DeGrasse Tyson

6.1 Inleiding

Met weerstanden, diodes, transistors, potentiometers, LED’s, relays en MOSFET’s heb je in de voorbije practicasessies al kennis gemaakt met een groot aantal verschillende elektronische componenten. Tot nu toe werd er vooral gefocussed op de bepaling van de karakteristieke parameters van deze componenten. Daarin wordt nu verandering gebracht.

Het volgende practicum begint met de introductie van de *condensator* (eng. *capacitor*) in elektronische schakelingen, en daarmee ook *tijdsafhankelijkheid* van spanningen en stromen. Vervolgens worden ze toegepast in de constructie van *oscillators*, een noodzakelijk onderdeel om van start te kunnen gaan met digitale elektronica in het volgende practicum.

6.2 Doel van het practicum

Je maakt kennis met verschillende types condensators, hun parameters en specifieke voor- en nadelen. Je gebruikt ze om RC-schakelingen op te bouwen en de RC-tijdsconstante, die je uit *Elektriciteit* kent als τ , experimenteel te bepalen. Vervolgens pas je deze tijdsafhankelijkheid toe om inschakelvertragingen te timen en een oscillator te construeren.

Daarnaast leer je gebruik maken van geïntegreerde schakelingen (IC’s) om complexe elektronische schakelingen te reduceren tot een veel kleiner aantal componenten. Je bouwt een astabiele multivibrator met behulp van een 555 timer IC en configureert de oscillatiefrequentie voor verschillende toepassingen.

6.3 Herhaling: de condensator

Net zoals weerstanden en diodes zijn ook condensators passieve componenten. Het zijn dipolen, wat betekent dat ze 2 pennen hebben om ze aan te sluiten. Condensators maken gebruik van een elektrisch veld tussen 2 parallelle geleiders om een elektrische lading (eng. *electric charge*) tijdelijk vast te houden. Hoe groter de lading die wordt vastgehouden, hoe groter het elektrisch veld wordt en dus ook hoe

hoger de spanning tussen de 2 geleiders oploopt.

Het verband tussen de lading Q in de condensator en de spanning V erover is gekend als de *capaciteit* (eng. *capacitance*) van de condensator, met symbool C (niet te verwarren met de eenheid van lading, de Coulomb, die hetzelfde symbool heeft). De eenheid van elektrische capaciteit is de *Farad*, afgekort met F. De spanning over de condensator is evenredig met de lading erin en omgekeerd evenredig met de capaciteit, dit levert het verband

$$V = \frac{Q}{C} \quad (6.1)$$

Omdat de eenheid van lading, de Coulomb, een erg grote eenheid is, moet de eenheid van capaciteit, de Farad, dus behoorlijk klein zijn om in het bereik van een werkbare spanning te komen. Gangbare condensators in elektronische toepassingen variëren tussen pF en μF . Occasioneel kom je enkele mF tegen, bijvoorbeeld in voedingsschakelingen, maar deze zijn fysisch behoorlijk groot en dus onpraktisch in micro-elektronica.

6.3.1 Types condensators

Er zijn weinig elektronische componenten die in zoveel verschillende vormen en maten bestaan als condensators. Ze zijn ruwweg onder te verdelen in 4 groepen:

- **filmcondensators, keramische condensators, papiercondensators**

De meest voorkomende groep condensators. Ze zijn niet gepolariseerd en hebben hoge werkspanningen, maar de capaciteit is vrij klein. Vanaf ca. 1 pF tot 10 μF .

- **elektrolytische condensators**

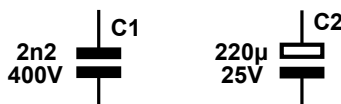
Gemakkelijk te herkennen aan de typerende cilindervormige behuizing. Deze condensators zijn gepolariseerd, maar bieden een goede trade-off tussen capaciteit en werkspanning. Vanaf 1 μF tot 10 mF. Ze worden aangeduid met de benaming *elco*, een afkorting van **elektrolytische condensator**.

- **tantaalcondensators**

Net zoals elco's zijn ze ook gepolariseerd, maar ze hebben een hogere capaciteit voor dezelfde afmetingen en een lagere parasitaire weerstand. Helaas ook veel duurder dan de andere types, en daardoor beperkt tot specifieke toepassingen. Vanaf 0.1 μF tot 100 μF .

- **dubbellaagscondensators**

Een aangepaste versie van elco's, met geoptimaliseerde elektrolytische eigenschappen. Ze hebben een lage werkspanning, doorgaans 2.7 V, maar bieden een erg hoge capaciteit. Vanaf 10 mF tot 100 F of meer. Net als elco's herkenbaar aan hun cilindervorm. Ze worden steeds goedkoper en dus populairder, en vinden toepassingen als vervanging van back-upbatterijen en in elektrische voertuigen.



Figuur 6.1: Een niet-gepolariseerde condensator C1 (links) en een gepolariseerd type C2 (rechts).

Nast de capaciteit is de *maximale werkspanning* een belangrijke parameter bij de keuze van condensators. Wordt de spanning over de condensator te hoog, dan treedt er intern een elektrische vonk op die het diëlectricum afbreekt. De condensator wordt daardoor vernield, en elektrolytische types hebben de neiging om te exploderen. De maximale werkspanning wordt daarom ook aangeduid als *doorslagspanning*. Een goed ontwerp blijft dus steeds ver uit de buurt van de maximale werkspanning. Een veiligheidsmarge van 20 % tot zelfs 50 % is gangbaar.

6.4 RC-schakelingen

Een bepaalde lading Q wordt binnen een bepaalde tijdspanne t getransporteerd als een elektrische stroom I , volgens de definitie

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (6.2)$$

Uit de vorige labo's weet je al dat stroom wordt gelimiteerd door de weerstand in een schakeling. Bijgevolg wordt dus ook de snelheid waarmee een bepaalde lading in een condensator kan opgeslagen worden, gelimiteerd door de totale weerstand die de stroom ondervindt. Zelfs als er extern geen expliciete weerstanden aanwezig zijn, is de totale weerstand in de schakeling niet 0: er blijft immers nog de weerstand van de draden en de inwendige parasitaire weerstand in de condensator over. De totale weerstand kan dus wel zeer klein worden, en het ladingstransport in of uit de condensator dus zeer groot, maar algemeen kan de lading in een condensator geen sprongen maken.

Dat de spanning over een condensator kan bepaald worden door er gedurende een bepaalde tijd een bepaalde hoeveelheid stroom in te sturen, is elektronisch gezien een zeer interessante eigenschap. Tot nu toe waren alle schakelingen die je hebt getest immers statisch: ze veranderden niet in de tijd. Met condensators komt daar nu verandering in, en verkrijgen schakelingen een *toestand* (eng. *state*) die afhankelijk is van de tijd. Vermits veel elektronische processen tijdsafhankelijk zijn, denk maar aan de knipperfrequentie van een LED'je of het alarm van je wekkerradio, is een methode om intervallen te kunnen *timen* dus ontzettend belangrijk.

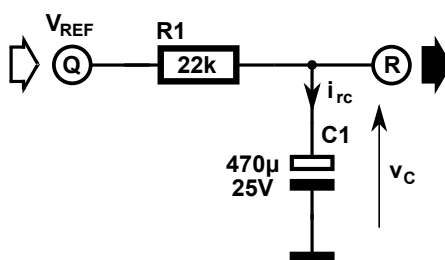
Via een RC-schakeling, een combinatie van één of meerdere condensators en één of meerdere weerstanden, kan een tijdsinterval gemeten worden aan de hand van de spanning over de condensator(s).

6.4.1 De tijdsconstante

De meest eenvoudige vorm van een RC-schakeling is een serieschakeling van een weerstand R en een condensator C , zoals in figuur 6.2 is weergegeven. Wordt een referentiespanning V_{REF} aangelegd op ingang Q, dan is de spanning over de lege condensator 0 vermits de lading 0 is. In dat geval is de laadstroom I gelijk aan $I = \frac{V_{REF}}{R}$. Echter, van zodra er stroom loopt, zal de lading in de condensator zich ook beginnen ophopen. De spanning over de condensator V_C is daardoor niet langer 0, en de laadstroom wordt dus gereduceerd tot $I = \frac{V_{REF} - V_C}{R}$. Hoe verder de condensator wordt opgeladen, hoe kleiner de laadstroom zal worden, en dus ook hoe trager de spanning over de condensator verder zal toenemen. Je weet uit de theorie dat de spanning V_C wijzigt in functie van de tijd volgens de uitdrukking

$$V_C(t) = V_{cc} \left(1 - e^{-t/RC} \right) \quad (6.3)$$

Je merkt dat de spanning wordt bepaald door de tijd t , de capaciteit van de condensator C en de totale serieweerstand R . De laadstroom i_{rc} wijzigt continu, en wordt daarom aangeduid met een kleine letter i om het verschil te maken met een constante stroom die wordt aangeduid met een hoofdletter I zoals je in de vorige practica gebruikte. Je kan het gedrag beschreven in vergelijking 6.3 ook zelf observeren in een eenvoudig experiment.



