

Naam: Klas: Studentnummer:

Inleiding

In dit practicum gaan we kennis maken met filters. Zowel passieve filters (filters met alleen weerstanden, condensatoren en spoelen) als actieve filters (filters met halfgeleiders) komen aan bod.

Leerdoelen

- Eerste orde passieve filters met weerstanden, condensatoren en spoelen kunnen benoemen, simuleren, doorrekenen en hieraan te kunnen meten zodat de eigenschappen van deze filters kunnen worden bepaald.
- Kunnen rekenen met decibellen en hiermee een bodeplot maken aan de hand van simulaties en metingen.
- De verschillen tussen passieve en actieve filters kunnen benoemen.
- De eigenschappen van een tweede orde filter kunnen meten aan de hand van twee achter elkaar geschakelde eerste orde actieve filters.

Vorbereiding op de les

- Lees Hambley §6.2, §6.3, §6.4, §6.5 en §13.10 door.
- Lees **hoofdstuk 1** van deze practicumhandleiding door.
- Simuleer **schakeling 1**, **schakeling 2**, **schakeling 3**, **schakeling 4**, **schakeling 5** en **schakeling 6** en bekijk de bodeplots in de simulatie zoals beschreven in **paragraaf 1.2**.

1 RC filterschakelingen

Met een condensator en een weerstand kan een passief filter worden gemaakt. In feite zijn de passieve filters niets anders dan spanningsdelers. Bij een normale spanningsdeler wordt de uitgangsspanning bepaald door de verhouding van de weerstandswaarden. Bij een RC filter werkt dit net zo, echter in plaats van twee weerstanden wordt één weerstand en één condensator gebruikt. Omdat een condensator een frequentie afhankelijke weerstand (impedantie) heeft, kunnen we hier een frequentie afhankelijke spanningsdeler mee maken. De impedantie Z_C van een condensator wordt bepaald met:

$$Z_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1)$$

De formules voor de spanningsdeling en spanningsversterking in **schakeling 1** worden dan:

$$v_o = \frac{Z_C}{R + Z_C} \cdot v_{in} = \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \cdot v_{in} \quad A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{Z_C}{R + Z_C} = \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \quad (2)$$

De amplitude van het signaal op de uitgang v_o is dus afhankelijk van de frequentie van hetingangssignaal v_{in} . Ook treedt er een faseverschuiving op.

Een speciale en belangrijke frequentie bij filters is de kantelfrequentie f_B . Dit is de frequentie waarbij het **vermogen** aan de uitgang **gehalveerd** is,

$$P_o = \frac{v_o^2}{R} \quad P_{in} = \frac{v_{in}^2}{R} \quad (3)$$

$$\frac{P_o}{P_{in}} = \frac{\left(\frac{v_o^2}{R}\right)}{\left(\frac{v_{in}^2}{R}\right)} = \frac{v_o^2}{v_{in}^2} = \left(\frac{v_o}{v_{in}}\right)^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow A_{v_{f_B}} = \frac{v_o}{v_{in}} = \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \sqrt{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (4)$$

oftewel de spanning op de uitgang is afgenomen met $\sqrt{2}$ ten opzichte van de ingang. Op het kantelpunt f_B geldt dus: $v_o = \frac{v_{in}}{\sqrt{2}}$.

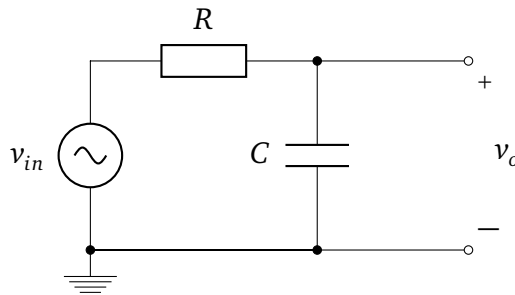
Door **vergelijking (2)** en **vergelijking (4)** te combineren,

$$\left|A_{v_{f_B}}\right| = \left|\frac{v_o}{v_{in}}\right| = \left|\frac{Z_C}{R + Z_C}\right| = \left|\frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

en hieruit ω , en dus ook indirect f te isoleren vinden we een formule voor de kantelfrequentie f_B :

$$f_B = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (6)$$

De uitwerking van deze afleiding wordt in de theorielessen behandeld.



