

Naam: Klas: Studentnummer:

Inleiding

De halfgeleidercomponent waar we deze week mee aan de slag gaan is de transistor. Deze component vormt de basis van alle hedendaagse elektronica en is de opvolger van de ouderwetse buizen (zoals je deze nog kunt vinden in high-end audioversterkers).

Een transistor is te gebruiken voor verschillende doeleinden. Een transistor kan bijvoorbeeld schakelen of versterken. In dit eerste lab gaan we de werkgebieden bekijken en daarna kijken naar de eigenschappen als schakelaar.

Leerdoelen

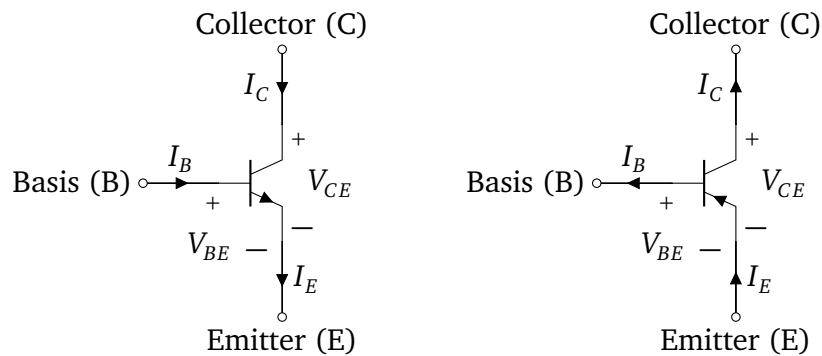
- De functies en werkgebieden van een transistor kunnen benoemen.
- De werkgebieden van een transistor kunnen bepalen en controleren door middel van berekeningen, simulaties en metingen.
- Een transistor kunnen gebruiken als schakelaar.
- De werking van de transistor als schakelaar in een oscillatorschakeling begrijpen.
- Een simulatie *kickstarten* zodat de ideale simulatiewereld geen beperkingen vormt om werkelijk gedrag te simuleren.
- Het gedrag van een (geschakelde) spoel onderzoeken en begrijpen.
- De werking van de (geschakelde) spoel met behulp van de transistor als schakelaar in een Boost-Converter onderzoeken en begrijpen.

Vorbereiding op de les

- Lees §3.4, §12.1 en §12.2 van Electrical Engineering (Hambley).
- Lees **hoofdstuk 1** van deze opdracht door.
- Download en bekijk de datasheet van de BC547.
- Maak een simulatie van **schakeling 2**, **schakeling 3** (maar vervang de LED's door een verbinding/draad) en **schakeling 6**.

1 Theorie: De transistor als schakelaar

Zoals te zien is in **schakeling 1** is de transistor een component met drie pinnen. Elk van deze pinnen heeft invloed op de werking van de transistor en dit is precies wat een transistor zo veelzijdig maakt. Een transistor is er in twee belangrijke basisvormen: een NPN transistor en een PNP transistor.

**Schakeling 1:** NPN en PNP Transistor

Wat betreft functionaliteit kun je de transistor zien als een waterkraan die je open en dicht kan draaien. Het water stroomt van collector naar emitter en wordt gecontroleerd door de basis. In elektrotechnische termen: de stroom die de basis inloopt bepaalt de grootte van de stroom die van de collector naar de emitter kan lopen.

De overgang van basis naar emitter is te vergelijken met een diodeovergang (die we vorig kwartaal al hebben leren kennen). De drempelspanning van deze diodeovergang kun je in de datasheet meestal vinden als $V_{BE(on)}$. In de theorie rekenen we vaak met $V_{BE(on)} = 0,7V$.

De transistor heeft drie werkgebieden: De kraan is helemaal dicht (*cut-off*), helemaal open (*saturation*) of iets daartussenin (*active*).

1.1 Verzadiging (*saturation*)

Op het moment dat I_{BE} (de stroom die loopt van de basis naar de emitter) groot genoeg is, zal I_{CE} (= de stroom die van collector naar emitter loopt) zo groot mogelijk worden. In deze situatie is de transistor verzadigd (*saturated*) en staat de kraan volledig open. Een grotere I_{BE} zal geen verschil maken. Op dit moment is de spanning over de transistor V_{CE} minimaal geworden. In de praktijk zal deze spanning nooit helemaal nul worden. In de datasheet kun je deze minimale spanning meestal vinden als $V_{CE(sat)}$. In de theorie rekenen we vaak met $V_{CE(sat)} = 0,2V$.

1.2 Cut-off

Op het moment dat I_{BE} onder een bepaalde waarde komt, kan I_{CE} niet meer kleiner worden. De transistor staat nu uit en werkt als een isolator (de kraan is volledig dicht gedraaid).

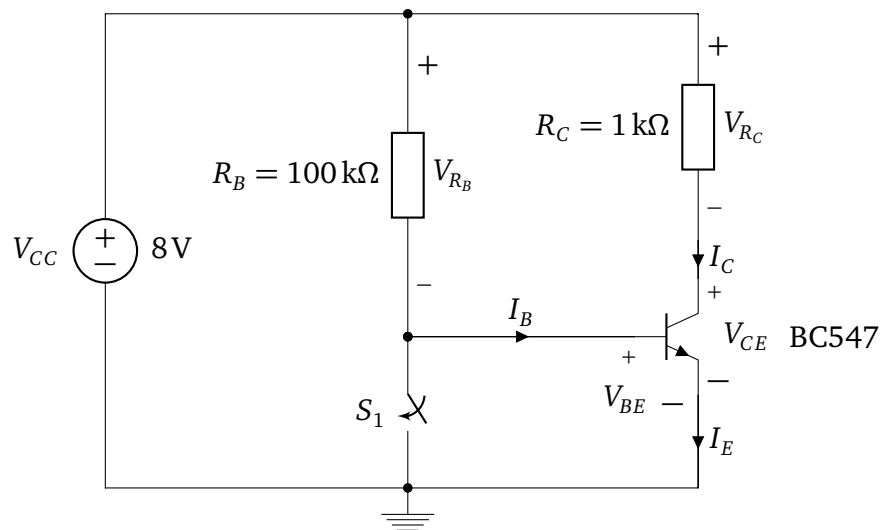
1.3 Actief (*active*)