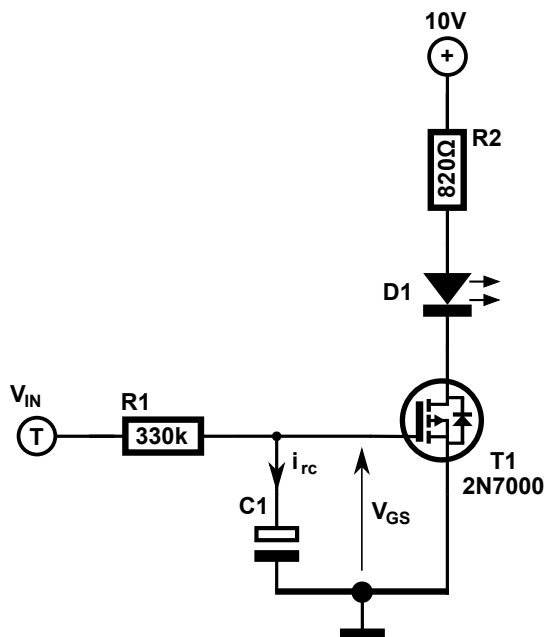
Figuur 6.2: Typische RC-schakeling bestaande uit een serieschakeling van een condensator en een weerstand.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 6.2 op een breadboard, en kies $R1 = 22\text{ k}\Omega$ en $C1 = 470\text{ }\mu\text{F}$. Sluit een referentiespanning van 5 V aan en noteer elke seconde de spanning over de condensator. Pro tip: je kan gebruik maken van een schakelaar om het laden van de condensator tijdelijk te pauzeren zodat je de tijd hebt om je metingen te noteren. Zet de spanning v_C uit in functie van de tijd t op een grafiek, en voeg een passende trendlijn toe. Bepaal de vergelijking van deze trendlijn, en leid er de tijdsconstante RC uit af. Komt dit overeen met de tijdsconstante in jouw schakeling?

Experiment: Vervang vervolgens de weerstand en condensator door $R1 = 390\text{ }\Omega$ en $C1 = 0.1\text{ F}$, en herhaal het experiment. Plot de curve in dezelfde grafiek, en voeg eveneens een passende trendlijn toe. Wat stel je vast? Let op de maximale werkspanning van de condensators als je de referentiespanning verhoogt!

6.4.2 Timing

Om praktisch te zijn in elektronische toepassingen, moet de spanning over de condensator elektronisch geëvalueerd kunnen worden. Op die manier kan dan een automatische actie plaatsvinden zoals het aansturen van een actuator. Zoals je in het vorige practicum hebt gemerkt, lenen MOSFET's zich uitstekend voor deze taak omdat ze spanningsgestuurd zijn. Van zodra de gate-sourcespanning een bepaalde waarde overschrijdt, de drempelspanning $V_{GS(th)}$, dan komt de MOSFET in geleiding.



Figuur 6.3: Gebruik van de laadtijd van een condensator en de gate-sourcespanning van een N-MOSFET om een elektronische time-out te creëren.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 6.3. Kies de waarde van de weerstand $R1$ tussen $100\text{ k}\Omega$ en $1\text{ M}\Omega$. Zoek de drempelspanning van $T1$ op in je verslag van het vorige practicum of in de datasheet van deze MOSFET, en bepaal via vergelijking 6.3 de waarde van de condensator zodanig dat de LED $D1$ oplicht na 30 s . Bereken ook de fout op deze waarde met behulp van de respectievelijke relatieve fouten op de condensator en weerstand. Test de schakeling uit om je berekening experimenteel te verifiëren. Maak ook gebruik van je bevindingen uit het vorige labo om de stroom door de LED te berekenen als deze oplicht (zoek hiervoor de $R_{DS(ON)}$ van deze MOSFET in zijn datasheet).

Experiment: Beredeneer de drainspanning V_D van $T1$ in geleidende toestand ($D1$ licht op) en sperrende toestand ($D1$ is gedoofd). Kan je de schakeling zodanig uitbreiden dat een tweede LED van een andere kleur oplicht gedurende de eerste 30 s en dooft wanneer na 30 s $D1$ oplicht? Schets je ontwerp in je verslag, en vermeld je redenering.

6.5 Oscillators

Hoewel de schakeling hierboven interessant is om met weinig componenten een tijdsafhankelijkheid toe te voegen aan je schakelingen, is er nog een probleem. De toestand in figuur 6.3 is namelijk onomkeerbaar: er loopt quasi geen stroom in de gate van T1, dus van zodra de condensator is opgeladen tot V_{REF} dan blijft de schakeling voor eeuwig in deze toestand. De time-out die gegenereerd wordt door het eenmalig opladen van C1, ook wel *inschakelvertraging* geheten, is dus eigenlijk een nuttig gebruikt overgangsverschijnsel. Om echt bruikbaar te zijn moet de schakeling echter verder uitgebreid worden zodanig dat C1 ook weer wordt ontladen, waarna het hele proces zich kan herhalen. Zulke schakeling heet een *multivibrator*. Er zijn talloze ontwerpen die telkens kunnen onderverdeeld worden in 3 categorieën:

- **astabiele multivibrators**

Deze multivibrators hebben 2 onstabiele (*eng. astable*) toestanden, en schakelen spontaan tussen de 2 toestanden. Ze worden ook *oscillators* genoemd.

- **monostabiele multivibrators**

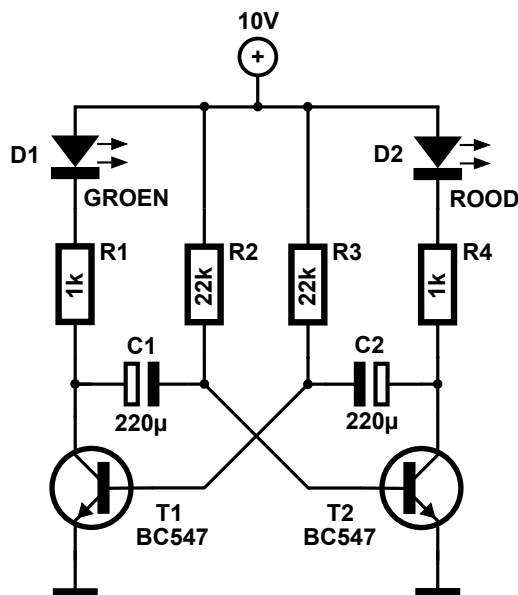
Deze multivibrators hebben slechts één stabiele toestand, waarnaar ze na een bepaalde tijd steeds terugvallen. Ze kunnen door een externe puls in de onstabiele toestand gebracht worden, met als doel een time-out (delay) te creëren.

- **bistabiele multivibrators**

Deze multivibrators hebben 2 stabiele toestanden, en kunnen met een externe puls van de ene toestand naar de andere gebracht worden. Dit gedrag komt overeen met een *flipflop*.

6.5.1 Astabiele multivibrators

Bekijk de schakeling in figuur 6.4. Deze bestaat uit 2 gewone transistors, 2 condensators en 4 weerstanden. De weerstanden en condensators vormen 2 RC-schakelingen, waarmee time-outs kunnen getimed worden.



Figuur 6.4: Oscillator opgebouwd rond 2 condensators en 2 transistors.

Je merkt dat de condensators elk langs de ene kant verbonden zijn met de collector van één van de transistors, en langs de andere kant met een pullupweerstand en de basis van de andere transistor. De combinaties C1/R2 langs de linkerzijde en C2/R3 langs de rechterzijde vormen 2 RC-schakelingen die het aan- en uitschakelen van de transistors T1 en T2 bepalen. Vermits de spanning over condensators

geen sprongen kan maken, en de laadstroom van de condensators wordt beperkt door de weerstanden, zitten er in de schakeling dus 2 tijdsconstanten: $R2C1$ en $R3C2$. De respectievelijke condensators zullen zich afwisselend opladen en ontladen, waardoor een oscillerend effect wordt verkregen.