Schakeling 1: Een RC spanningsdeler

1.1 Decibel en bodeplots

Meestal wordt de versterking van een schakeling uitgedrukt in decibel (dB). De *Bel* is een logaritmische schaal om vermogensverhoudingen $\frac{P_o}{P_{in}}$ in uit te drukken. Om hier vervolgens decibellen van te maken moeten we dit vermenigvuldigen met 10. *Vergelijk: 1 meter is gelijk aan 10 decimeter.*

$$A = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_o}{P_{in}} \right) \quad (7)$$

Omdat we vaak liever rekenen met spanningen dan vermogens gaan we dit net als in **vergelijking (4)** weer omzetten naar spanningen:

$$A = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_o}{P_{in}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\left(\frac{v_o^2}{R} \right)}{\left(\frac{v_{in}^2}{R} \right)} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{v_o}{v_{in}} \right)^2 \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{v_o}{v_{in}} \right) \quad (8)$$

Om de eigenschappen van filterschakelingen weer te geven worden vaak bodediagrammen of bodeplots gebruikt. Dit is een grafiek waarbij we de frequentie van hetingangssignaal (vaak met een logaritmische schaalverdeling) uitzetten tegen de versterking in dB. Een voorbeeld van de opbouw van een dergelijke grafiek vind je in **figuur 2**.

1.2 Bodeplots in een simulatie

Ook in de simulatie kunnen we een dergelijke grafiek maken. Bijvoorbeeld in LTspice kunnen we in plaats van een *transient* analyse (hoe gedraagt de schakeling zich als de **tijd** verandert) een AC analyse doen (hoe gedraagt de schakeling zich als de **frequentie** verandert). Je kunt dit doen door:

- Bij de instellingen van je bron v_{in} bij *Small signal AC analysis* in het vakje *AC Amplitude* een 1 in te vullen. Hiermee is deze bron een referentiepunt geworden, want:
 $20 \cdot \log_{10}(1) = 0 \text{ dB}$, oftewel geen versterking en geen verzwakking.
- Te klikken met de rechtermuisknop op het simulatiecommando en te gaan naar het tabblad *AC Analysis*. Hier vul je bijvoorbeeld in:
 - *Type of sweep*: Decade
 - *Number of points per decade*: 1000
 - *Start frequency*: 1
 - *Stop frequency*: 1000k