Bij elke andere waarde van I_{BE} zal de transistor versterken met een factor β (ook wel h_{FE} genoemd). Dit is te vergelijken met de kraan half-open draaien. Een kleine draai linksom of rechtsom heeft een grote invloed op de waterstraal.

$$I_{CE} = \beta \cdot I_{BE}$$

$$I_{CE} = h_{FE} \cdot I_{BE} \quad (1)$$

2 De werkgebieden van een transistor



Schakeling 2: NPN Transistor als schakelaar

Tabel 1: Meten aan een transistorschakeling.

B : Berekeningen (B_{min} met minimale h_{FE} uit de datasheet, B_{max} met maximale h_{FE})

S : Simulatiewaarden

M : Meting aan de opgebouwde schakeling

Wg : Werkgebied (invullen: A = Active, S = Saturation, C = Cut-off)

	$B/S/M$	S_1	R_1	V_{R_B}	V_{BE}	I_B	I_C	V_{R_C}	V_{CE}	h_{FE}	Wg
1	B_{min}	open	100 kΩ								
2	B_{max}	open	100 kΩ								
3	S	open	100 kΩ								
4	M	open	100 kΩ								
5	B_{min}	dicht	100 kΩ								
6	B_{max}	dicht	100 kΩ								
7	S	dicht	100 kΩ								
8	M	dicht	100 kΩ								
9	B_{min}										
10	B_{max}										
11	S										
12	M										

Opdracht 1: De transistor als schakelaar en werkgebieden

1. Lees **hoofdstuk 1** door als je dat nog niet gedaan hebt.
2. Pak een BC547 uit de voorraad. Is dit een BC547A, BC547B of BC547C?
Bekijk de datasheet van de BC547. Welke waarden kun je vinden voor h_{FE} (β), $V_{BE(on)}$ en $V_{CE(sat)}$?
3. Bekijk **schakeling 2**. Bereken de waarde van I_B als de schakelaar S_1 open staat. Je kunt hiervoor de spanning over R_B gebruiken. Welke invloed heeft $V_{BE(on)}$ op V_{R_B} ?
4. Bereken op basis van de minimale en maximale h_{FE} waarde uit de datasheet in welke range je verwacht dat I_C zich zal bevinden op basis van de formule $I_C = h_{FE} \cdot I_B$:
5. Bereken op basis van deze I_C range de spanning over R_C en de spanning V_{CE} over de transistor:
6. Vul al je resultaten in in rij 1 en 2 van **tabel 1**. Zijn dit realistische waarden in een praktische situatie? In welk werkgebied bevindt de transistor zich nu dus?
7. Pak de simulatie van **schakeling 2** die je hebt voorbereid erbij en vul rij 3 van **tabel 1** in op basis van je simulatieresultaten.
8. Bouw de schakeling op en vul rij 4 van **tabel 1** in op basis van je metingen aan de opgebouwde schakeling.
9. Welke verschillen zie je nu? Kun je nu met zekerheid zeggen in welk werkgebied de transistor zich bevindt?

10. Sluit nu schakelaar S_1 .
11. Bereken of bepaal V_{R_B} , V_{BE} , I_B , I_C , V_{R_C} en V_{CE} als de fysieke schakelaar gesloten is. Vul rij 5 en 6 van **tabel 1** in. In welk wergebied bevindt de transistor zich nu?