Experiment: Bouw de schakeling op een breadboard en kies 2 LED's in verschillende kleuren voor D1 en D2, bijvoorbeeld groen en rood. Het exacte type transistor is niet van belang vermits de schakeling de transistors toch tussen saturatie en cut-off stuurt. Elk standaardtype (*eng. general purpose*) kan toegepast worden om multivibrators te ontwerpen, zolang je voor een bipolaire junctietransistor kiest. Je mag de voedingsspanning vrij kiezen tussen 5 V en 20 V maar denk eraan dat je de waarden van R1 en R4 moet aanpassen om de stroom door de LED's te beperken tot max. 20 mA.

De afleiding van de oscillatiefrequentie valt buiten het bestek van dit practicum, hiervoor wordt verwezen naar de theoriecursus. Voor elke helft van de schakeling kan de periode T_i uitgedrukt worden als

$$T_i = RC \ln(2) \quad (6.4)$$

Voor de linkerhelft van de schakeling wordt dit dus $T_1 = R2 \cdot C1 \cdot \ln(2)$ en voor de rechterhelft $T_2 = R3 \cdot C2 \cdot \ln(2)$. Reken de schakeling nu zodanig om dat de groene LED 3 keer zo lang oplicht als de rode LED, en controleer dit experimenteel.

Via vergelijking 6.4 kan op een eenvoudige manier de oscillatiefrequentie van de schakeling bepaald worden, vermits

$$f = \frac{1}{T} \quad (6.5)$$

Hierbij stelt f de oscillatiefrequentie voor en T de totale periode, die kan gevonden worden door de periode van de linkerhelft en de periode van de rechterhelft op te tellen. De oscillatiefrequentie van deze schakeling wordt dus

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\ln(2)(R2 \cdot C1 + R3 \cdot C2)} \quad (6.6)$$

Je merkt dus dat, als één van de condensators of weerstanden van waarde verandert, ook de oscillatiefrequentie van de schakeling verandert. De voornaamste toepassingen hiervoor zijn aanraakschermen van tablets, smartphones e.d. Doordat deze schermen zijn opgebouwd als elektrodes, zal aanraken een verhoging van de capaciteit tot gevolg hebben vermits je vinger ook een elektrode is (zie toepassing in het vorige practicum) en je dus een parallelle plaat condensator vormt. Deze verandert lokaal de oscillatiefrequentie van een interne multivibrator, en door deze frequentie te meten kan vervolgens achterhaald worden waar je het scherm hebt aangeraakt en zelfs hoe dicht je er met je vinger bij komt!

De alternatieve manier om de oscillatiefrequentie te laten veranderen door externe invloeden is gebruik te maken van een variabele weerstand zoals een potentiometer of resistieve sensor in plaats van een constante weerstand voor R2 en R3.

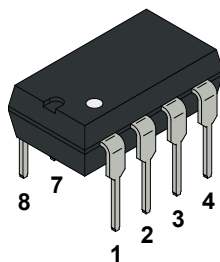
Experiment: Pas de schakeling in figuur 6.4 zodanig aan dat je R2 of R3 (of beide) vervangt door een lichtgevoelige weerstand (LDR, *eng. Light Dependent Resistor*). De weerstandswaarde van deze weerstanden verandert in functie van de belichting, en je kan er dus een lichtgevoelige oscillator mee maken. Test dit experimenteel, schets je schakeling in je verslag, en noteer je bevindingen.

6.5.2 Timers

Hoewel de astabiele multivibrator in figuur 6.4 een doeltreffende manier is om een oscillatie op te wekken, is het nogal onpraktisch om deze schakeling te integreren in grotere elektronische ontwerpen. Enerzijds bevat ze relatief veel componenten, en dus ook veel verbindingen tussen die componenten, en anderzijds heeft ze geen expliciete uitgang waar het oscillerend signaal naar buiten gebracht wordt.

Om dit probleem op te lossen, werd de schakeling in figuur 6.4 geoptimaliseerd en geïntegreerd in één enkele elektronische bouwsteen, de *timer*. Dit heet een *geïntegreerde schakeling* (IC, *eng. integrated circuit*). Je kan IC's herkennen aan hun typerende platte zwarte behuizing met een groot aantal

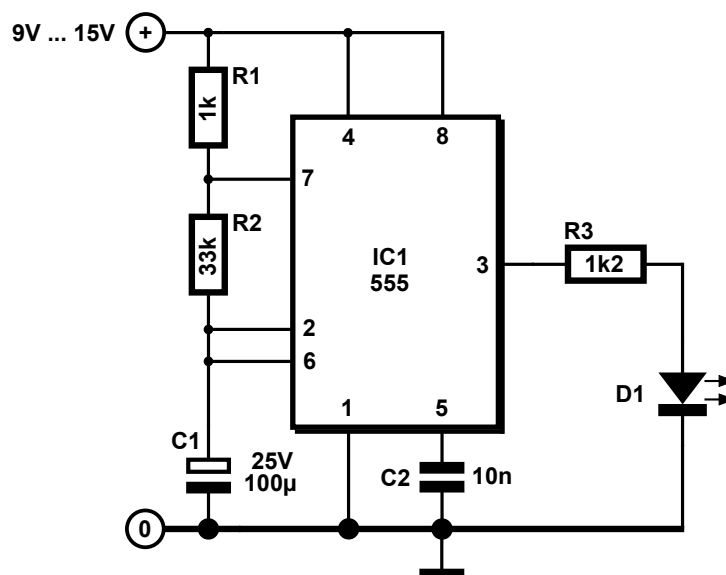
pennen dat naar buiten komt. Er zijn ontelbaar veel verschillende IC's die al evenveel verschillende elektronische functies implementeren. Slechts een kleine fractie van de IC's bevatten timers.



Figuur 6.5: De DIP-8 behuizing van een 555 timer IC. De inkeping geeft de voorzijde aan, de ronde markering wijst naar pen 1.

Afhankelijk van de complexiteit van de logica die in het IC zit, wordt het package (de “chip”) fysiek groter omdat er meer pennen nodig zijn om te interfaceren met de externe componenten in de schakeling. Het meest eenvoudige timer-IC draagt typenummer 555, en heeft 8 aansluitingen. Ze worden dus geleverd in een behuizing (eng. *package*) met 8 pennen, dat DIP-8 heet (zie figuur 6.5). Volgend jaar wordt in het vak *CAD* dieper ingegaan op de betekenis van DIP, en andere behuizingen voor IC's. Dit jaar werken we enkel met DIP-behuizingen omdat die gemakkelijk in een breadboard te pluggen zijn: de afstand tussen de pennen komt precies overeen met de afstand tussen de gaten van het breadboard.

Experiment: Bouw de oscillatorschakeling in figuur 6.6 op een breadboard. Plug het 555 IC zodanig in je breadboard dat geen van de pennen wordt kortgesloten met een andere pen.



Figuur 6.6: Een 555 timer IC geschakeld als astabiele multivibrator. $R1$, $R2$ en $C1$ bepalen de oscillatiefrequentie. Pen 3 is de digitale uitgang van de oscillator.

Bij het opbouwen van schakelingen met een IC, zoals in figuur 6.6, is het belangrijk om eerst de voedingspennen aan te sluiten, zodanig dat de interne logica gevoed wordt. Bij quasi alle IC's moeten de ingangsspanningen tussen de positieve en negatieve voedingsspanning liggen (meestal dus V_{cc} en grond). Als je vergeet de voeding van het IC aan te sluiten, en je legt een externe spanning aan op één van de ingangen, dan bestaat de kans dat het IC beschadigd wordt. Zoek in de datasheet van het 555 timer IC welke pinnen verantwoordelijk zijn voor de voeding, en noteer dit in je verslag.

Na de voedingsspanning ga je vervolgens verder met de aansluiting van de resterende componenten in de schakeling. Let op C1 en D1, die beiden gepolariseerd zijn, en dus via de juiste oriëntatie moeten aangesloten worden. Stel tot slot de voedingsspanning in tussen 9 V en 15 V, en observeer de schakeling.