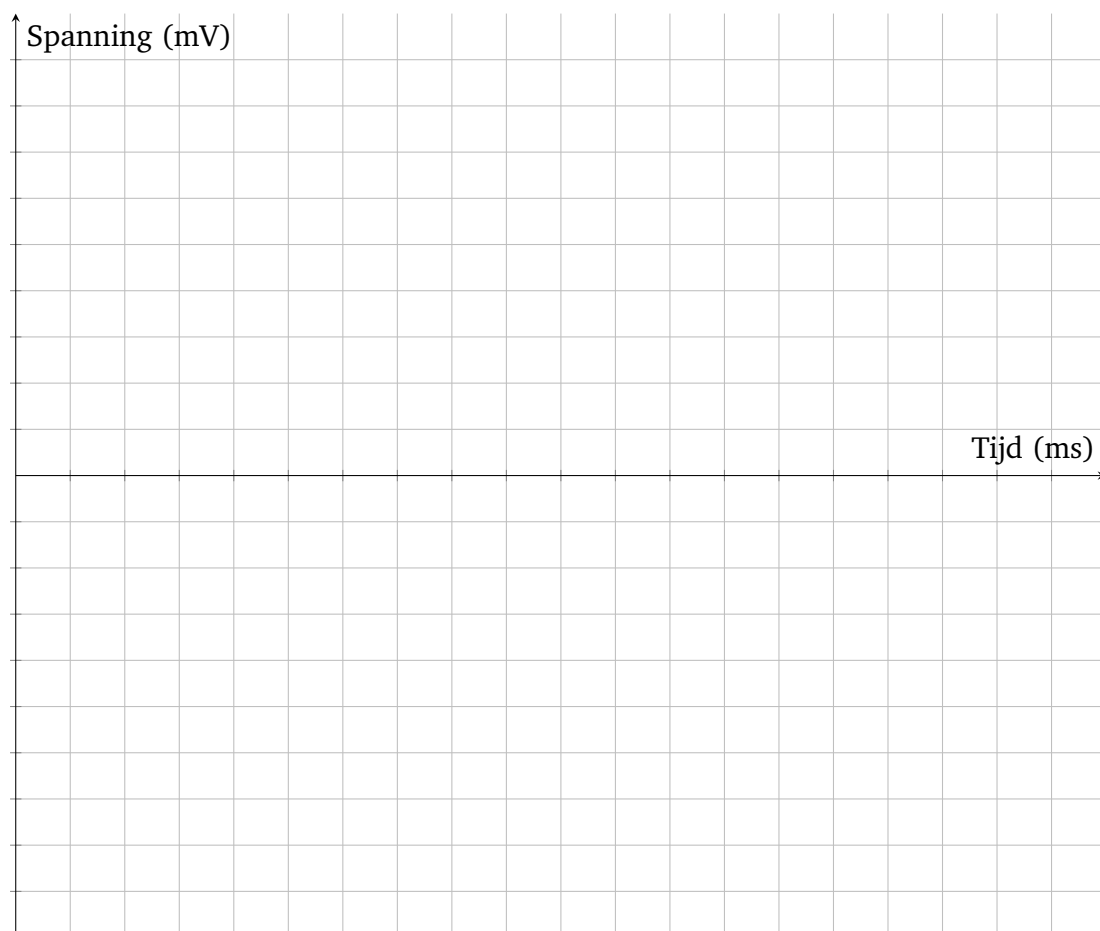
Opdracht 1: Een RC filterschakeling

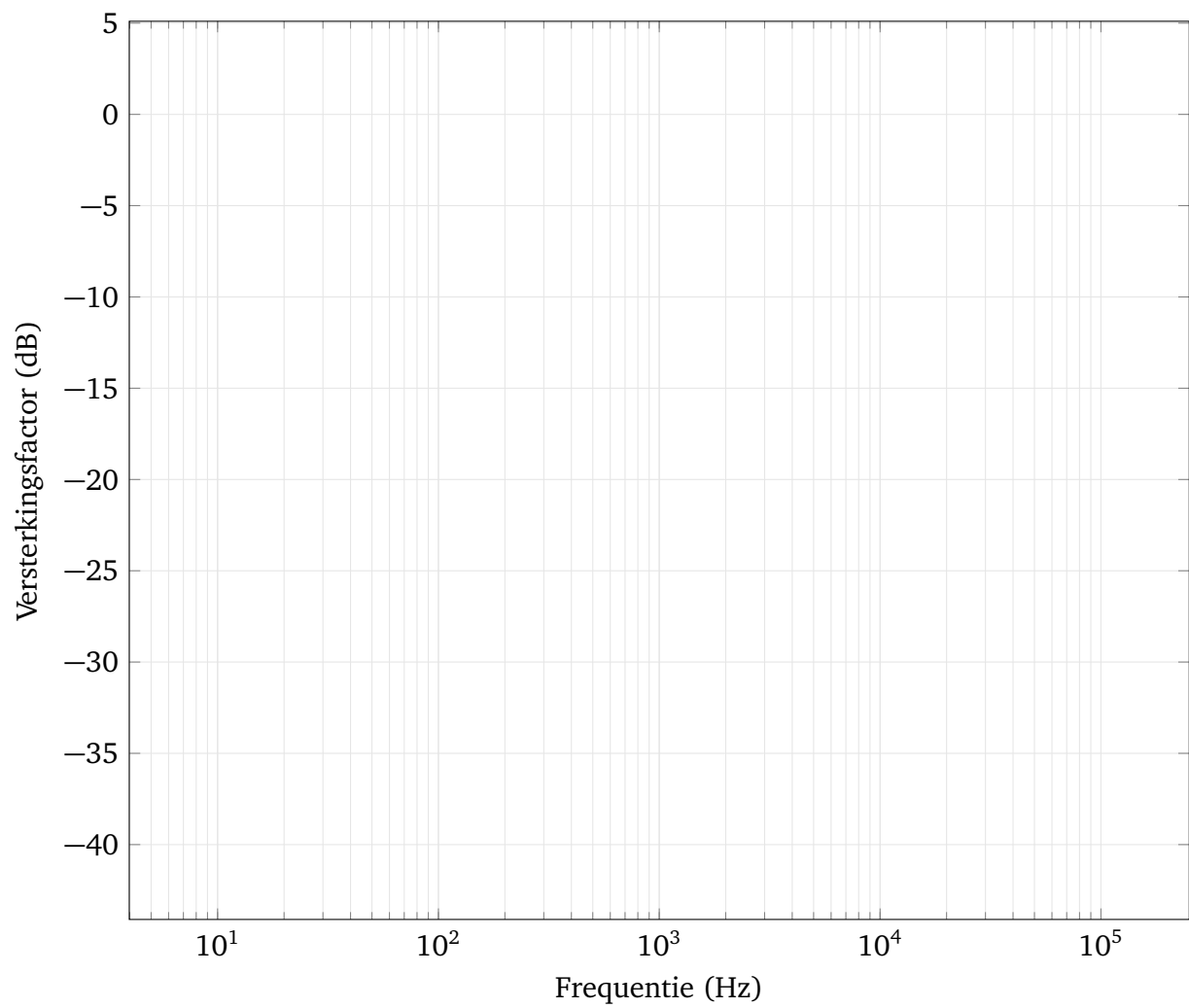
1. Bekijk **schakeling 1**. Gebruik $C = 100 \text{ nF}$ en $R = 1 \text{ k}\Omega$. Vul in **tabel 1** v_o (ber.) en de verhouding $A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$ in. Bereken ook de verhouding A_v in dB.
2. Pak de simulatie van **schakeling 1** die je hebt voorbereid erbij. Vul in **tabel 1** v_o (gesim.) in.
3. Bouw **schakeling 1** op en meet de waarden na. Vul in **tabel 1** v_o (gemeten) in. Komen de waarden overeen?
4. Teken in **figuur 2** de gemeten punten uit **tabel 1** en trek hier een lijn doorheen. Zorg voor een duidelijke legenda.
5. Vergelijk je de lijn met de bodeplot uit simulatie. Komt dit overeen?
6. Wat is de kantelfrequentie f_B van deze schakeling? Klopt dit met je meting en simulatie?
7. Teken v_{in} en v_o op de kantelfrequentie f_B in **figuur 1**.
8. Hoe groot is de faseverschuiving tussen v_{in} en v_o op de kantelfrequentie f_B ?
9. Met een RC-filter kun je een hoogdoorlaatfilter (*high pass filter*) of een laagdoorlaatfilter (*low pass filter*) bouwen. Welk type filter is dit?