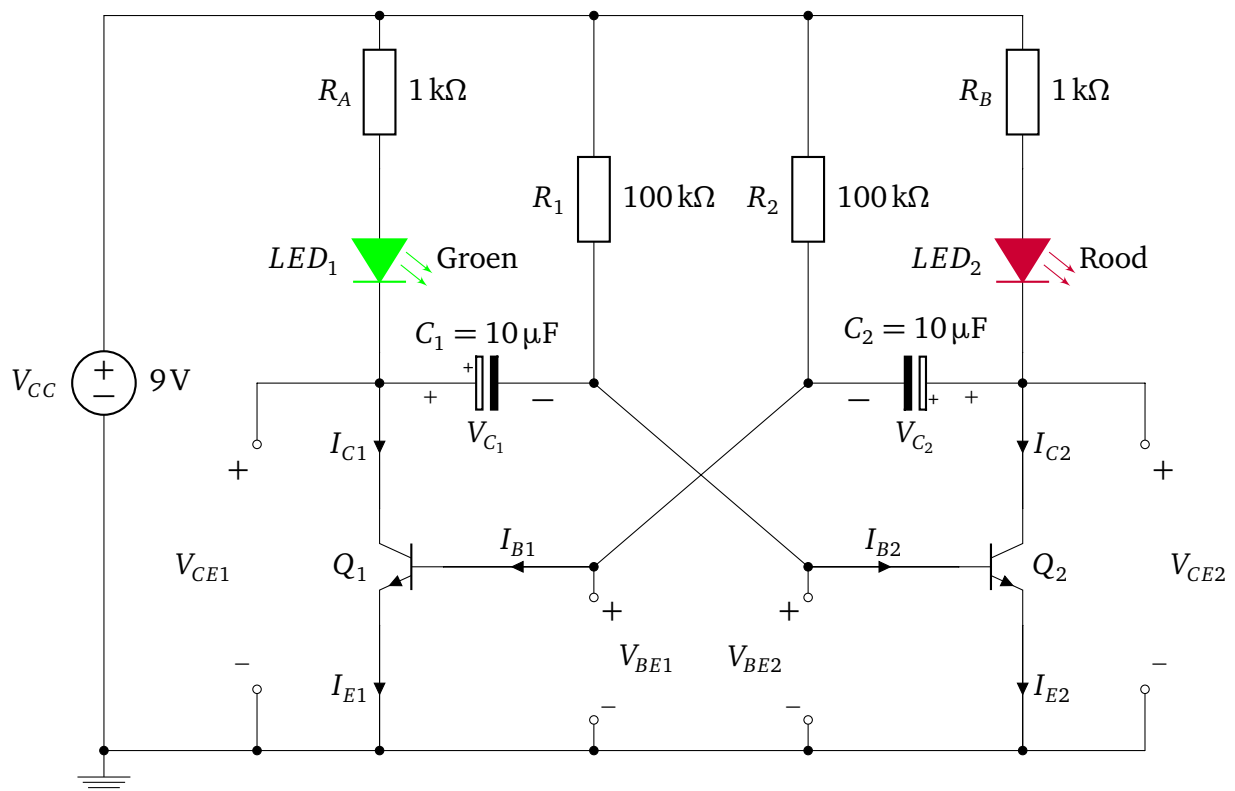
12. Controleer je berekeningen in de simulatie en in de opgebouwde schakeling. Vul rij 7 en 8 van **tabel 1** in.
13. We hebben nu twee werkgebieden bekeken. Bereken bij welke waarde voor R_B de transistor zich (ruimschoots) in het derde en laatste werkgebied (dus het werkgebied dat je nog niet bent tegengekomen) bevindt. Vul je resultaten in rij 9 en 10 van **tabel 1** in. Moet de schakelaar open of dicht zijn?

14. Bevestig je antwoord door middel van een simulatie en metingen aan de opgebouwde schakeling en vul rij 10 en 11 van **tabel 1** in.

Conclusie 1

3 De transistor als schakelaar in een oscillatorschakeling

In **schakeling 3** is een oscillatorschakeling te zien. Een oscillator wekt een periodiek signaal op met een bepaalde frequentie. Een oscillator houdt deze oscillatie zelf in stand. De oscillator die we hier gaan gebruiken, wordt opgebouwd met transistoren die als schakelaar werken en heet een *astabiele multivibrator*. Het heeft dezelfde werking als de NE555 astabiele multivibrator die je tijdens ELE10 hebt leren kennen.



Schakeling 3: Astabiele multivibrator

Optioneel: uitleg schakeling

De werking van **schakeling 3** is gebaseerd op het op- en ontladen van C_1 en C_2 . Er staat altijd 1 transistor in geleiding. Als Q_1 geleidt dan wordt C_1 opgeladen via R_1 en Q_1 (I_{C1}). C_2 wordt opgeladen via R_B en Q_1 (I_{B1}). De rechter kant van beide condensatoren is in dit geval positiever dan de linker kant van de condensatoren.

Wanneer V_{BE2} groot genoeg is om Q_2 te laten geleiden, dan gaat V_{CE2} richting ground en de linker kant van C_2 richting een negatieve spanning. De rechterkant was immers positiever, en de spanningsval over een condensator kan niet zomaar veranderen!

Dit sluit Q_1 en draait de stroomrichting door C_1 en C_2 : deze loopt nu via Q_2 . Nu wordt links de positievere kant van de condensatoren. Hoe meer stroom de condensator inloopt, hoe positiever deze kant wordt.

Wanneer V_{BE1} weer groot genoeg is zal Q_1 weer open gaan en herhaalt de werking zich.

Opdracht 2: De transistor als oscillator

1. Bouw **schakeling 3** op en sluit deze aan. Wat zie je gebeuren?
2. Pak de simulatie van **schakeling 3** die je hebt voorbereid erbij. Vervang in de simulatie de LEDs door een draadje. Simuleer de schakeling voor 30 s en meet de spanning V_{CE1} . Werkt de simulatie?

3. Deze schakeling werkt in de praktijk wel omdat bij het inschakelen van de voedingsspanning de toleranties van de componenten ervoor zorgen dat één van de transistoren net iets eerder in geleiding gaat dan de andere. In de ideale wereld van de simulatie bereiken ze op hetzelfde moment een stabiele waarde.

Om deze schakeling toch te kunnen simuleren moeten we de oscillator *kickstarten*.

Dit kunnen we doen in LTspice door de muis op de basis van Q_1 te houden. We krijgen nu in de statusbalk te zien welke node dit is. (Bijvoorbeeld: $V(n004)$, maar kijk goed welke node in je eigen simulatie staat.)

We kunnen nu de optie *Set Initial Conditions* gebruiken om dit punt een afwijkende startwaarde te geven aan het begin van de simulatie. Dit doen we door een *SPICE Directive* toe te voegen via Edit --> SPICE Directive 'S'.

In het invoervakje typ je de tekst: **.ic v(n00x)=0** waarbij x het nodenummer is dat je op de basis van Q_1 hebt gevonden.

