

Naam: Klas: Studentnummer:

Inleiding

Vorige week is gekeken naar de transistor als schakelaar. Deze keer wordt de nadruk gelegd op de transistor als versterker.

Leerdoelen

- Twee basisversterkerschakelingen voor een transistor kunnen benoemen, simuleren, opbouwen en hieraan meten op basis van de theorie zoals behandeld in de theorielessen.

Vorbereiding op de les

Uit het boek Electrical Engineering (Hambley):

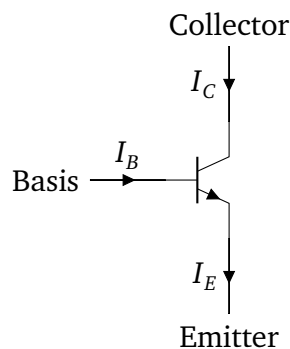
- Bekijk figuur 10.9 (Illustration of power flow).
- Lees §10.7 (Deel: AC Coupling versus Direct Coupling).
- Lees de introductie van §12.8 (Common-emitter amplifiers) en §12.9 (Emitter followers).
- Simuleer **schakeling 2**, **schakeling 3** en **schakeling 4**. Het model voor de TIP122 staat als bijlage bij deze opdracht op de Wiki van ELE20.
- Bepaal en teken van **schakeling 2** en **schakeling 3** het groot- en kleinsignaalmodel en bereken alvast zoveel mogelijk waarden. Controleer je antwoorden aan de hand van de simulatie.

1 Theorie

Een aantal concepten zijn belangrijk bij het begrijpen van een transistor als versterker.

- Een versterker genereert geen vermogen: al het vermogen wordt door de voeding geleverd.
- De basis-emitter overgang heeft een spanningsval soortgelijk aan die van een diode. Deze kan per transistor verschillen en zal moeten worden opgezocht in de datasheet. *In de theorie rekenen we vaak met 0,7V voor een normale BJT en 1,2V voor een darlington transistor.*
- De emitterstroom I_E is de som van de basisstroom I_B en de collectorstroom I_C .

$$I_E = I_B + I_C \quad (1)$$



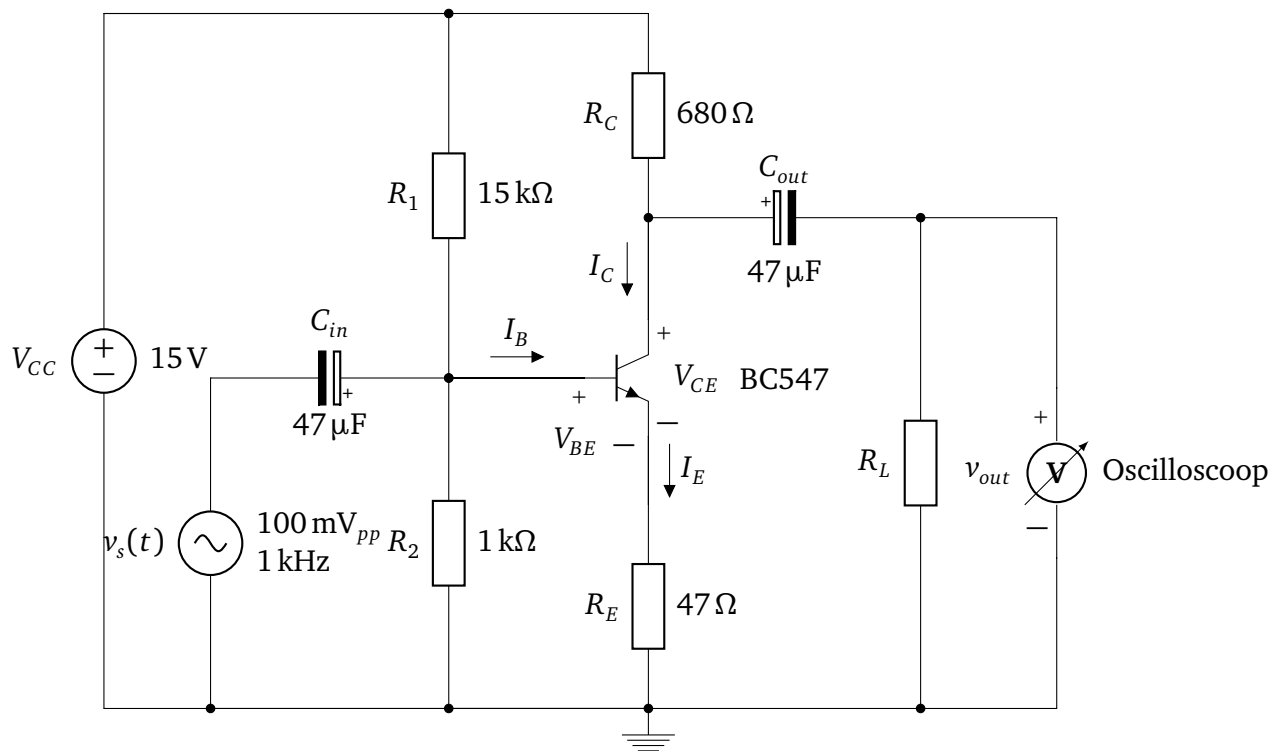
Schakeling 1: Stroom door een NPN Transistor