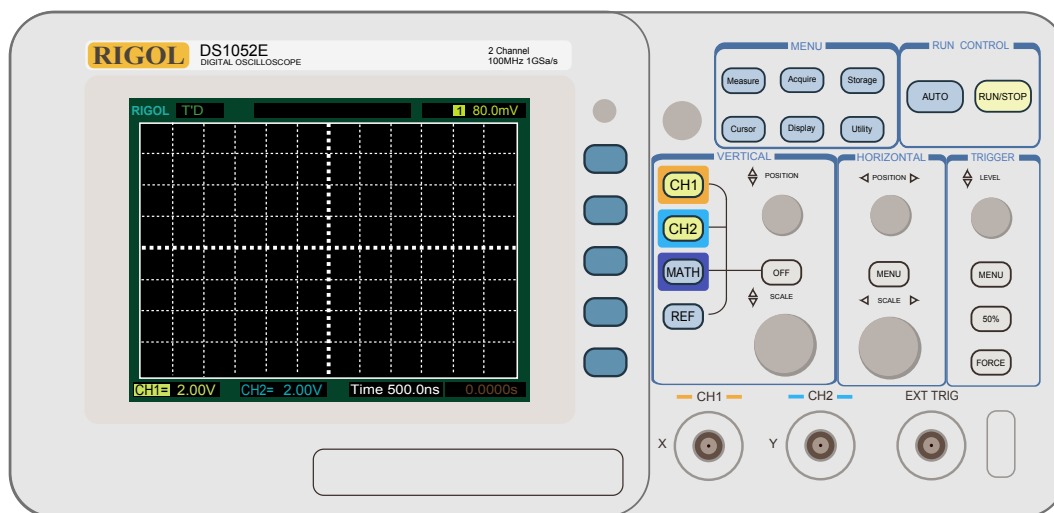
De oscillatiefrequentie is eenvoudig te berekenen via de formule

$$f = \frac{1}{\ln(2)(R1 + 2R2)C1} \quad (6.7)$$

Experiment: Reken deze frequentie uit met de weerstandswaarden en condensator zoals weergegeven in figuur 6.6. Doe een tiental metingen van de knipperfrequentie ($f = 1/T$) en bereken het gemiddelde en de mediaan om de frequentie nauwkeuriger te kunnen schatten in je schakeling. Hoeveel wijkt dit procentueel af van de berekende frequentie?

6.6 De oscilloscoop

Bij het bouwen van oscillatorschakelingen heb je gemerkt dat signalen die zo snel veranderen, niet meer met een gewone multimeter kunnen gemeten worden. Een multimeter heeft namelijk een relatief lage *refresh rate* waardoor het even duurt vooraleer wijzigingen aan de klemmen zichtbaar worden op het scherm. Een multimeter is daardoor zeer geschikt om gelijkspanningen- en stromen te meten, of zeer traag veranderende signalen. Om signalen die snel veranderen ($f \gg 1 \text{ Hz}$) te meten kan beter gebruik gemaakt worden van een *oscilloscoop* (eng. *oscilloscope*). Een oscilloscoop is een meetinstrument dat specifiek bedoeld is om snel veranderende periodieke signalen in de gaten te houden en weer te geven. Figuur 6.7 toont het bedieningspaneel van een Rigol DS1052E oscilloscoop. Dit is de standaardoscilloscoop die in het labo elektronica, in het labo elektriciteit en in het fablab wordt gebruikt.



Figuur 6.7: Bedieningspaneel van een Rigol DS1052E digitale oscilloscoop.

De meeste oscilloscopen zijn uitgerust met 2 kanalen (eng. *channels*) waardoor ze dus 2 verschillende signalen tegelijkertijd kunnen weergeven. Deze worden aangeduid als kanaal 1 (CH1) en kanaal 2 (CH2), resp. in het geel en blauw gemarkeerd op het bedieningspaneel. Elk kanaal heeft zijn eigen BNC-aansluiting waarop een probe, een speciaal hulpstuk voor oscilloscopen, kan aangesloten worden. Met een probe verbind je dan het gewenste signaal in je schakeling met de oscilloscoop.

Oscilloscopen zijn uitgerust met heel wat functies, maar je hoeft ze gelukkig (nog) niet allemaal te kennen. Een overzicht van de meest gebruikte functies en knoppen:

RUN/CONTROL: Voor beginners is de knop **AUTO** erg handig, want daarmee gaat de oscilloscoop zelf op zoek naar signalen en geeft ze zo optimaal mogelijk weer op het scherm. Met **RUN/STOP** kan

je een snel variërend signaal pauzeren.

MENU: Via **Measure** kan je parameters zoals de frequentie, periode en amplitude van een signaal meten. De resultaten worden op het scherm weergegeven. Met de functie **Cursor** kan je cursors plaatsen om manueel spanningen en stromen te meten in signalen op het scherm. De andere functies van MENU zijn niet zo belangrijk.

VERTICAL: Met de linkse knoppen **CH1** en **CH2** kan je kanalen aan- en uitschakelen. Met **MATH** kan je wiskundige bewerkingen uitvoeren op beide signalen, bv. ze bij elkaar optellen. Met de kleine draaiknop kan je het geselecteerde kanaal verticaal verschuiven op het scherm, met de grote draaiknop vergroot of verklein je het signaal. De indicators linksonderaan het scherm geven aan met welke spanning één blokje op het scherm overeenkomt.

HORIZONTAL: Met de kleine draaiknop verschuif je beide kanalen horizontaal op het scherm, met de grote kan je signalen uitrekken door de tijdsbasis aan te passen. Zo kan je signalen “breder” of “smaller” maken op het scherm. De witte tekst rechtsonderaan het scherm geeft aan met hoeveel tijd één blokje op het scherm overeenkomt.

TRIGGER: Hiermee kan je snel veranderende signalen stil zetten. De enige knop die je voorlopig hoeft te gebruiken is **50%** om het gewenste signaal stil te zetten op het scherm.

Een oscilloscoop kan spanningen tot ettelijke tientallen volts of zelfs honderden volts meten, dus het is quasi onmogelijk om de oscilloscoop te beschadigen door foutief gebruik. Als het signaal van het scherm verdwenen is en je het niet meer terugkrijgt, dan kan je altijd op **AUTO** drukken zodat de oscilloscoop zelf op zoek gaat naar signalen. Let echter op: als je een sinusoidaal signaal van precies 50 Hz te zien krijgt, met een zeer kleine amplitude, dan is de kans groot dat je ruis van het lichtnet aan het meten bent omdat je probe verkeerd is aangesloten.

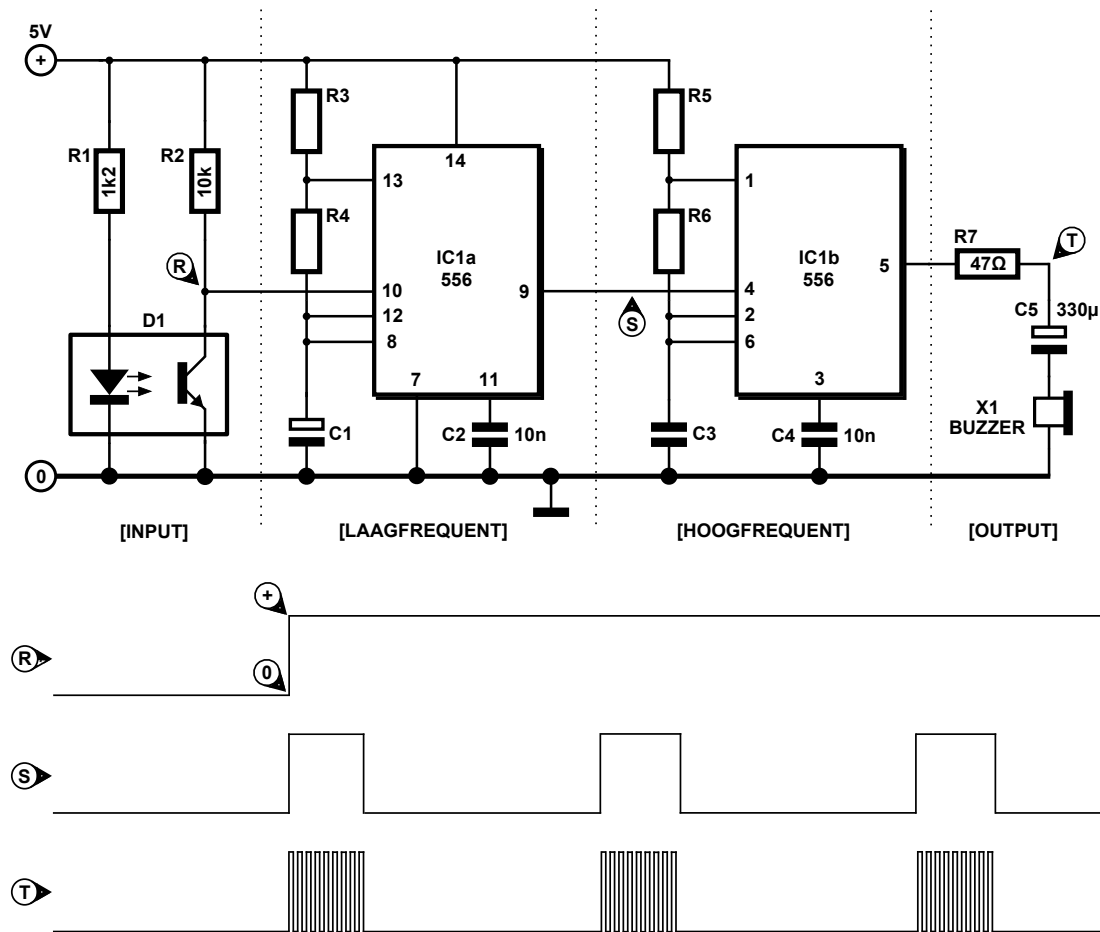
Net zoals multimeters vragen ook oscilloscopen wat oefening vooraleer je er vlot mee kan werken. Neem een oscilloscoop uit de kast als je er nog geen op je labotafel hebt staan, en sluit een probe aan. Verbind de probe met de referentieblokgolf die je rechtsonderaan het bedieningspaneel kan “aftappen” en druk op **AUTO**. Er zou een mooie 1 kHz blokgolf op het scherm moeten verschijnen. Je kan nu naar hartenlust experimenteren met de verschillende functies op de oscilloscoop, dus neem daar gerust even de tijd voor.