Nu zou je simulatie wel moeten werken. *Werkt het niet? Vraag een docent!*

4. Meet in de simulatie V_{CE1} . Wat is de periodetijd van dit signaal? *Let op: vanwege het opstarten is de eerste periode afwijkend, meet dus bijvoorbeeld de derde periode van het signaal!*

5. De theoretische formule voor de periodetijd T van deze schakeling is:

$$T = (R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot \ln(2) \quad (2)$$

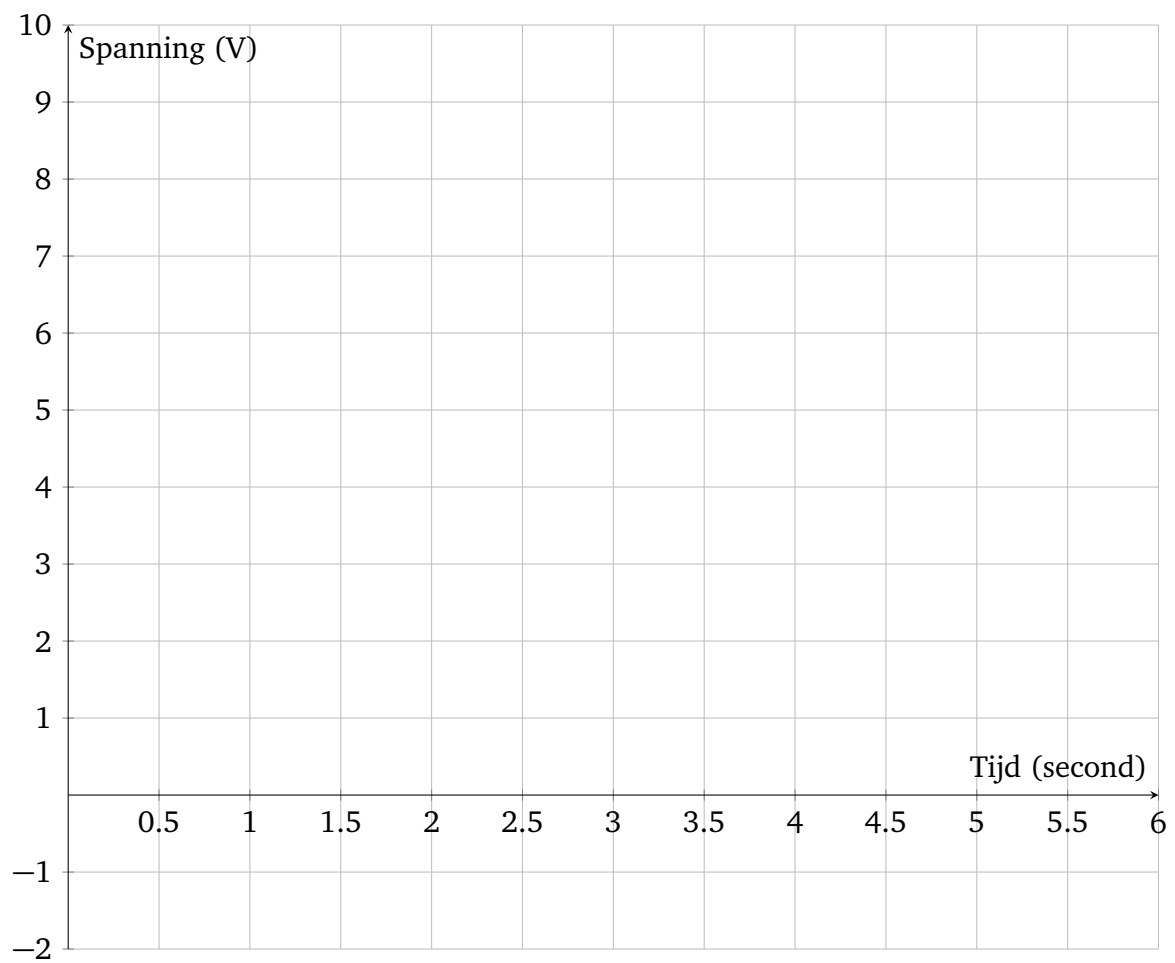
Komt dit overeen met je simulatie?

6. Vervang nu ook in je opgebouwde schakeling de LED's door draadjes zodat de schakeling overeenkomt met de simulatie. Meet V_{CE1} op kanaal 1 van de

oscilloscoop. Welke periodetijd meet je met de *cursor* functie?

7. Meet V_{CE2} met kanaal 2 van de oscilloscoop. Hoe verschilt dit van signaal van V_{CE1} op kanaal 1?
8. Vervang C_1 door een condensator met een lagere capaciteit. Wat voor invloed heeft dit op de periodetijd?
9. Vervang weerstanden R_1 en R_2 met andere (verschillende) waarden. Wat voor invloed heeft dit op de schakeling?
10. We zouden graag ook de spanning V_{C_1} over condensator C_1 willen meten met oscilloscoop. Leg uit waarom we niet tegelijkertijd V_{CE1} en V_{C_1} op kanaal 1 en 2 van de oscilloscoop kunnen meten:
11. Teken V_{CE1} en V_{C_1} in **figuur 1**.

Conclusie 2



Figuur 1: Signalen V_{CE1} en V_{C1} van een astabiele multivibrator.

4 Het gedrag van een geschakelde spoel

In deze opdracht gaan we kennis maken met de spoel. Een spoel is niets meer dan een geleider die een magnetisch veld opwekt wanneer er een stroom doorheen loopt. Dit veld kan gebruikt worden om energie in op te slaan en in een spoel gebeurt dat dus ook.