De transistor kan als versterker worden toegepast in verschillende configuraties. Het idee is om de transistor half open te zetten (*dus ergens halverwege **active mode***) zodat een kleine verandering aan de input een grote verandering aan de output teweeg brengt. Hieronder zijn twee basisconfiguraties opgesomd:

- De common-emitter versterker. Deze schakeling wordt gebruikt voor een grote spanningsversterking, maar vanwege de relatief hoge uitgangsimpedantie kan deze schakeling weinig stroom leveren aan een belasting.
- De common-collector versterker. Deze schakeling wordt gebruikt om een groter vermogen te kunnen leveren. De spanningsversterking is hier altijd net iets kleiner dan één, oftewel een verzwakking. Deze schakeling wordt ook wel een emitter-volger (*emitter-follower*) genoemd. Vanwege de spanningsverzwakking en de relatief lage uitgangsimpedantie wordt deze schakeling ook wel een *stroomversterker* genoemd.

2 De common-emitter versterker

Bekijk schakeling **schakeling 2**. We gaan als eerste kijken naar de DC instelling, oftewel het *groot signaal model* van deze transistorschakeling. Dit zijn de rustspanningen en -stromen wanneer de condensatoren en signaalgenerator zijn losgekoppeld: het zogenoemde *Q-punt*. We gaan de antwoorden zoals gebruikelijk eerst te berekenen aan de hand van de theorie, dan controleren met een simulatie en vervolgens proberen te bevestigen met een meting.



Schakeling 2: NPN Transistor in common-emitter configuratie

Opdracht 1: De common-emitter versterker: groot signaal model

1. Pak de simulatie van **schakeling 2** die je hebt voorbereid erbij. Laat hierbij C_{in} , C_{out} , v_s en R_L nog even weg.
2. Bouw **schakeling 2** op. Laat ook hierbij C_{in} , C_{out} , v_s en R_L nog even weg.
3. Bereken op basis van wat in de theorielessen is behandeld het Thevenin equivalent van R_1 en R_2 gezien vanuit de basis van de transistor.
4. We noemen R_{TH} en V_{oc} nu R_B en V_{BB} en sluiten deze aan op de basis van de transistor. Maak een tekening van het groot signaal model in het conclusievak.

5. Maak ook van de vervangingsschakeling met R_B en V_{BB} een simulatie.
6. Hoe groot is de spanning V_B aan de basis van de transistor in je berekening, in beide simulaties en in je opgebouwde schakeling? Vul deze waarden in in **tabel 1**.
7. Meet V_{BE} in beide simulaties en in je opgebouwde schakeling. Vul deze waarden in in **tabel 1**.
8. Bereken, simuleer en meet I_{BQ} en vul deze waarden in in **tabel 1**.
9. Bereken de stroom I_{CQ} door R_C en controleer dit in je simulaties en opgebouwde schakeling. Vul hiermee **tabel 1** aan.
10. Bereken de spanning V_{R_C} over R_C en controleer dit in je simulaties en opgebouwde schakeling. Vul hiermee **tabel 1** aan.
11. Bereken de spanning V_{R_E} over R_E en controleer dit in je simulaties en opgebouwde schakeling. Vul hiermee **tabel 1** aan.
12. Welke spanning V_{CE} staat er nu over de transistor? Vul hiermee **tabel 1** aan.
13. Leg uit in welk werkgebied (*active*, *saturation*, *cut-off*) de transistor zich nu bevindt:
14. Wat is het opgenomen vermogen in de transistor ($P_{BC547} = V_{CE} \cdot I_{CQ}$)?

Tabel 1: DC instellingen van een common-emitter schakeling.

