

Naam: Klas: Studentnummer:

Inleiding

Deze week gaan we een complete klasse-D amplifier bouwen. In tegenstelling tot een klasse-A of klasse-AB versterker, is een klasse-D versterker een versterker die met PWM signalen werkt. Dat wil zeggen: het audiosignaal wordt omgezet in een blokgolf waarvan de duty-cycle varieert met de amplitude van het ingangssignaal. Deze blokgolf schakelt de eindtransistoren aan en uit. In figuur 1 wordt het blokschema gegeven van een klasse-D amplifier. Deze gaan we stap voor stap opbouwen.

Leerdoelen

- Uit discrete componenten een klasse-D versterker kunnen bouwen.
- De diverse deelsystemen voor een klasse-D versterker kunnen dimensioneren
- Metingen kunnen verrichten aan een klasse-D versterker

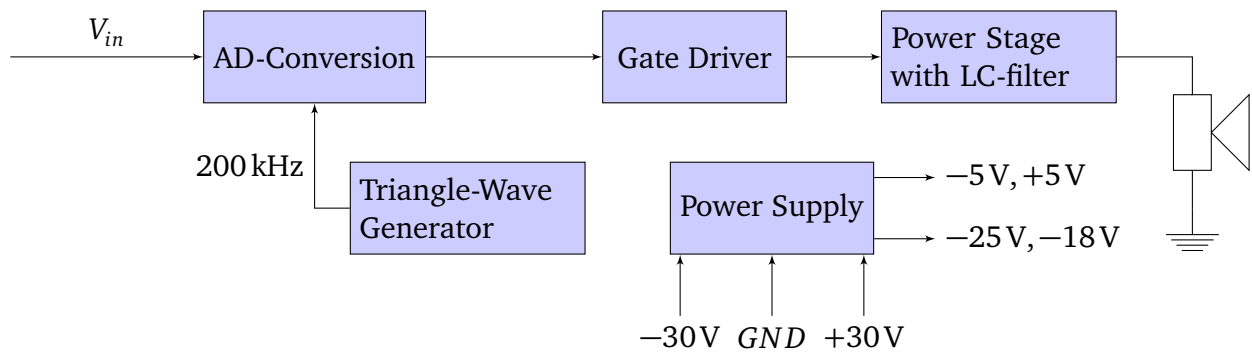
Vorbereiding op de les

LET OP: Dit is een grote opdracht, waar je veel voorbereidingstijd voor nodig hebt. Zonder voorbereiding heb je GEEN toegang tot het practicum. Dit wordt bij aanvang van het practicum gecontroleerd.

LET OP: De opbouw van deze schakeling op een breadboard is kritisch! Gebruik zo kort mogelijke verbindingen en plaats ontkoppelcondensatoren zo dicht mogelijk bij pinnen van ICs. Knip draden van componenten af, zodat ze plat op het breadboard komen te liggen en gebruik niet meer dan 1 breadboard voor de gehele schakeling.

Tabel 1: Vorbereiding checklist

Opdracht nr.	Vorbereiding	Gedaan?	Docent check
1.a	LT-Spice simulatie + vragen		
1.b	Koelblokberekening+ vragen		
2.a	LT-Spice simulatie + vragen		
3.a - 3.b	Berekening filter (R_1 , C_3)		
3.c	LT-Spice simulatie + vragen		
4.a - 4.e	LT-Spice simulatie + bereken R_{delay} en C_B		
5.a - 5.b	Berekening filter		
5.c - 5.d	LT-Spice simulatie + berekening spoel L_1		