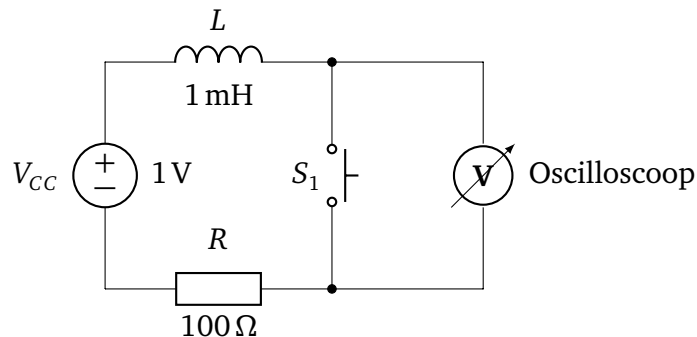
Een spoel heeft als grootte inductie (L) met als eenheid Henry (H). Het aantal Henry is een indicatie hoe goed de spoel een magnetisch veld kan opwekken. Hoe *sterker* dit veld, hoe meer energie hierin kan worden opgeslagen. Deze energie E in Joule (J) is dan gelijk aan:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2 \quad (3)$$

De relatie tussen de spanning over een spoel en de stroom door een spoel is gegeven door:

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (4)$$

Waarbij $\frac{dI_L}{dt}$ betekent hoe snel de stroom verandert in de tijd (dit is de afgeleide van de stroom I_L naar de tijd t , oftewel als $f(t) = I_L(t)$ zijn we op zoek naar $f'(t)$). Bovenstaande formule is op verschillende manieren op te vatten; bij een vaste spanning over de spoel zal de stroom blijven toenemen (een constante verandering), en, bij een snelle verandering in de stroom zal er een spanningspiek ontstaan. We gaan dit nu aantonen met behulp van **schakeling 4**.



Schakeling 4: Handmatig geschakelde spoel.

We beginnen deze opdracht met het kijken naar wat er met de spanning over een spoel gebeurt als deze wordt ingeschakeld met een drukknopje (er gaat dus een stroom door de spoel lopen). Daarna wordt het drukknopje losgelaten en zal er dus een plotselinge verandering optreden in de stroom door de spoel. De spoel zal dan een spanningspiek veroorzaken volgens **vergelijking (4)**.

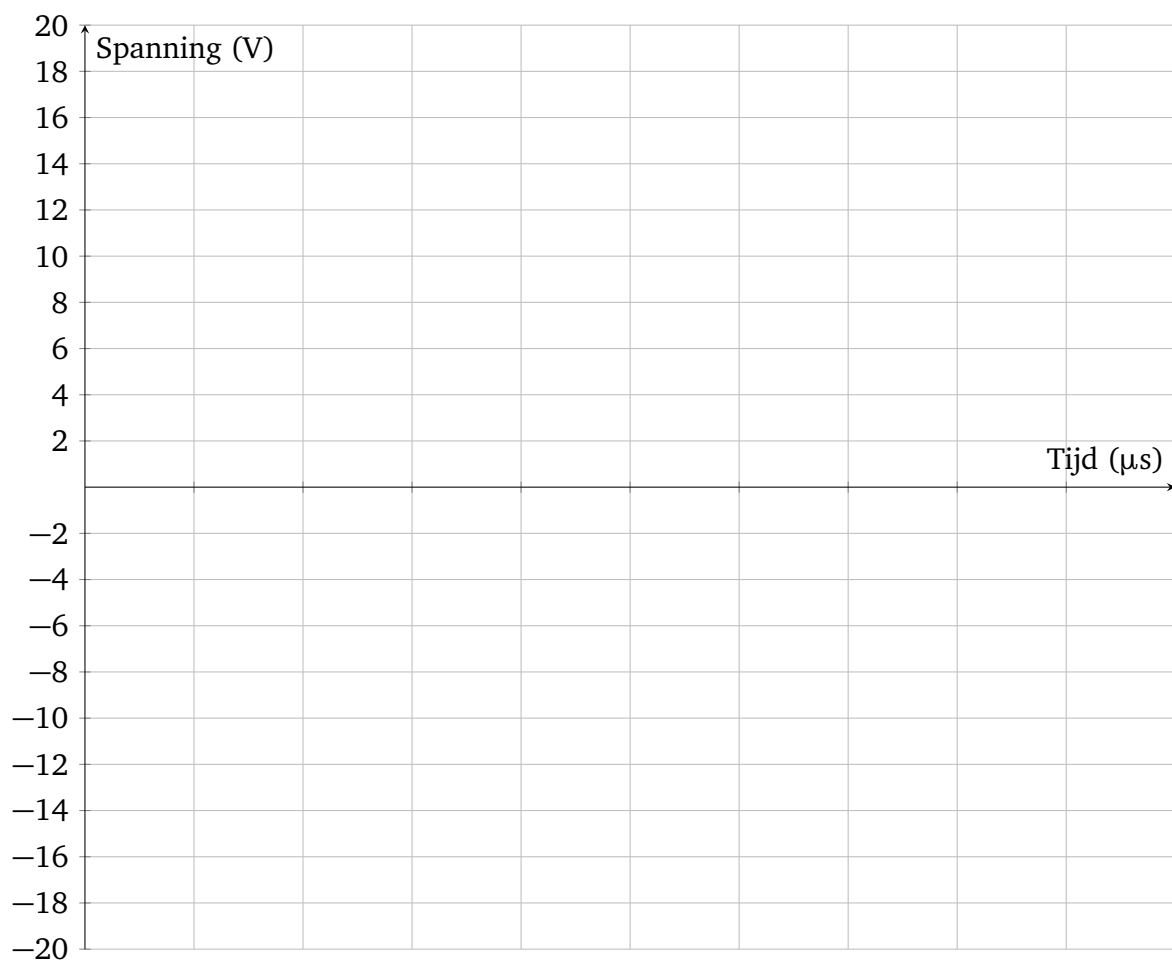
Om de maximale stroom niet te ver op te laten lopen gebruiken we een serieweerstand van 100Ω . Deze weerstand zorgt er echter ook voor dat de spanningspieken worden gedempt zodat we oscilloscoop niet beschadigen.