	V_B	V_{BE}	I_{BQ}	I_{CQ}	V_{R_C}	V_{CE}	V_{R_E}
Berekening met Thevenin equivalent:							
Simulatie met Thevenin equivalent:							
Simulatie met originele schakeling:							
Meting met originele schakeling:							

Conclusie 1

De transistor staat met deze DC-instelling als het goed is half open. Nu gaan we de signaalgenerator aansluiten zodat er een wisselspanningssignaal wordt geïnjecteerd op V_B . Dit heeft als resultaat dat V_B groeit en krimpt met het ingangssignaal, het wordt in feite opgeteld bij de gelijkspanning van de spanningsdeler.

Opdracht 2: De common-emitter versterker: klein signaal model

1. Voeg de condensator C_{in} en de bron v_s toe aan je simulatie en opgebouwde schakeling.
2. Als V_B groeit met 50 mV, met hoeveel mV verandert dan de uitgang V_C ? Onderbouw dit met een berekening.
3. Sluit de functiegenerator met behulp van een splitter aan op condensator C_{in} en op kanaal 1 van de oscilloscoop. Sluit kanaal 2 van oscilloscoop aan op de uitgang V_C . Laat C_{out} en R_L nog even weg.
4. Stel kanaal 2 van de oscilloscoop in op *AC coupling*. Meet de uitgangsspanning (V_{pp}) van de versterker.
Bereken de open-klem spanningsversterking $A_{voc} = \frac{V_{outpp}}{V_{inpp}}$. Controleer dit in je simulatie. Vul de eerste rij van **tabel 2** in.

5. Voeg nu de condensator C_{out} en belastingsweerstand R_L toe in je simulatie en opgebouwde schakeling.
6. Kies $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ en teken de signalen v_s en v_{out} in **figuur 1**.
7. Kies op basis van **tabel 2** verschillende waarden voor R_L en vul de tabel in. Welke invloed heeft de belasting op de versterking van deze schakeling?

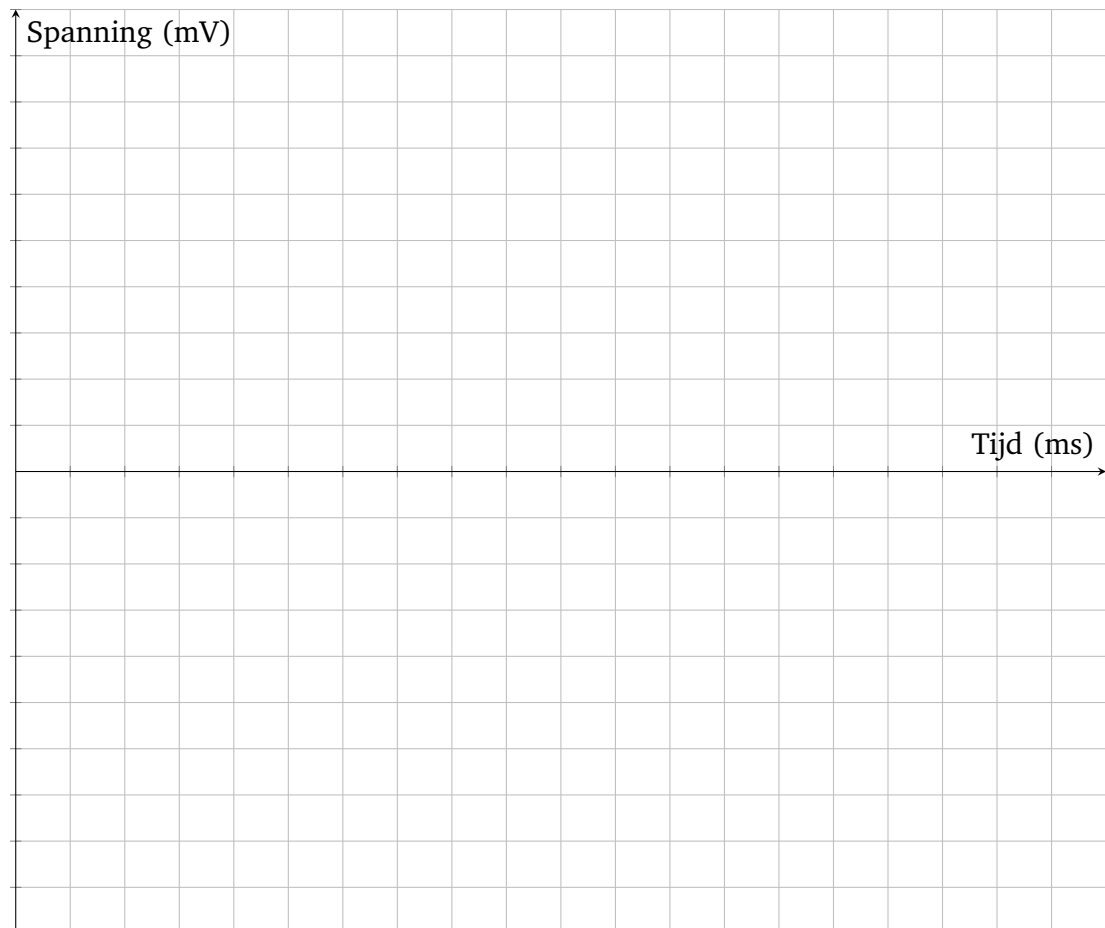
8. Kies voor R_L nu $10 \text{ k}\Omega$. Stel de frequentie van v_s in op basis van **tabel 3**. Vul de tabel verder in. Welke invloed heeft de frequentie op de versterking?