Als je de basis onder de knie hebt, sluit de oscilloscoop dan aan op je eigen oscillatorschakeling en tracht het signaal op het scherm te krijgen. Denk eraan dat je de grond van de oscilloscoop moet doorverbinden met de grond van je schakeling! Als je de frequentie van je oscillatorschakeling verandert, dan zal je de frequentie ook zien veranderen op het scherm. Via de functie **Measure** kan je de frequentie rechtstreeks aflezen.

6.7 Toepassing: inbraakalarm

Met een *buzzer* kan je een oscillerend elektronisch signaal omzetten naar een audiosignaal met dezelfde frequentie(s). Stuur je bijvoorbeeld een signaal met een frequentie van 440 Hz door de buzzer, dan weerklinkt een “la”-toon. Nu is het aan jou om een inbraakalarm te ontwerpen dat gebruik maakt van timers om een inbraak te detecteren via een lichtsluis, en vervolgens een alarm te laten afgaan.

Hiervoor heb je 2 timers nodig, één om de relatief hoogfrequente fluittoon te genereren en een tweede om deze enkele keren per seconde aan- en uit te schakelen om een alternerend geluid te produceren. De hoogfrequente toon moet tussen ca. 100 Hz en 5 kHz liggen en stuurt rechtstreeks de buzzer aan (signaal T in figuur 6.8). De laagfrequente pulsen moeten hoorbare intervallen creëren, bijvoorbeeld 2 pulsen per seconde = 2 Hz (signaal S in figuur 6.8). De hoogfrequente oscillator opgebouwd rond IC1b wordt aangeschakeld door zijn resetingang (pen 4) hoog te trekken via de uitgang (pen 9) van de laagfrequente oscillator rond IC1a. Zowel IC1a als IC1b zijn individuele 555 timers, die samen zijn ondergebracht in één IC, dat nummer 556 draagt. De 556 is een groter IC dan de 555 met 14 pennen in plaats van 8. Je vindt de volledige pinout van de 556 in zijn datasheet. Praktisch gezien zijn de twee 555's in de 556 volledig identiek, in figuur 6.8 mag je ze dus gewoon van plaats wisselen.



Figuur 6.8: Inbraakalarm opgebouwd met een 556 timer IC. Het triggersignaal wordt gevormd door een lichtsluis (input, R). Hiermee wordt een traag pulsend signaal opgewekt (S) dat gebruikt wordt om een snel pulsend signaal (T) te genereren, dat vervolgens een buzzer aanstuurt. De waveforms onderaan tonen de signalen op de verschillende knooppunten in de schakeling. Probeer ze eveneens zichtbaar te maken op je oscilloscoop!

Als “inbraaksensor” wordt er gebruik gemaakt van een lichtpoortje. Deze component bestaat net zoals de 556 uit 2 delen, in dit geval een infrarood (IR) LED en een fotodiode (een lichtgevoelige transistor). Wanneer de poort “vrij” is dan beschijnt de LED de fotodiode en is de weerstand van de fotodiode laag, zit er een obstakel tussen dan is de fotodiode donker en zijn weerstand hoog. In combinatie met R2 geeft dit een spanningsdelers die 2 toestanden kent: een “vrije” lichtpoort resulteert in een logisch “laag” signaal op ingang R, een obstakel zorgt ervoor dat R2 ingang R hoog trekt naar V_{cc} (logisch “hoog”). Doordat R verbonden is met de (actief lage) resetingang van IC1a zal het alarm afgaan van zodra er zich een obstakel in de lichtpoort bevindt.

Experiment: Bepaal met behulp van vergelijking 6.7 de weerstanden en condensators voor beide timers (resp. R3, R4 en C1 voor de laagfrequente oscillator en R5, R6 en C3 voor de hoogfrequente oscillator). Bouw de schakeling op een breadboard en sluit de buzzer aan. Bij afwezigheid van een buzzer kan je ook een (kleine) luidspreker gebruiken. Test het ontwerp met behulp van een platte schroevendraaier of stukje printplaat om de infraroodstraal in het lichtpoortje te onderbreken. Pas indien nodig de waarden van de weerstanden en condensators aan om snellere beeps en/of hogere beep tonen te genereren.

Experiment: Hoe moet je de schakeling aanpassen om een inbraakalarm in James Bond stijl te bouwen met een rode laser in plaats van een lichtpoortje? Test dit uit met behulp van een laserpointer (de labo-assistenten kunnen je er eentje ontlenden indien nodig).

7

Digitale logica

“There are 10 kinds of people in the world, those who understand binary and those who don't.”

anoniem

7.1 Inleiding

In de voorbije laboproeven heb je gemerkt dat analoge schakelingen vrij snel kunnen uitgroeien tot een groot aantal individuele componenten. Sommigen van deze componenten beïnvloeden elkaar, wat het moeilijk maakt om de werking van de schakeling te beredeneren of uit te rekenen. Nochtans is het in praktische schakelingen vaak mogelijk om het ontwerp onder te verdelen in subblokken, zoals ook het geval was in de schakeling van figuur 6.8: deze bestond uit een sensorgedeelte, een laagfrequente en een hoogfrequente oscillator, en tot slot een buzzer of luidspreker. De verbindingen tussen de subblokken onderling zijn beperkt tot telkens één enkel signaal. Dit signaal draagt bovendien ofwel een spanning die dicht bij V_{cc} ligt ofwel dicht bij grond. In essentie is het alarm uit figuur 6.8 dus een digitale schakeling die opgebouwd werd met uitsluitend analoge componenten.

7.2 Doel van het practicum

In dit labo vereenvoudigen we de subblokken analoge elektronica tot digitale logische bouwstenen, waarbij we de inhoud van deze blokken beschouwen als een *black box* en enkel geïnteresseerd zijn in de digitale ingangen en uitgangen (*eng. inputs and outputs*). Je maakt kennis met combinatorische schakelingen waar je vervolgens een klokgenerator aan koppelt om *synchrone schakelingen* (*eng. synchronous circuits*) te ontwerpen. Tot slot maak je gebruik van flipflops om de toestand (*eng. state*) van een schakeling te bewaren en Mealy-machines te ontwerpen.

7.3 Logische poorten

De meest elementaire digitale bouwstenen zijn logische poorten. Dit zijn elementen die in staat zijn een Booleaanse bewerking uit te voeren op één of meerdere digitale ingangssignalen. De eenvoudigste bewerking is de *inverter*, die een logisch signaal inverteert van hoog naar laag of laag naar hoog (resp. 0 naar 1 of 1 naar 0). Een inverter heeft dus één ingang en één uitgang. Bij 2 gecascadeerde inverters is de uitgang opnieuw gelijk aan de ingang, dit heet een *buffer*. Je hebt zelf al een inverter gebouwd met 2

discrete transistors in schakeling 4.4.