Opdracht 3: Het schakelen van een spoel

1. Bouw **schakeling 4** op.
2. Meet de spanning over de spoel als S_1 ingedrukt is: (L en R vormen een soort van *spanningsdeler*!)
3. Meet de stroom die door de spoel loopt als S_1 ingedrukt is:
4. Bereken hieruit de opgeslagen energie in de spoel bij deze stroom volgens **vergelijking (3)**:
5. We gaan de oscilloscoop nu instellen om te kijken wat er gebeurt wanneer de spoel wordt geschakeld. De functie die nodig is om te zien wat er gebeurt is de *single trigger* functie. Hiermee kan de oscilloscoop pauzeren wanneer een spanningspiek wordt gedetecteerd.

Stel de oscilloscoop in op 5 V/Div., 25 μ s/Div. en zet het pijltje van de trigger op ongeveer 15 V (trigger-level).
6. Druk op de (fysieke) *single* knop die te vinden is op de oscilloscoop.
7. Druk nu het knopje van de schakeling even in en laat het los. Herhaal deze stap een aantal keer door telkens weer op de *single* trigger knop te drukken. Teken het mooiste signaal dat je op de oscilloscoop ziet in **figuur 2**, kies hier zelf een goede verdeling voor de tijd-as. Wat is de maximale spanning die de oscilloscoop waarneemt?
8. Kun je dit gedrag verklaren aan de hand van **vergelijking (4)**?

Conclusie 3

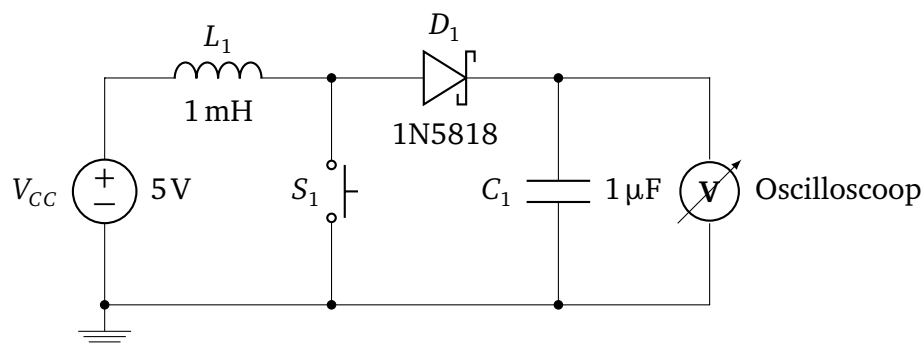


Figuur 2: Spanningpieken veroorzaakt door een geschakelde spoel.

5 Een handmatige geschakelde Boost-Converter

De grote spanningspieken kunnen nu gebruikt worden om van een lage spanning een hogere spanning te maken. De uiteindelijke schakeling zal dit ook bereiken. Een van de componenten in deze schakeling is een speciale diode, de Schottky diode. Dit is een diode met een zeer lage drempelspanning: normaal is de spanning over een diode ongeveer 0,7 V, bij een Schottky diode kan dit afnemen naar ongeveer 0,3 V. Als we een hogere spanning willen maken, dan is iedere 0,1 V over een diode extra verlies. Vandaar dat we hier graag een Schottky diode nemen in plaats van een gewone diode.

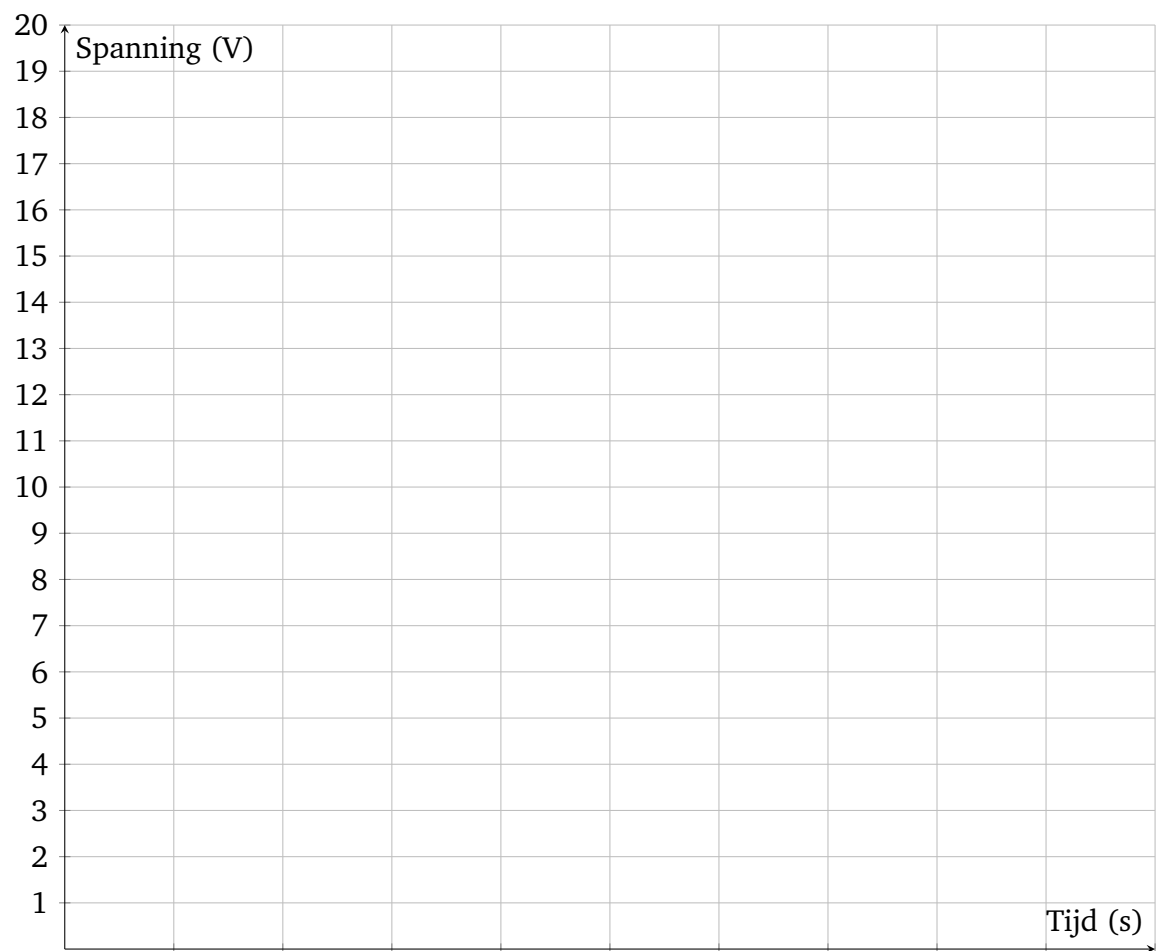
In deze opdracht testen we de basisopzet van een Boost-Converter en wordt de geschakelde spoel gecombineerd met de Schottky diode en een condensator. Het schakelen doen we nog steeds met een drukknopje zoals je kunt zien in [schakeling 5](#).