9. Leg uit waarom we C_{in} en C_{out} nodig hebben in deze schakeling:

10. Laat **schakeling 2** opgebouwd op je breadboard staan! Bewaar ook de belastingsweerstand voor de volgende opdrachten!

Tabel 2: Meten aan een belaste uitgang van een common-emitter.

R_L	$V_{in_{pp}}$	$V_{out_{pp}}$ sim	A_v sim	V_{out} meting	A_v meting
open	100 mV				
10 k Ω	100 mV				
2,2 k Ω	100 mV				
1 k Ω	100 mV				
560 Ω	100 mV				
270 Ω	100 mV				
100 Ω	100 mV				

**Figuur 1:** Versterking common emitter met 1 k Ω belasting

Tabel 3: Invloed van de frequentie op de uitgang van een common emitter schakeling.

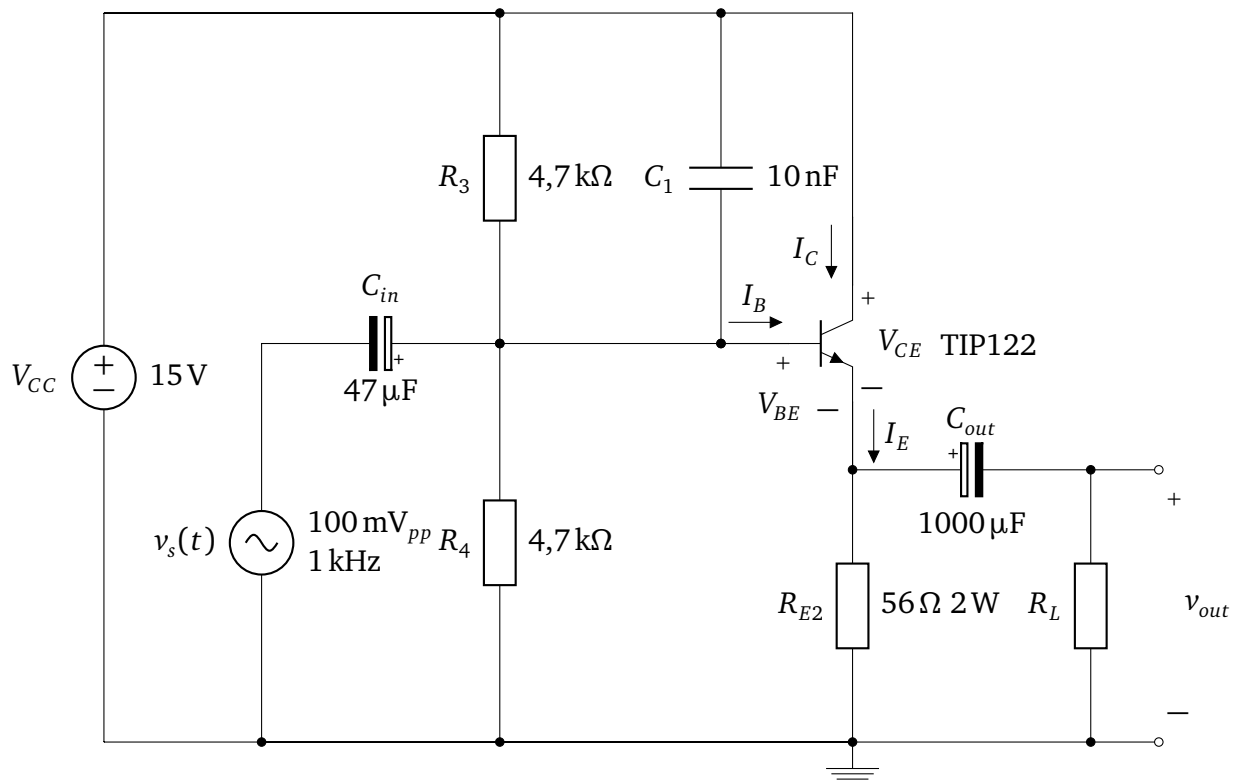
Frequentie	$V_{in_{pp}}$	$V_{out_{pp}}$	A
1 kHz	100 mV		
500 Hz	100 mV		
100 Hz	100 mV		
50 Hz	100 mV		
25 Hz	100 mV		
10 Hz	100 mV		
5 Hz	100 mV		
1 Hz	100 mV		