De voornaamste Booleaanse bewerkingen met meer dan 1 ingang zijn AND (uitgang hoog als alle ingangen hoog zijn), OR (uitgang hoog als ten minsten één van de ingangen hoog is) en XOR (uitgang hoog als de ingangen verschillend zijn). Combinaties van deze bewerkingen met inverters zijn ook mogelijk. Een inverter is dan meestal aan de uitgang geplaatst, en resulteert vervolgens in NAND, NOR enzovoort.

Praktisch kom je digitale logica steeds tegen in IC's, net zoals het geval was voor de 555 en 556 IC's uit het vorige hoofdstuk. Hoewel IC's met één logische poort bestaan, zijn de varianten met meerdere logische poorten in één fysieke behuizing (*eng. package*) veel couranter. Inverters worden bijvoorbeeld vaak in groepjes van 6 samengebracht, en er wordt dan naar gerefereerd als een *hex inverter* (waarbij *hex* duidt op 6). Een combinatie van 4 AND-poorten met elk 2 ingangen wordt dan *quad 2-input AND-poort* geheten, enzovoort. Er zijn ook IC's met combinaties van verschillende logische poorten en complexere structuren. Een korte lijst met de eenvoudigste IC's vind je, waar anders, op Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_7400_series_integrated_circuits. De IC's worden aangegeven door een prefix, 74, die aangeeft dat het om een onderdeel van de 74-reeks TTL-compatibele digitale IC's gaat. De laatste cijfers geven het volgnummer aan, te beginnen bij 0. De 7400 is bijvoorbeeld, volgens de Wikipedialijst, een *quad 2-input NAND gate* wat betekent dat er 4 NAND-poorten met elk 2 ingangen in het IC aanwezig zijn. Zoek op wat er in de IC's 7408, 7427 en 74408 zit en noteer dit in je verslag.

Zoals je bij de opbouw van de schakeling in figuur 6.8 hebt gemerkt, moeten IC's gevoed worden omdat ze actieve componenten zoals transistors en MOSFET's bevatten. Denk er dus steeds aan om je digitale IC's te voeden met een DC-spanning door ze met de juiste pennen te verbinden met de V_{cc} en grond in je schakeling. Hiervoor consulteer je best de datasheets van de respectievelijke IC's. In sommige schema's worden de voedingspennen niet getekend, maar je moet ze wel degelijk steeds aansluiten! De voedingspennen vermeerderen het aantal fysieke pennen van de IC's met 2. Een hex inverter IC heeft bijvoorbeeld 6 ingangen en 6 uitgangen, en ook nog een V_{cc} en grondconnectie. Daardoor heeft het IC in totaal 14 pennen, dit heet een DIP-14 package.

7.3.1 Digitale voeding

Logische poorten schakelen tussen 2 discrete signaalniveaus die overeenkomen met 0 V en V_{cc} . Om ervoor te zorgen dat alle logische IC's dezelfde spanningen als logisch '1' of logisch '0' zien, is het gangbaar hen allemaal te voeden met dezelfde spanning. Meer zelfs, de meeste logische IC's zoals bijvoorbeeld een 7401 of 4066 hebben een behoorlijk krap bereik van toegelaten voedingsspanningen. Voor een 7432 bijvoorbeeld geeft de fabrikant een aanbevolen spanningsbereik tussen 4.75 V en 5.25 V. Hier zit dus weinig speling op!

Let er bij de experimenten in dit hoofdstuk dus op dat je de voedingsspanning zo goed mogelijk op 5.0 V afregelt, en check dit ook met een multimeter doorheen het verloop van het practicum. **Een te ver afwijkende voedingsspanning zal ertoe leiden dat IC's defect geraken, waardoor je schakelingen niet meer werken.** En dit soort defecten is behoorlijk lastig op te sporen.

Zoals je in het tweede practicum hebt gemerkt zijn zenerdiodes een uitstekende manier om overspanningen te vermijden. Het is dus aanbevolen om een zenerdiode van 5.1 V over de voedingsrail te zetten om de spanning op maximaal 5.1 V te *clampen*. Denk er wel aan om de stroombegrenzing van de voeding in te stellen!

Een ander belangrijk aspect van digitale voedingen is hun stabiliteit (*eng. stability*). Wanneer digitale signaalniveaus veranderen loopt er kortstondig stroom in de schakeling (*eng. dynamic power*) waardoor de voedingsspanning zal inzakken. Dit kan ertoe leiden dat logische poorten in onvoorspelbare toestanden terecht komen (race condities) waardoor de schakeling zich anders gaat gedragen dan je verwacht (glitches). Dit wordt typisch opgelost door deze stroompieken op te vangen met condensators

die over de voedingsrail geplaatst worden. Voor de experimenten in dit practicum plaats je **minstens** 2 condensators van **minstens** 220 μF over de 5 V voedingsrail.

7.4 Synchrone schakelingen

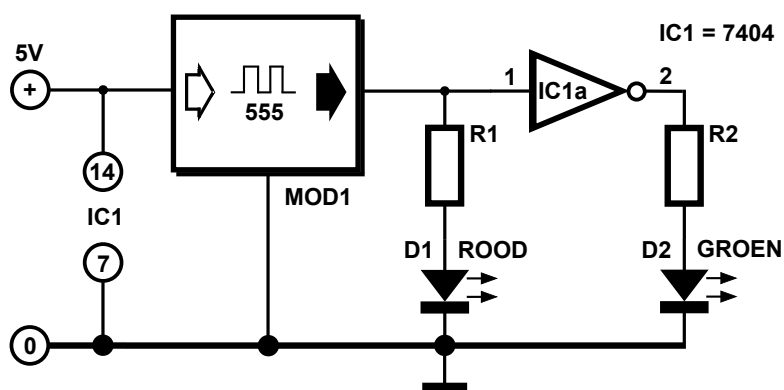
Combinaties van enkel combinatorische logica bieden niet zo veel mogelijkheden aangezien het systeem statisch werkt: zolang de ingangen niet veranderen, blijven ook de uitgangen constant. Wanneer er echter een kloksignaal wordt toegevoegd, zoals een blok golf afkomstig uit een oscillatorschakeling, dan kan de combinatorische logica zijn uitgangen veranderen in functie van de tijd. Schakelingen waarvan veranderingen van de uitgangen gesynchroniseerd zijn met pulsen van een kloksignaal heten bijgevolg *synchrone schakelingen* (*synchronous logic*). Signalen die niet gesynchroniseerd zijn met het kloksignaal, zoals bijvoorbeeld een knop die ingedrukt wordt door een gebruiker, heten dan *asynchrone signalen*.

7.4.1 Kloksignalen

In het vorige hoofdstuk heb je reeds een pulserend signaal opgewekt met behulp van een 555-timer IC, zoals weergegeven in figuur 6.6. Deze schakeling gaan we nu verder gebruiken als klokgenerator voor de synchrone schakelingen in dit hoofdstuk.

Experiment: Bouw de schakeling uit figuur 6.6 opnieuw op een breadboard en reken de weerstanden R1 en R2 en de condensator C1 zodanig uit dat je een uitgangsfrequentie tussen 1 Hz en 5 Hz uit komt. Om niet steeds de volledige schakeling te moeten hertekenen, wordt ze in dit hoofdstuk eveneens vereenvoudigd tot een *black box* zoals weergegeven in figuur 7.1. Deze “555-module” heeft een ingang, voorgesteld met de witte pijl, die overeen komt met de voedingsspanning. De uitgang, aangeduid met de zwarte pijl, levert het pulserende signaal dat aanwezig is op pin 3 van de 555-timer. De grond van de 555-schakeling wordt ook doorverbonden met de algemene grond. Je zal deze 555-klokgenerator nodig hebben bij alle experimenten in dit hoofdstuk, dus bouw hem compact op de rand van je breadboard zodat hij niet teveel plaats in beslag neemt.

Uit schakeling 6.6 weet je reeds dat een LED die aangelegd wordt op de uitgang van de 555-oscillator zal knipperen aan dezelfde frequentie. Als de uitgang van de 555-oscillator logisch hoog is dan zal er over de LED en zijn voorschakelweerstand een spanning staan die gelijk is aan de voedingsspanning, en licht de LED op. Als de uitgang daarentegen logisch laag is dan is de spanning over de LED quasi 0 en blijft hij gedoofd.