Schakeling 5: Boost-Converter met drukknopje als schakelaar

Opdracht 4: Handmatig geschakelde Boost-Converter

1. Bouw [schakeling 5](#) op.
2. Stel de oscilloscoop in op 5 V/div en 250 ms/div (roll).
3. Sluit de oscilloscoop aan op de schakeling en druk herhaaldelijk achter elkaar op het drukknopje.
4. Wat zie je op de oscilloscoop. Hoe hoog kun je de spanning met het drukknopje oppompen?
5. Teken het scoopbeeld in [figuur 3](#). Kies zelf een mooie verdeling voor de tijd-as.
6. Kun je deze werking verklaren aan de hand van de kennis die tot nu toe hebt opgedaan over diodes, condensatoren en spoelen?

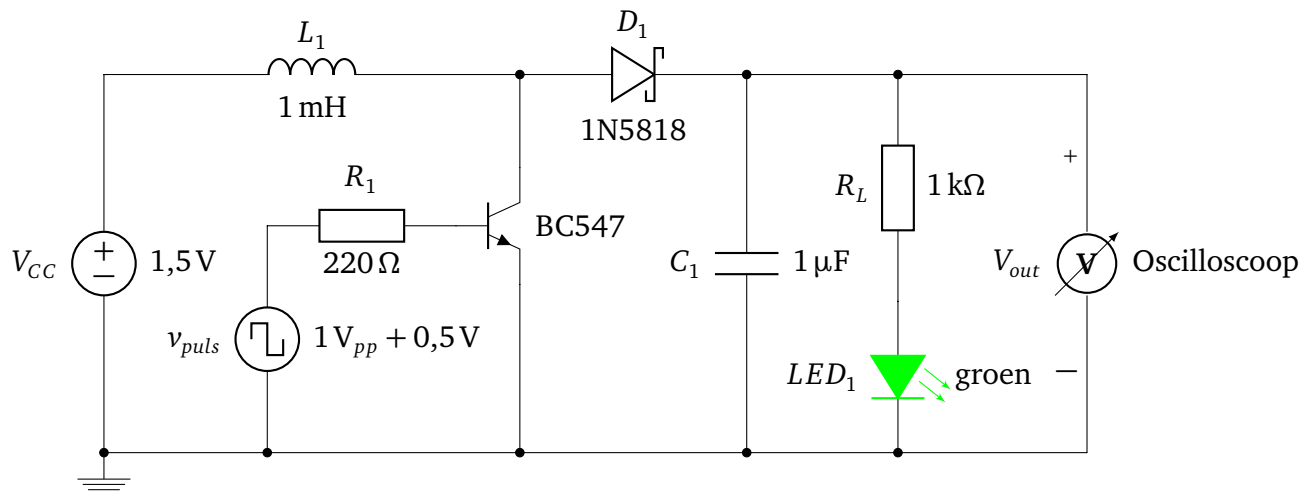


Figuur 3: Oppompen van spanning met een handmatig geschakelde spoel, een diode en een condensator.

Conclusie 4

6 Boost-Converter met een transistor als schakelaar

Nu wordt de drukknop vervangen door een transistor die door een blok golfvormig signaal wordt aan- en uitgeschakeld. Verder brengen we de ingangsspanning omlaag naar die van een AA batterij (ongeveer 1,5 V). Het blok golf signaal voor de transistor wordt gegenereerd door de functiegenerator. Een groene LED heeft meestal een drempelspanning hoger dan 1,5 V en zal normaal gesproken dus niet kunnen branden op een AA batterij.