Conclusie 1

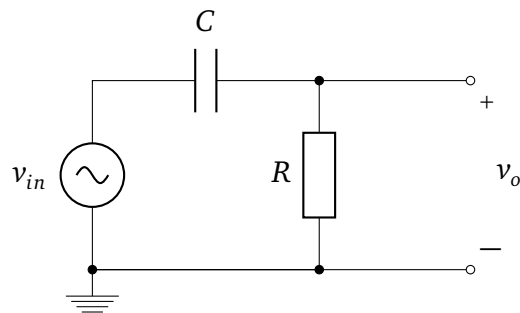
Tabel 1: Berekeningen en metingen aan een RC spanningsdeler

Frequentie	v_{in} (V)	v_o (V) (ber.)	$A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$	A_v (dB)	v_o (V) (gesim.)	v_o (V) (gemeten)
10 Hz	1 V					
100 Hz	1 V					
1 kHz	1 V					
1,59 kHz	1 V					
10 kHz	1 V					
100 kHz	1 V					

**Figuur 1:** Signalen op de kantelfrequentie van een RC filter



Figuur 2: Bodeplot filters met een condensator



Schakeling 2: Een CR spanningsdeler

Opdracht 2: Omgekeerd RC filter

1. Bekijk **schakeling 2**. Gebruik $C = 100 \text{ nF}$ en $R = 1 \text{ k}\Omega$. Vul in **tabel 2** v_o (ber.) en de verhouding $A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$ in. Bereken ook de verhouding A_v in dB.
2. Pak de simulatie van **schakeling 2** die je hebt voorbereid erbij. Vul in **tabel 2** v_o (gesim.) in.
3. Bouw **schakeling 1** op en meet de waarden na. Vul in **tabel 2** v_o (gemeten) in. Komen de waarden overeen?
4. Teken in **figuur 2** de gemeten punten uit **tabel 2** en trek hier een lijn doorheen. Zorg voor een duidelijke legenda.
5. Vergelijk je de lijn met de bodeplot uit simulatie. Komt dit overeen?
6. Wat is de kantelfrequentie f_B van deze schakeling? Klopt dit met je meting en simulatie?
7. Hoe groot is de faseverschuiving tussen v_{in} en v_o op de kantelfrequentie f_B ?
8. Met een RC-filter kun je een hoogdoorlaatfilter (*high pass filter*) of een laagdoorlaatfilter (*low pass filter*) bouwen. Welk type filter is dit?

Conclusie 2**Tabel 2:** Berekeningen en metingen aan een CR spanningsdeler

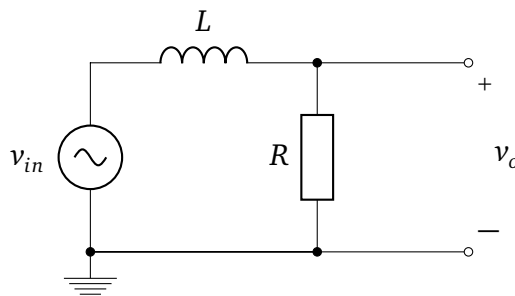
Frequentie	v_{in} (V)	v_o (V) (ber.)	$A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$	A_v (dB)	v_o (V) (gesim.)	v_o (V) (gemeten)
10 Hz	1 V					
100 Hz	1 V					
1 kHz	1 V					
1,59 kHz	1 V					
10 kHz	1 V					
100 kHz	1 V					

2 RL filterschakelingen

Bekijk **schakeling 3**. Een spoel heeft net als een condensator een frequentieafhankelijke karakteristiek. Bij een spoel is de impedantie:

$$Z_L = j \cdot \omega \cdot L \quad (9)$$

Hiermee kunnen we rekenen zoals we al eerder met de condensator hebben gedaan.