Conclusie 2

3 De common-collector (*emitter-volger*, *stroomversterker*) schakeling

Schakeling 3 is een common collector (*emitter-follower* of *emitter-volger*) schakeling. Deze schakeling dient niet om de spanning te versterken, maar om het vermogen te vergroten. Een weerstand aan de uitgang zal nu minder invloed hebben op de amplitude van het signaal. Deze schakeling kan dus als een soort buffer worden gebruikt zodat bijvoorbeeld **schakeling 2** minder wordt belast. De versterking van deze schakeling is altijd net iets kleiner dan één, een kleine verzwakking dus. We spreken hierdoor ook wel van een stroomversterker.

De gebruikte TIP122 transistor is een darlington transistor en heeft als eigenschap dat β vele malen groter is dan die van de BC547. Tevens heeft de transistor een andere behuizing (TO-220) dus kan deze meer warmte dissiperen dan de BC547 in een TO-92 behuizing. Wanneer je de schakeling bouwt en de voeding aanzet, let er dan op dat de transistor heet zal worden! Deze schakeling zou in rusttoestand zonder belasting ongeveer 100 mA moeten gebruiken.



Schakeling 3: NPN Transistor in common-collector configuratie

Opdracht 3: De common-collector schakeling

1. Zoek in de datasheet van de TIP122 de waarden voor β (h_{FE}), $V_{BE(on)}$ en $V_{CE(sat)}$ op. Kun je verklaren waarom $V_{BE(on)}$ van de TIP122 (darlington) verschilt van een BC547?

2. Pak de simulatie van **schakeling 3** die je hebt voorbereid erbij. Laat hierbij C_{in} , C_{out} , v_s en R_L nog even weg.
3. Bouw **schakeling 3** op. Laat hierbij C_{in} , C_{out} , v_s en R_L nog even weg. Let op dat de weerstand R_E een vermogensweerstand van minimaal 2 W moet zijn en dus niet een 0,25 W weerstand uit de standaardvoorraad. Condensator C_1 is toegevoegd om oscillatie in deze schakeling te voorkomen. Deze condensator moet direct tussen basis en collector van de TIP122 worden geplaatst (*dus zonder draadjes*). Begrens de stroom van de labvoeding voorlopig op 150 mA om de schakeling te testen.
4. Meet in de simulatie en in je opgebouwde schakeling: V_B , V_{BE} , I_B , I_C , V_{CE} en V_{R_E} en vul **tabel 4** in.
5. Bereken het opgenomen vermogen in de transistor ($P_{TIP122} = V_{CE} \cdot I_{CQ}$):

6. Bereken het opgenomen vermogen in R_E ($P_{R_E} = V_{R_E} \cdot I_{EQ}$):

7. Leg uit waarom dit geen efficiënte versterkerschakeling kan worden:

8. Voeg de condensator C_{in} en de bron v_s toe aan je simulatie en opgebouwde schakeling.
9. Sluit de functiegenerator met behulp van een splitter aan op condensator C_{in} en op kanaal 1 van de oscilloscoop. Sluit kanaal 2 van oscilloscoop aan op de uitgang V_E . Laat C_{out} en R_L nog even weg.
10. Stel kanaal 2 van de oscilloscoop in op *AC coupling*. Meet de uitgangsspanning (V_{pp}) van de versterker.
Bereken de open-klem spanningsversterking $A_{voc} = \frac{V_{outpp}}{V_{inpp}}$. Controleer dit in je simulatie. Vul de eerste rij van **tabel 5** in.