Figuur 7.1: De inverter als combinatorische logica.

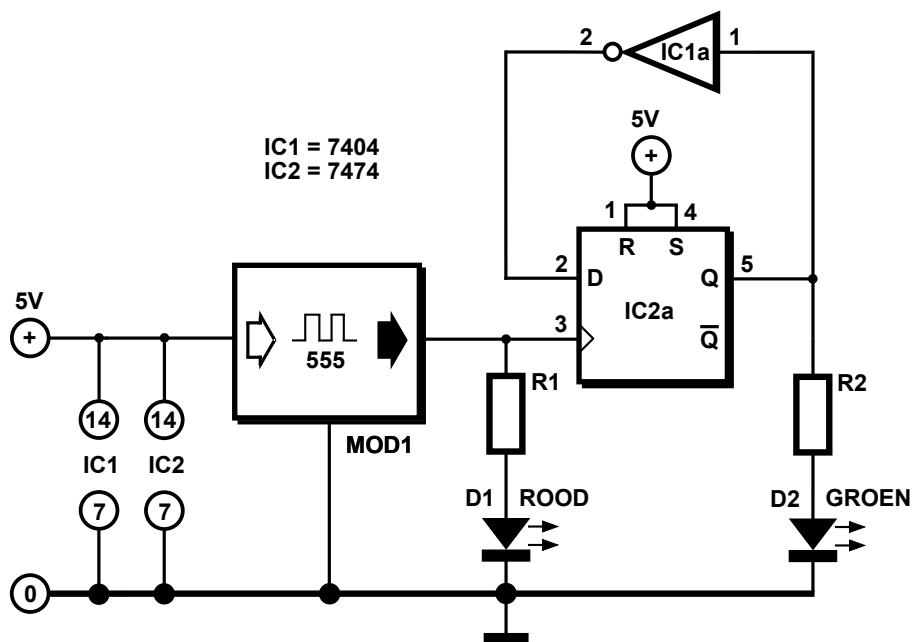
Mits wat kleine aanpassingen bewijst deze schakeling ook zijn nut bij het demonstreren van logische poorten.

Experiment: Neem een 7404 hex inverter IC en sluit de voedingspennen 14 en 7 aan op respectievelijk V_{cc} en grond van je schakeling. Maak gebruik van een voedingsspanning $V_{cc} = 5\text{ V} \pm 10\%$. De 5 V supply van de labovoedingen is hier uitstekend voor geschikt. Sluit de ingang van één van de inverters aan op de 555-oscillator en de uitgang op een LED met bijhorende voorschakelweerstand. In schakeling 7.1 werd gebruik gemaakt van de eerste van 6 inverters in het 7404 IC, aangeduid met IC1a in de schakeling. De ingang van deze inverter zit op pen 1 van het IC en de uitgang op pen 2. De andere inverters zijn genummerd als respectievelijk IC1b, IC1c enz. Neem voor D1 en D2 LED's van verschillende kleuren (bv. rood en groen) en reken de respectievelijke voorschakelweerstanden R1 en R2 uit voor een stroom van 20 mA door de LED's. Denk er hierbij aan dat LED's van verschillende kleuren ook verschillende drempelspanningen hebben, en dus andere voorschakelweerstand vereisen! Kies de dichtstbijzijnde praktische weerstandswaarde, en noteer de berekening in je verslag. Test de schakeling op het breadboard en beschrijf het gedrag van de LED's in je verslag. Komt dit overeen met je verwachtingen?

Experiment: Plaats een tweede inverter in serie met IC1a door zijn ingang te verbinden met pen 2 en zijn uitgang met R2. Test je schakeling opnieuw. Wat merk je? Stel de waarheidstabel voor deze schakeling op, waarin je voor elke mogelijke toestand van de schakeling de uitgangen van beide inverters noteert. Herhaal het experiment met een derde inverter in serie met de vorige twee, en observeer het gedrag van de schakeling. Kan je een algemene conclusie trekken m.b.t. de toestand van de LED's voor een even en een oneven aantal inverters?

7.4.2 Flipflops

Hoewel dankzij de 555-oscillator toelaat om het concept *timing* te introduceren in digitale schakelingen, kent de uitgang nog steeds slechts 2 mogelijke toestanden, namelijk één waarbij de 555-oscillatoruitgang logisch hoog is en één waarbij hij logisch laag is. Hoewel je er dus interessante kerstverlichting mee kan maken, is het aantal toepassingen beperkt. Door echter gebruik te maken van elementen die de toestand van de schakeling kunnen bewaren, kunnen de uitgangen afhangen van niet enkel de ingangen, maar ook van de vorige toestand van de schakeling. Dit ken je uit de theorie als een *Mealy machine*. De meest geschikte component hiervoor is de *flipflop*. Flipflops hebben 6 pennen: een ingang D en twee uitgangen Q en $\bar{Q}$, een klokingang, een *reset* (soms ook *clear* geheten) en een optionele *set* of *preset*.



Figuur 7.2: Werking van een flipflop bij het ontwerp van Mealy machines.

Bekijk het schema in figuur 7.2. Deze schakeling bestaat opnieuw uit een 555-oscillator met een

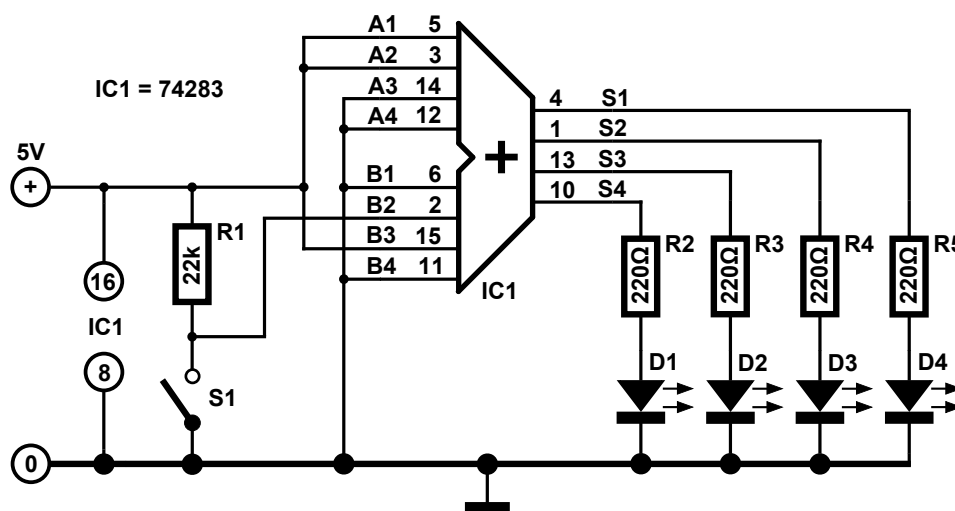
LED op zijn uitgang, een D-flipflop van type 7474 en een inverter die tussen de uitgang en ingang van de flipflop is geschakeld. De tweede LED hangt nu op de uitgang van de flipflop. De inverterende uitgang van de flipflop Q is open gelaten. Voor een correcte werking moeten de reset R en set S, respectievelijk pennen 1 en 4, logisch hoog zijn. Dit wordt verwezenlijkt door ze naar de V_{cc} op te trekken.

Experiment: Bouw de schakeling op een breadboard en test ze uit. Let erop ook het flipflop IC te voeden! Welk verband tussen de knipperfrequenties van beide LED's stel je vast? Verklaar dit in je verslag.

7.5 Adders

Wat je in figuur 7.2 gemaakt hebt is in feite een zeer eenvoudige klokdelers (*eng. clock divider*). In de digitale elektronica zijn klokdelers zeer belangrijk, want ze laten bijvoorbeeld toe dat je trage computermuis toch synchroon kan blijven lopen met de snelle processor, hoewel beiden op een verschillende kloksnelheid werken. In het *Geïntegreerd Practicum* (3^e Bachelor) leer je meer over klokdelers en hun interessante toepassingen.

Als je een snelle processorklok van bijvoorbeeld een microcontroller zoals de Arduino, die draait op een frequentie van 16 MHz, wil delen om er een LED zichtbaar mee te laten knipperen op een frequentie van 8 Hz dan moet je de klok delen met een factor $\frac{16 \text{ MHz}}{8 \text{ Hz}} = 2 \cdot 10^6$. Dit komt neer op maar liefst 21 gecascadeerde delers! Je merkt dat dit soort constructies nogal snel onpraktisch wordt, tenminste als je ze met discrete componenten implementeert.