Schakeling 3: LR spanningsdeler

Opdracht 3: LR filter

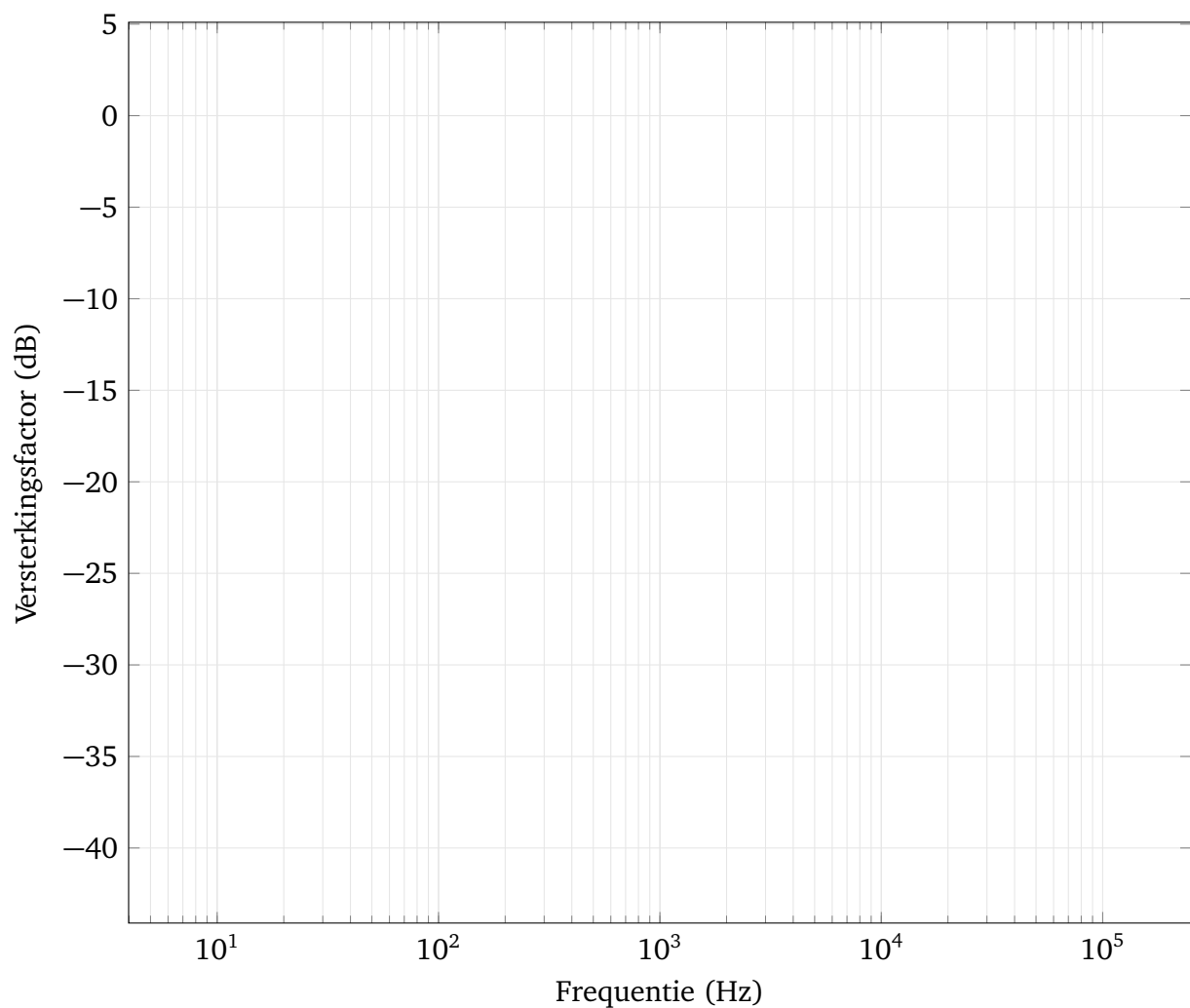
1. Bepaal de formules voor de spanningsdeler in **schakeling 3**:
2. Bereken met de formules voor spanningsdeling de kantelfrequentie f_B als $L = 22 \text{ mH}$ en $R = 1 \text{ k}\Omega$:
3. Vul in **tabel 3** v_o (ber.) en de verhouding $A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$ in. Bereken ook de verhouding A_v in dB.
4. Pak de simulatie van **schakeling 3** die je hebt voorbereid erbij. Vul in **tabel 3** v_o (gesim.) in.
5. Bouw **schakeling 3** op en meet de waarden na. Vul in **tabel 3** v_o (gemeten) in. Komen de waarden overeen?