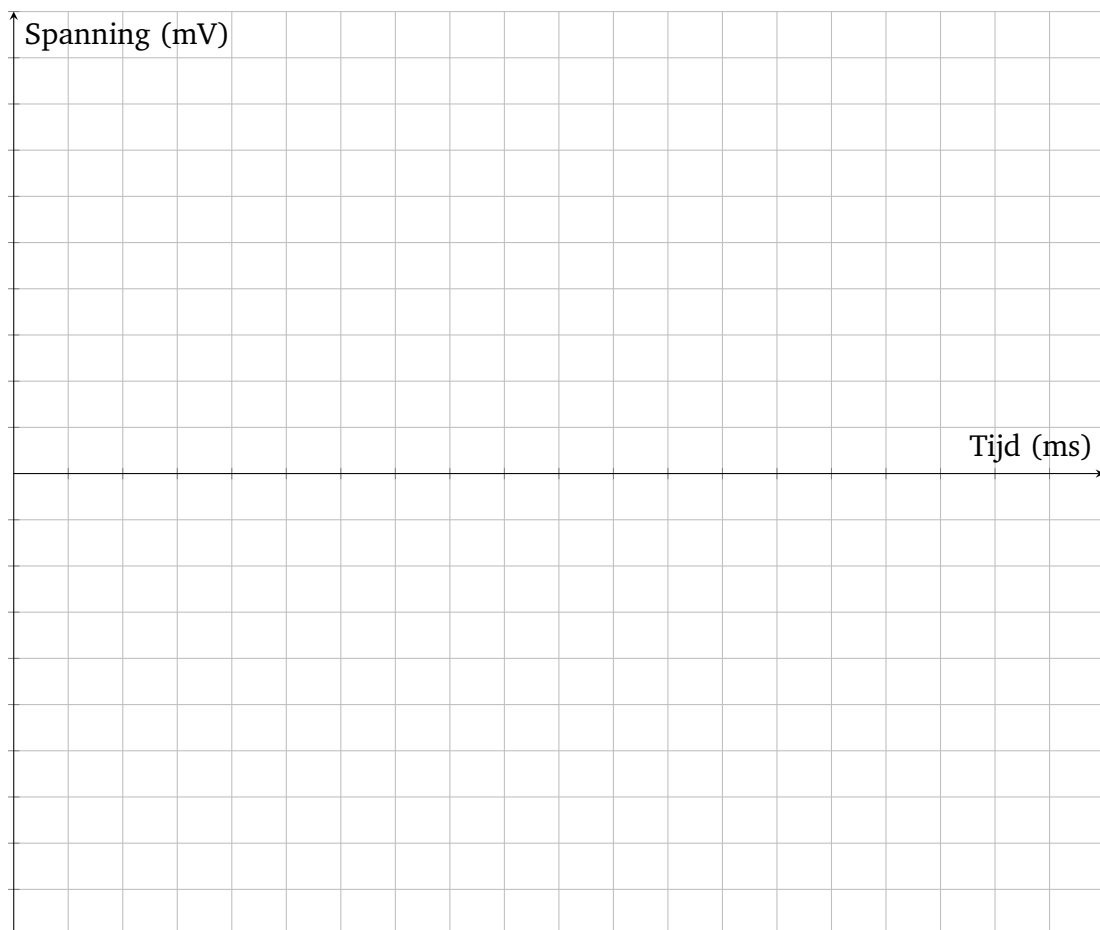
11. Voeg nu de condensator C_{out} en belastingsweerstand R_L toe in je simulatie en opgebouwde schakeling.
12. Kies $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ en teken de signalen v_s en v_{out} in **figuur 2**.
13. Kies op basis van **tabel 5** verschillende waarden voor R_L en vul de tabel in. Welke invloed heeft de belasting op de versterking van deze schakeling?

Tabel 4: DC instellingen van een common-collector schakeling.

	V_B	V_{BE}	I_{BQ}	I_{CQ}	V_{CE}	V_{R_E}
Simulatie:						
Meting						

Tabel 5: Meten aan een belaste uitgang van een common-collector schakeling.

R_L	$V_{in_{pp}}$	$V_{out_{pp}}$ sim	A_v sim	V_{out} meting	A_v meting
open	100 mV				
10 k Ω	100 mV				
2,2 k Ω	100 mV				
1 k Ω	100 mV				
560 Ω	100 mV				
270 Ω	100 mV				
100 Ω	100 mV				