Figuur 7.3: Voorbeeld van een eenvoudige combinatorische adderschakeling.

Een handige oplossing hiervoor zijn *adders*. Deze combinatorische schakelingen bestaan uitsluitend uit combinaties van logische poorten, en laten toe om 2 binaire getallen bij elkaar op te tellen. De ingangen heten gewoonlijk A en B, de uitgang S of Σ (*sum*). Zoals je weet uit de theorie kan je adders eenvoudig cascaderen, om zo adders te creëren die 4, 8, 16 of bredere inputs accepteren. In dit practicum zal je werken met een 4-bit adder, de 74283, die in staat is om 2 4-bit getallen op te tellen. De ingangen worden genummerd van A1 tot A4 en van B1 tot B4, waarbij A1 en B1 de bits met de kleinste betekenis zijn (*eng. least significant bits, LSB*) en A4 en B4 de bits met de grootste betekenis voorstellen (*eng. most significant bits, MSB*). Hetzelfde geldt door de uitgangen, genummerd van S1 tot S4 (of, in sommige notaties, van $\Sigma 1$ tot $\Sigma 4$).

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 7.3 op een breadboard, en maak gebruik van 4 LED's (met bijpassende voorschakelweerstand) om de uitgangen te visualiseren. Merk op dat deze schake-

ling een volledig combinatorische *Moore machine* is: de uitgangen zijn uitsluitend afhankelijk van de ingangen. Via schakelaar S1 kan één bit van ingang B van de adder echter aangepast worden. Hoeveel mogelijke toestanden kunnen de LED's aan de uitgang van de adder aannemen en waarom? Test dit experimenteel met deze schakeling. Voor S1 kan je een schuifschakelaar (*eng. toggle switch*) of drukknop (*eng. tactile switch* of *push button*) nemen.

Experiment: Wijzig de schakeling zodanig dat op ingang A het getal 5_{dec} wordt aangelegd. Hoe configureer je ingang B zodanig dat als er op de knop wordt gedrukt het getal 7_{dec} op de uitgang verschijnt en als de knop wordt losgelaten het getal 1100_{bin} wordt weergegeven?

7.6 Counters

Door bij een bepaald getal steeds een getal bij te tellen is het mogelijk om een andere belangrijke bouwsteen te construeren, de *teller* (*eng. counter*). Counters zijn dus een speciaal geval van adders waarbij de uitgang wordt teruggekoppeld naar de ingang, en er elke klokcyclus een bepaalde constante waarde bij wordt opgeteld. Deze constante waarde is quasi altijd 1_{bin} . Tussen verschillende klokcycli wordt de actuele waarde van de teller opgeslagen in één of meerdere flipflops, zoals weergegeven in figuur 7.4. Bij elke stijgende klokflank zal de flipflop de vorige waarde van de adderuitgangen inklokken op zijn ingangen D en op zijn uitgangen Q zetten. Hierbij wordt dan een constant getal opgeteld, en de verhoogde waarde verschijnt weer op de uitgangen van de adder en de ingangen D van de flipflop. Omdat flipflops echter *flankgetriggerd* zijn wordt de nieuwe waarde niet doorgerekoppeld naar de uitgangen tot de volgende stijgende klokflank.

Experiment: Bouw de schakeling in figuur 7.4 en configureer de 555-oscillator zodanig dat de oscillatiefrequentie ongeveer 2 Hz bedraagt. Noteer alle mogelijke LED-combinaties in een tabel. Verklaar hoe je aan dit getal komt. Wat gebeurt er als de teller zijn maximum bereikt?

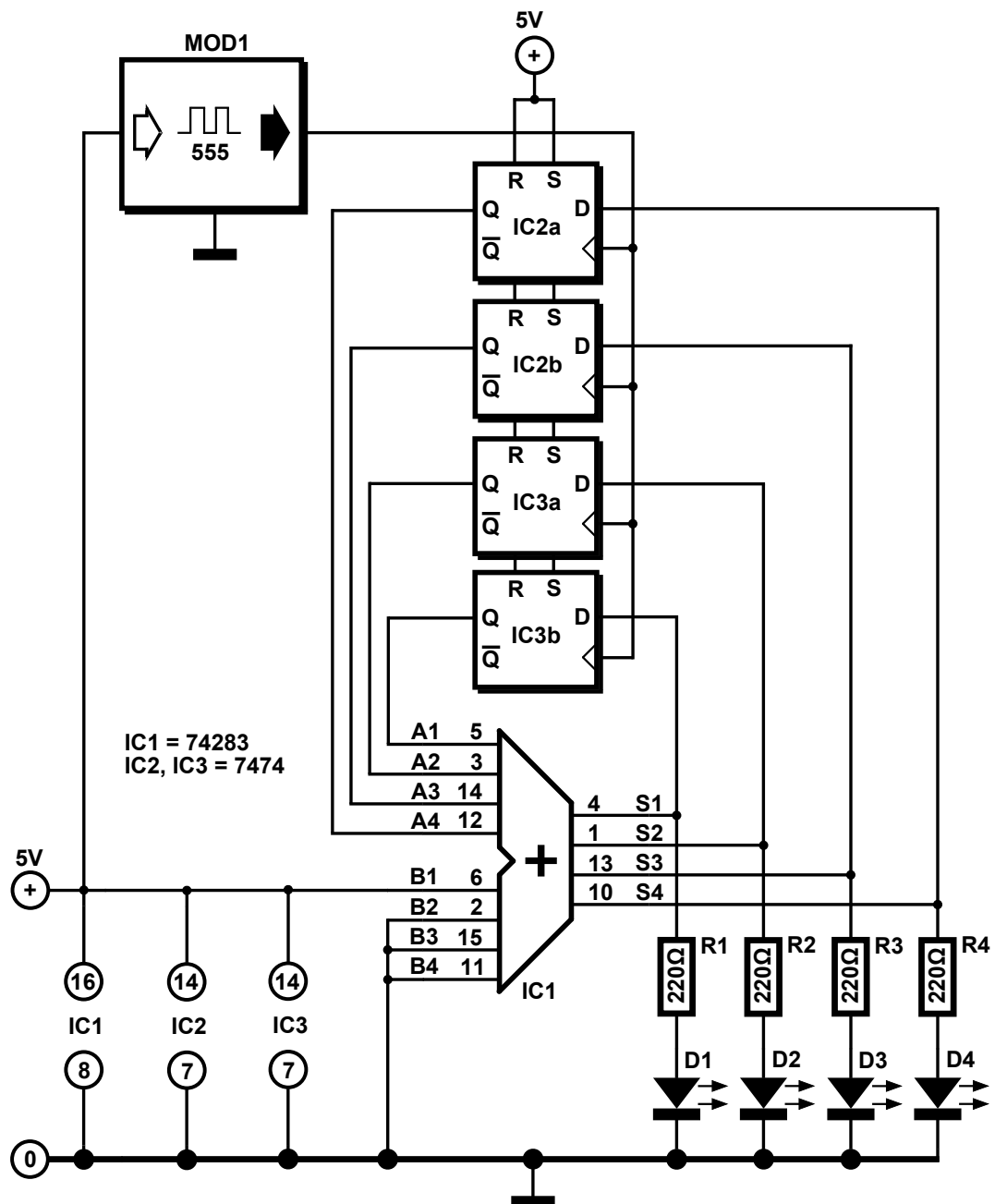
Stel de waarheidstabel op voor deze schakeling wanneer adderingang B1 wordt laaggetrokken en B2 hooggetrokken.

7.7 Toepassing: spoorwegovergang

Bestudeer de schakeling in figuur 7.5. In deze schakeling wordt een logische poort (OR-poort) toegepast om de uitgangen van de counter te verwerken en er LED's mee aan te sturen. LED D1 licht op als uitgang S4 hoog is, S3 licht op als uitgang S4 OF S3 hoog is.

Experiment: Breid de schakeling zodanig uit dat 4 LED's één voor één oplichten, zodanig dat je 4 LED's op rij kan laten oplichten. De tijd tussen het oplichten van verschillende LED's hoeft niet gelijk te zijn.

Schets de volledige schakeling in je verslag en vermeld de waarheidstabel.



Figuur 7.4: Constructie van een 4-bit counter met een 4-bit adder en flipflops.