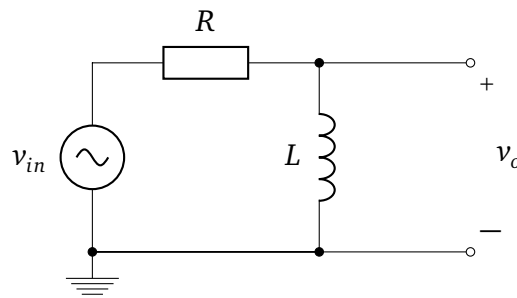
6. Teken in **figuur 3** de gemeten punten uit **tabel 3** en trek hier een lijn doorheen. Zorg voor een duidelijke legenda.
7. Vergelijk je de lijn met de bodeplot uit simulatie. Komt dit overeen?
8. Wat is de kantelfrequentie f_B van deze schakeling? Klopt dit met je meting en simulatie?
9. Hoe groot is de faseverschuiving tussen v_{in} en v_o op de kantelfrequentie f_B ?
10. Met een RL-filter kun je een hoogdoorlaatfilter (*high pass filter*) of een laagdoorlaatfilter (*low pass filter*) bouwen. Welk type filter is dit?

Conclusie 3

Tabel 3: Berekeningen en metingen aan een LR spanningsdeler

Frequentie	v_{in} (V)	v_o (V) (ber.)	$A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$	A_v (dB)	v_o (V) (gesim.)	v_o (V) (gemeten)
10 Hz	1 V					
100 Hz	1 V					
1 kHz	1 V					
10 kHz	1 V					
100 kHz	1 V					
	1 V		$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	-3		

**Figuur 3:** Bodeplot filters met een spoel

**Schakeling 4:** RL spanningsdeler**Opdracht 4: Omgekeerd LR filter**

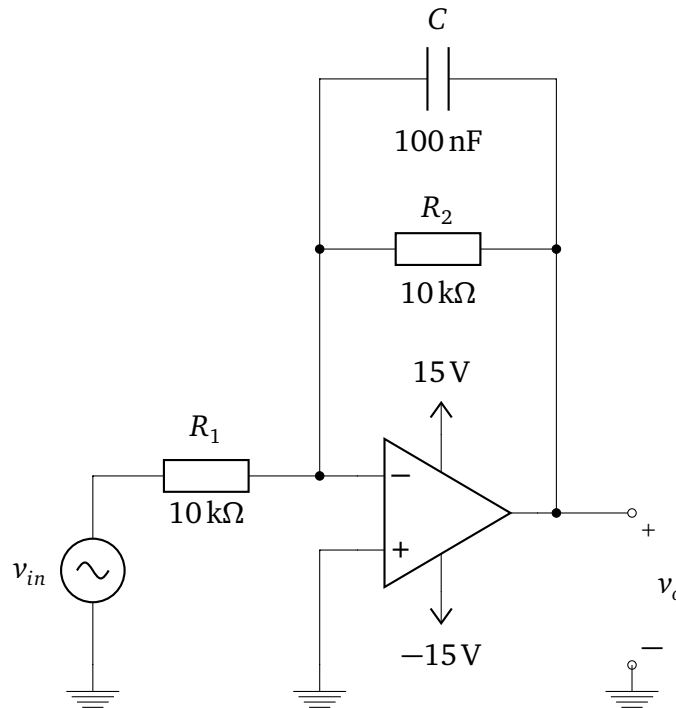
1. Verwissel nu de spoel en weerstand zoals in **schakeling 4**.
2. Vul in **tabel 4** v_o (ber.) en de verhouding $A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$ in. Bereken ook de verhouding A_v in dB.
3. Pak de simulatie van **schakeling 4** die je hebt voorbereid erbij. Vul in **tabel 4** v_o (gesim.) in.
4. Bouw **schakeling 4** op en meet de waarden na. Vul in **tabel 4** v_o (gemeten) in. Komen de waarden overeen?
5. Teken in **figuur 3** de gemeten punten uit **tabel 4** en trek hier een lijn doorheen. Zorg voor een duidelijke legenda.
6. Vergelijk je de lijn met de bodeplot uit simulatie. Komt dit overeen?
7. Wat is de kantelfrequentie f_B van deze schakeling? Klopt dit met je meting en simulatie?
8. Hoe groot is de faseverschuiving tussen v_{in} en v_o op de kantelfrequentie f_B ?
9. Met een RL-filter kun je een hoogdoorlaatfilter (*high pass filter*) of een laagdoorlaatfilter (*low pass filter*) bouwen. Welk type filter is dit?