**Figuur 2:** Versterking common collector met 1 k Ω belasting

Conclusie 3

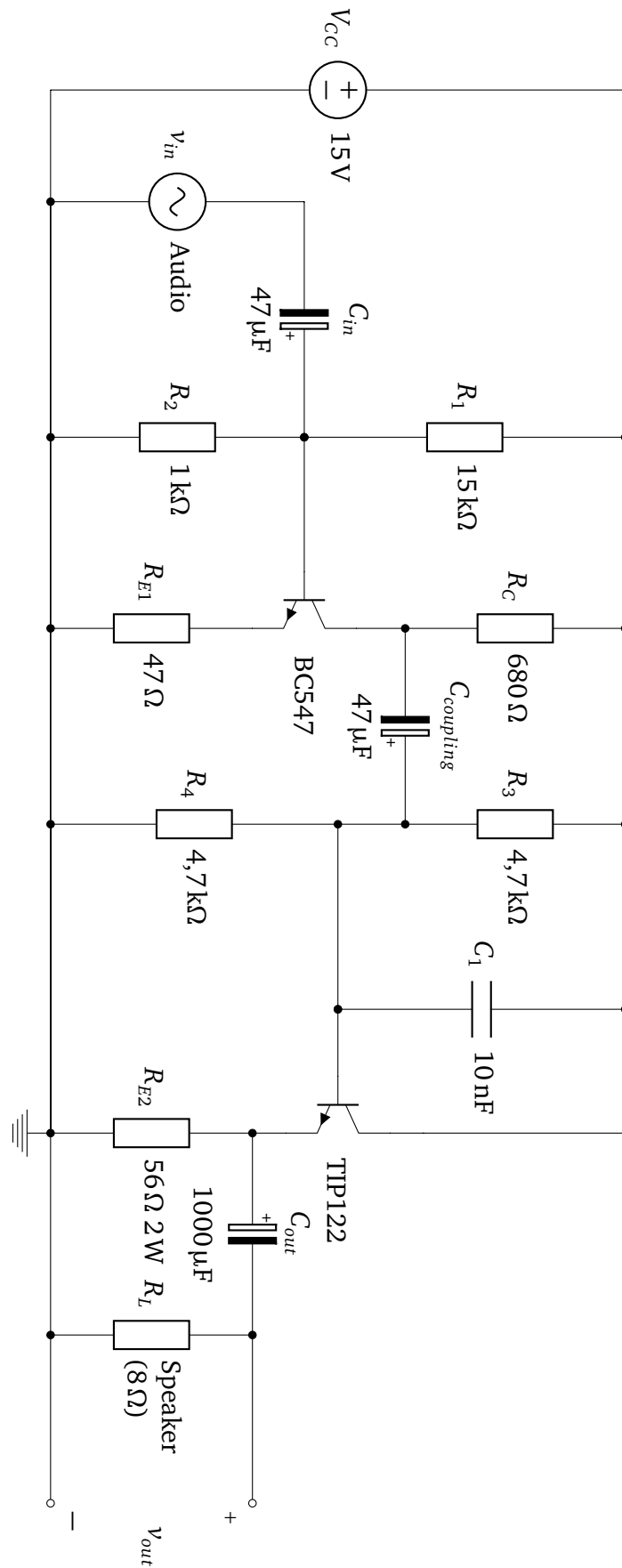
4 Klasse A versterker

In deze opdracht sluiten we **schakeling 3** aan op **schakeling 2** zoals weergegeven in **schakeling 4**. We gebruiken de eigenschappen van beide versterkers om elkaar aan te vullen op de individuele beperkingen.