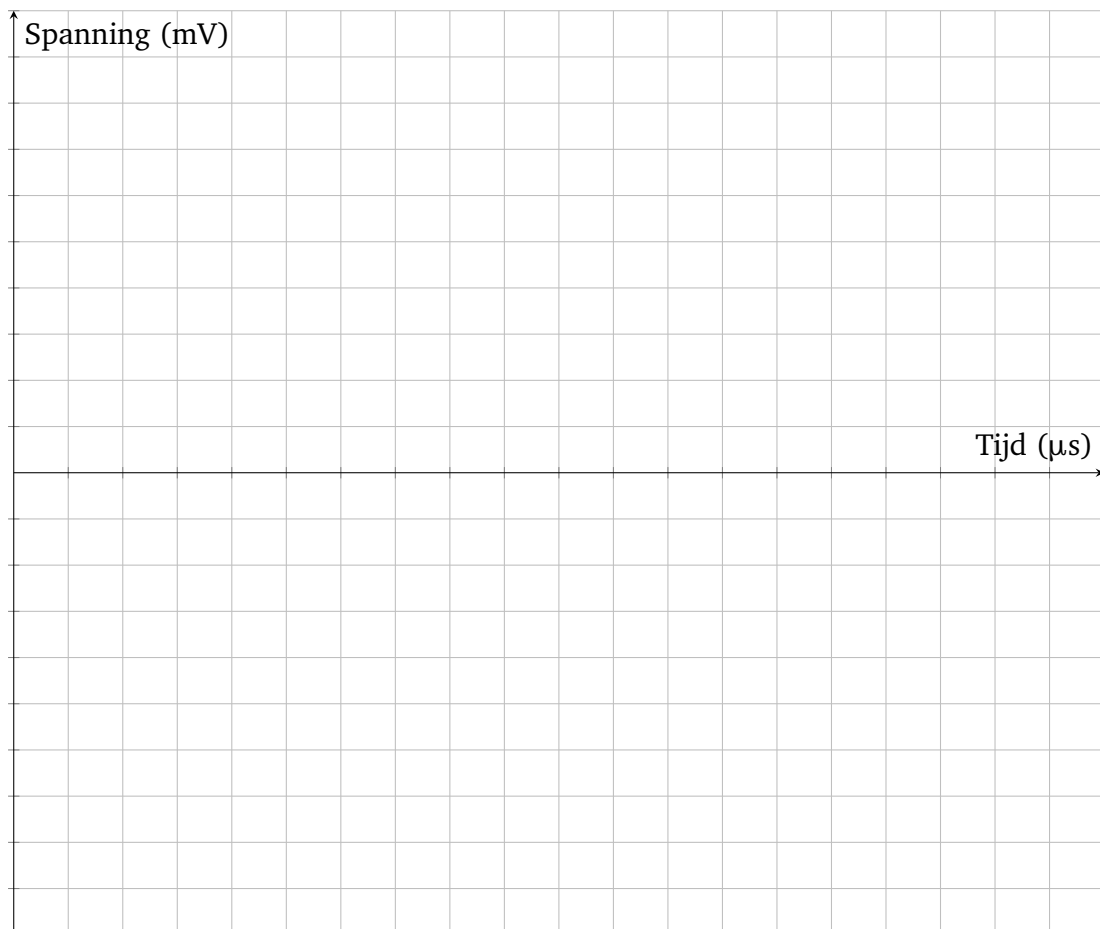
Schakeling 6: Boost-Converter met een transistor als schakelaar

Opdracht 5: Boost-Converter met een transistor als schakelaar

1. Sluit als eerste de functiegenerator aan op kanaal 1 van de oscilloscoop via een T-splitter.
2. Stel de signaalgenerator in om een blok golf te genereren tussen 0 V en 1 V met een frequentie van 100 kHz en een duty-cycle van 50 %. (*hint: dit komt overeen met een periodetijd van 10 μs*)
3. Bouw nu **schakeling 6** op en sluit V_{out} aan op kanaal 2 van de oscilloscoop.
4. Wat is nu de uitgangsspanning V_{out} die je meet op de oscilloscoop (*de oscilloscoop moet op DC coupling staan*)?
5. Wat gebeurt er als je de duty-cycle van het blok golf signaal verandert? Vul **tabel 2** in. Kun je verklaren waarom dit gebeurt?
6. Pak de simulatie die je hebt voorbereid erbij en vul ook deze resultaten in in **tabel 2**. Komt dit overeen met je metingen?

7. Wat is de maximale uitgangsspanning die je kunt maken, en bij welke duty-cycle is dat?
8. Stel de oscilloscoop in op *AC coupling* en zoom in op de rimpel bij een duty-cycle van 80 %. Teken deze rimpel in **figuur 4**, kies zelf waarden voor de spannings as en tijd as.

Conclusie 5



Figuur 4: Rimpelspanning van een Boost-Converter.

Tabel 2: Meten aan een Boost-Converter.

Duty-cycle	V_{out} Simulatie	V_{out} Meting	Brandt de LED?
0 %			
5 %			
10 %			
15 %			
20 %			
25 %			
30 %			
35 %			
40 %			
45 %			
50 %			
55 %			
60 %			
65 %			
70 %			
75 %			
80 %			
85 %			
90 %			
95 %			

7 Controle en aftekenen

Controleer de volgende punten voordat je deze labopdracht laat aftekenen. Indien je één van deze vragen met **nee** kunt beantwoorden zal de opdracht niet worden afgetekend.

- Is de labopdracht uitgeprint?
- Zijn alle metingen volledig en door jezelf uitgevoerd?
- Zijn alle vragen waarbij ruimte voor beantwoording is vrijgelaten ook daadwerkelijk door jezelf in je eigen woorden beantwoord?
- Zijn alle grafieken en tabellen volledig ingevuld? Zijn grafieken voorzien van een legenda?
- Heb je zinvolle conclusies opgeschreven en deze goed onderbouwd in je eigen woorden? (*Lege vakjes zijn niet zinvol...*)
- Kun je alle metingen, antwoorden op de vragen en resultaten verklaren aan de docent?
- Kun je soortgelijke metingen herhalen en verklaren op de praktijktoets?
- Heb je alle mogelijke fouten die je kunt maken benoemd met een oplossing, zodat je deze niet maakt tijdens de praktijktoets?