Conclusie 4**Tabel 4:** Berekeningen en metingen aan een LR spanningsdeler

Frequentie	v_{in} (V)	v_o (V) (ber.)	$A_v = \frac{v_o}{v_{in}}$	A_v (dB)	v_o (V) (gesim.)	v_o (V) (gemeten)
10 Hz	1 V					
100 Hz	1 V					
1 kHz	1 V					
10 kHz	1 V					
100 kHz	1 V					
	1 V		$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	-3		

3 Actieve filters

Na een aantal passieve filters te hebben bekeken kijken we nu naar actieve filters. Actieve filters hebben een aantal voordelen. Een passief filter kan alleen maar verzwakken, een actief filter kan ook versterken. Een passief filter heeft altijd een uitgangsimpedantie die relatief hoog ligt, een actief filter kan een zeer lage uitgangsimpedantie behalen. In **schakeling 5** zie je een vrij eenvoudig actief filter.



Schakeling 5: Actief laagdoorlaat filter

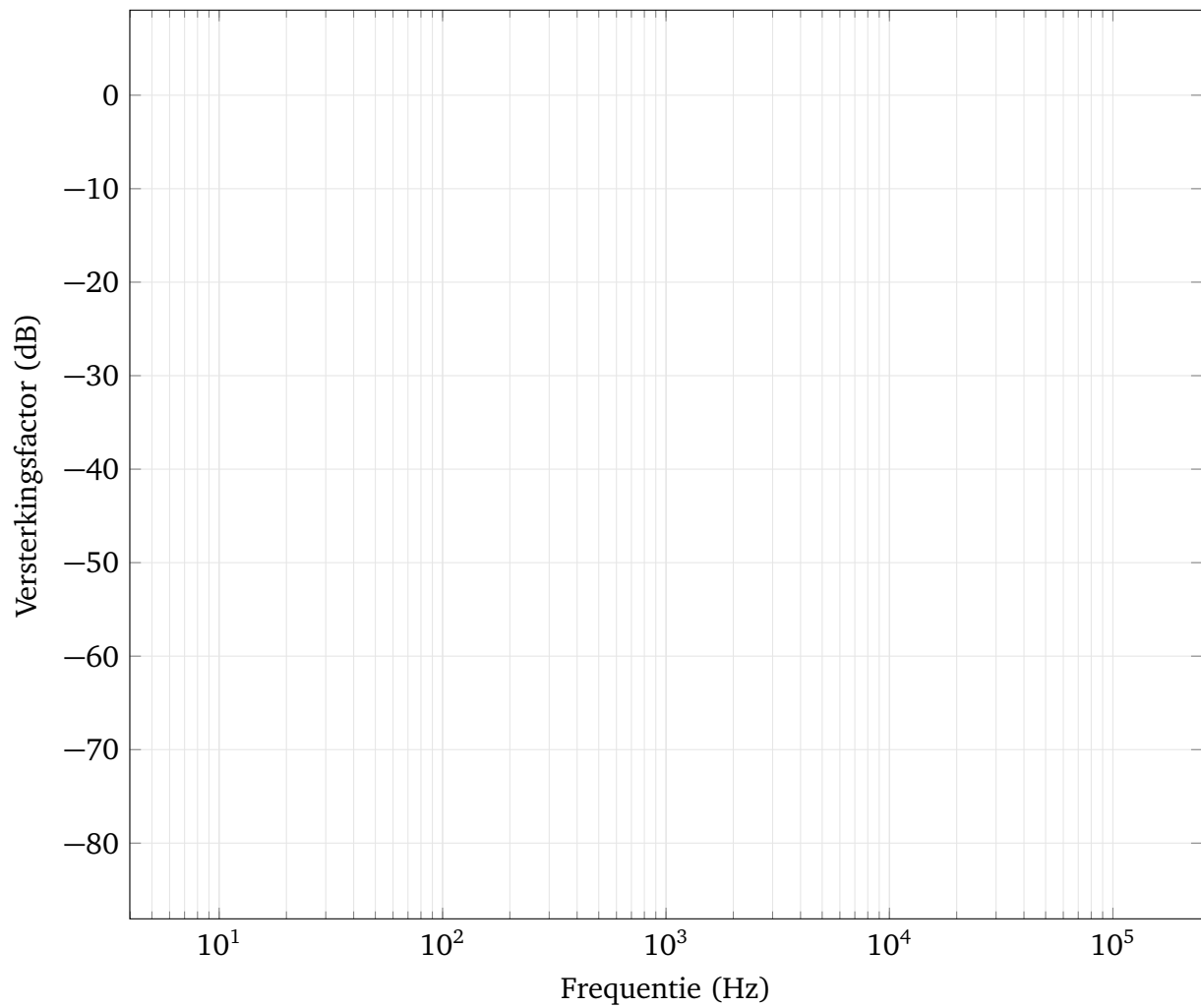
Opdracht 5: Actief laagdoorlaat filter

1. Pak de simulatie van **schakeling 5** die je hebt voorbereid erbij. Bekijk de bodeplot van dit filter.
2. Bouw **schakeling 5** op, en vul van **tabel 5** de eerste 2 kolommen in.
3. Teken de bodeplot in **figuur 4**. Zorg voor een duidelijke legenda.
4. Vervang R_2 met een weerstand van $39\text{ k}\Omega$. Meet nu nogmaals en vul de laatste 2 kolommen van **tabel 5** in.
5. Teken ook deze bodeplot in **figuur 4**. Zorg voor een duidelijke legenda.