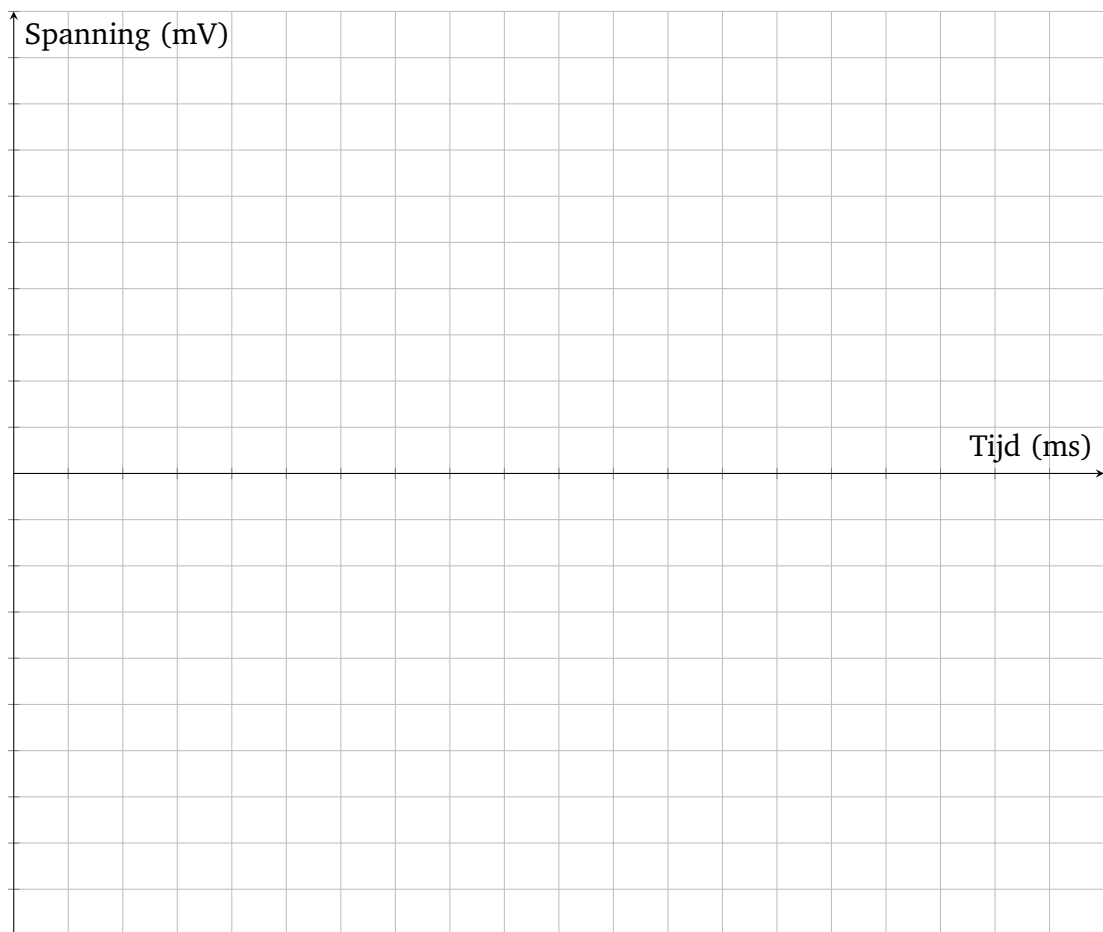
Opdracht 4: Een complete klasse-A versterker

1. Pak de simulatie van **schakeling 4** die je hebt voorbereid erbij en bouw de schakeling op.
2. Wat is de open-klem versterking van de totale schakeling? (*Hints: $A_{voc} = \frac{v_{outoc}}{v_{in}}$, probeer niet aan een open condensator te meten, maar stel de oscilloscoop correct in op basis van de voorgaande opdrachten.*)
3. Kies $R_L = 1\text{ k}\Omega$ en teken de signalen v_s en v_{out} in **figuur 3**.
4. Wat gebeurt er als we de belasting veranderen? Vul **tabel 6** in.
5. Sluit nu een speaker aan op de uitgang van je versterker. Wordt het signaal van 1 kHz goed versterkt of zijn er vervormingen?
6. Gebruik de PC (of als je dat aandurft je telefoon) als ingang om een audiosignaal aan te sluiten in plaats van de functiegenerator op v_s en kies je favoriete muziek. Klinkt de muziek goed? Bij welk volume treedt er vervorming (*clipping*) op?
7. Demonstreer je versterker aan een docent als je laat aftekenen! *Dus laat je schakeling intact voor het aftekenen!*

Gefeliciteerd, je hebt nu een klasse A audio versterker gebouwd! Het grote nadeel van een klasse A versterker is het benodigde vermogen om de transistors halverwege in geleiding te brengen. Zoals je hebt gemerkt wordt de TIP122 vrij warm! Er bestaan efficiëntere oplossingen zoals een push-pull stage aan de output. Er bestaan veel mogelijke varianten met een push-pull stage. Een uitgebreid voorbeeld van een klasse D versterker wordt op dit moment behandeld in de derdejaars cursus ANE20. Als je wilt kun je deze bekijken op de wiki: https://bitbucket.org/HR_ELEKTRO/ane20/wiki/Home, theorie week3 en lab 3.



Schakeling 4: Totale versterker schakeling



Figuur 3: Versterking klasse A versterker met $1\text{ k}\Omega$ belasting

Tabel 6: Meten aan een belaste uitgang van een klasse A versterkerschakeling.

R_L	$V_{in_{pp}}$	$V_{out_{pp}}$ sim	A_v sim	V_{out} meting	A_v meting
open	100 mV				
$10\text{ k}\Omega$	100 mV				
$2,2\text{ k}\Omega$	100 mV				
$1\text{ k}\Omega$	100 mV				
$560\ \Omega$	100 mV				
$270\ \Omega$	100 mV				
$100\ \Omega$	100 mV				
$8\ \Omega$ speaker	100 mV				

Conclusie 4

5 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?