Conclusie 5

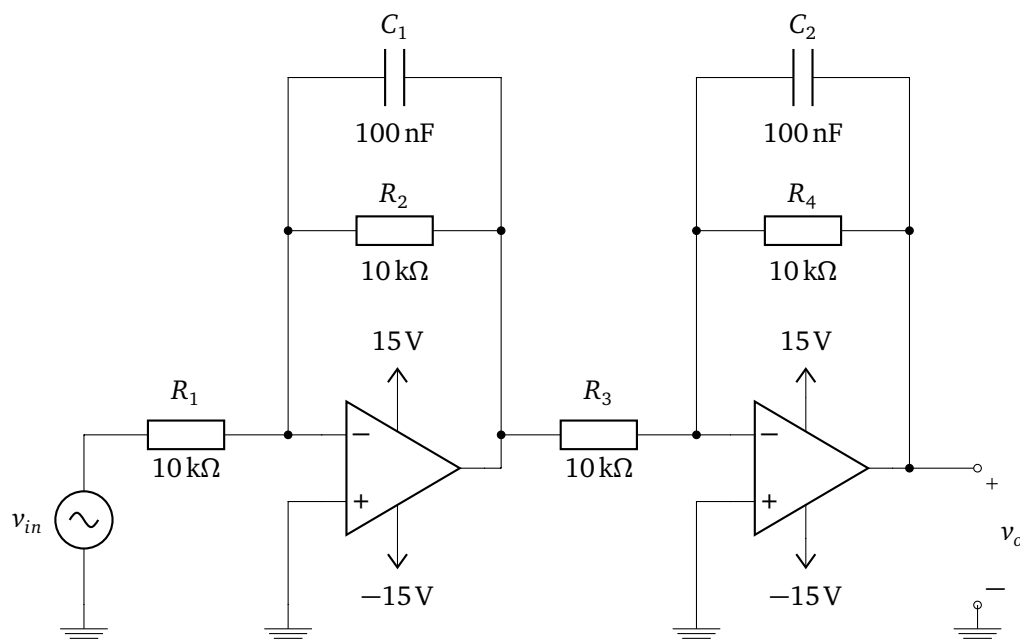
Tabel 5: Metingen aan een actief filter

Frequentie	v_{in} (V)	v_o (V)	A_v (dB)	v_o (V)	A_v (dB)
10 Hz	1 V				
100 Hz	1 V				
1 kHz	1 V				
10 kHz	1 V				
100 kHz	1 V				

**Figuur 4:** Bodeplot van een eerste orde en tweede orde actief filter.

4 Een tweede orde actief filter

Soms is de demping die we kunnen krijgen met een 1e orde filter (alle filters tot nu toe) niet voldoende om stoorsignalen genoeg te onderdrukken. Wat we kunnen doen is filters achter elkaar plaatsen, hierdoor krijgen we een beter filter (demping op demping). Passieve filters kunnen we niet zomaar achter elkaar zetten, want elk filter verzwakt het originele signaal iets. Daarnaast hebben passieve filters een vrij hoge uitgangsimpedantie, welke steeds hoger wordt naarmate er meer filters achter elkaar worden gezet. Met actieve filters kunnen we dit voorkomen. In **schakeling 6** zie je twee actieve filters achter elkaar.



Schakeling 6: Actief 2^e orde laagdoorlaat filter

Opdracht 6: Actief 2^e orde filter

1. Bouw **schakeling 6** op en vul tabel **tabel 6** in.
2. Teken de bodeplot in **figuur 4**. Zorg voor een duidelijke legenda. Vergelijk je bodeplot met de simulatie. Kun je de verschillen bij hogere frequenties verklaren?
3. Beschrijf de verschillen tussen een eerste orde en een tweede orde filter.

Conclusie 6**Tabel 6:** Metingen aan een 2^e orde filter

Frequentie	v_{in} (V)	v_o (V)	A_v (dB)
10 Hz	1 V		
100 Hz	1 V		
1 kHz	1 V		
10 kHz	1 V		
100 kHz	1 V		

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?