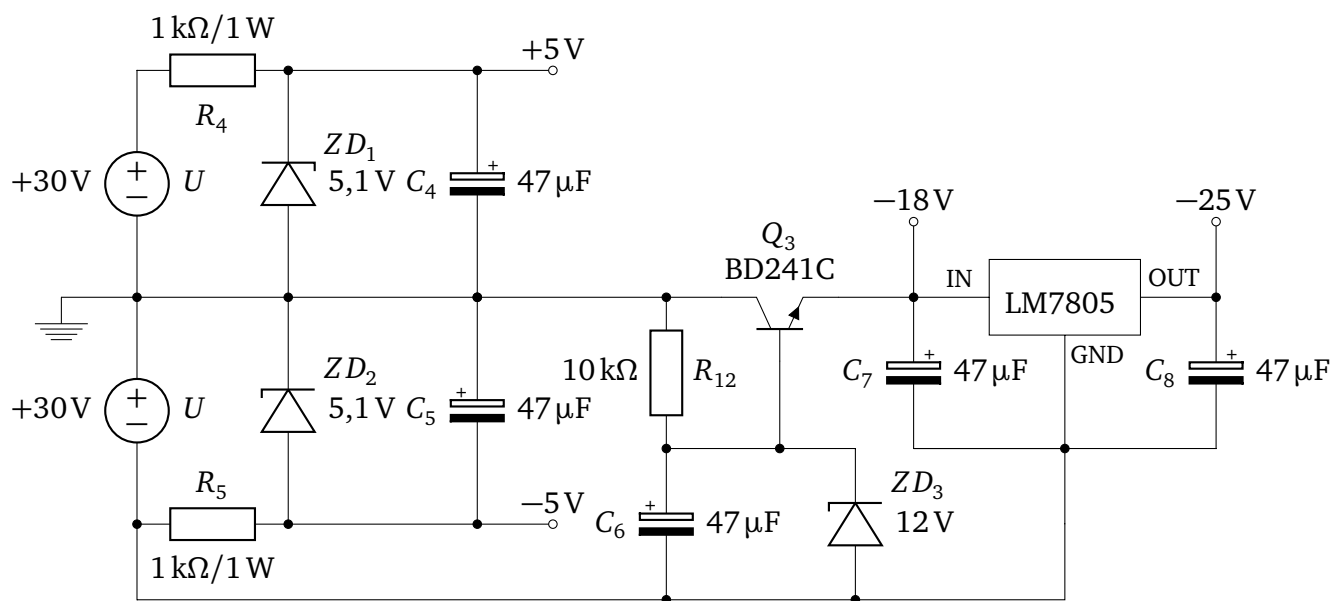


Figuur 1: Blokschema van een klasse-D versterker

Opdrachten

Power Supply

We beginnen met de opbouw van de power-supply voor de klasse-D versterker. De voeding krijgt +30 V en -30 V binnen (gebruik hier een labvoeding voor) en maakt hier +5 V en -5 V voor de voedingsspanning van de opamp. Daarnaast is -25 V en -18 V nodig voor de gate-driver.



Schakeling 1: Voeding voor de klasse-D versterker

Opdracht 1: Bouwen van voeding voor de klasse-D versterker

- a) Simuleer schakeling 1 in LT-Spice en beantwoord hiermee de volgende vragen:
- Wat is de maximale stroom die uit de +5 V en -5 V uitgangen gehaald kan worden?
 - Leg uit hoe de -18 V voedingsspanning gerealiseerd wordt.
 - Leg uit hoe de -25 V voedingsspanning gerealiseerd wordt. Waarom wordt hier geen LM7905 gebruikt?

- b) Wat is de functie van transistor Q_3 ? Als door deze transistor een stroom van 100 mA gaat lopen, wat is dan de dissipatie in deze transistor? Hoeveel mag deze transistor maximaal dissiperen volgens de datasheet? Bepaal op basis hiervan hoe groot het koelblok moet zijn.
- c) Gebruik schakeling 1 nu om de voedingsspanningen voor de klasse-D versterker op te bouwen. Zorg ervoor dat Q_3 van een koelblokje voorzien wordt.
- d) Controleer de correcte werking van de gerealiseerde spanningen -5 V , $+5\text{ V}$, -18 V en -25 V en noteer de gemeten waarden in tabel 2.

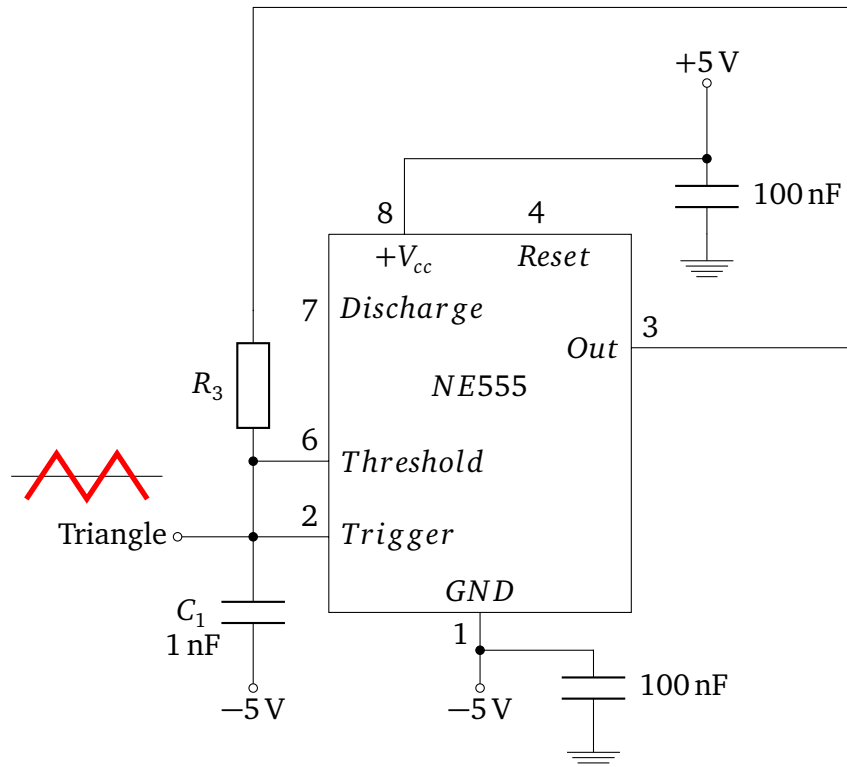
Conclusie 1

Tabel 2: Spanningsmetingen

Voltage (V)	Gemeten (V)	Afwijking (V)	Afwijking (%)
+5 V			
-5 V			
-18 V			
-25 V			

Driehoekgenerator

Het volgende onderdeel dat we gaan opbouwen is de driehoekgenerator. Hiervoor gebruiken we de IC NE555. De driehoekgenerator genereert een zaagtandspanning van ongeveer 200 kHz die gebruikt wordt bij de AD-conversie.



Schakeling 2: Driehoekgenerator

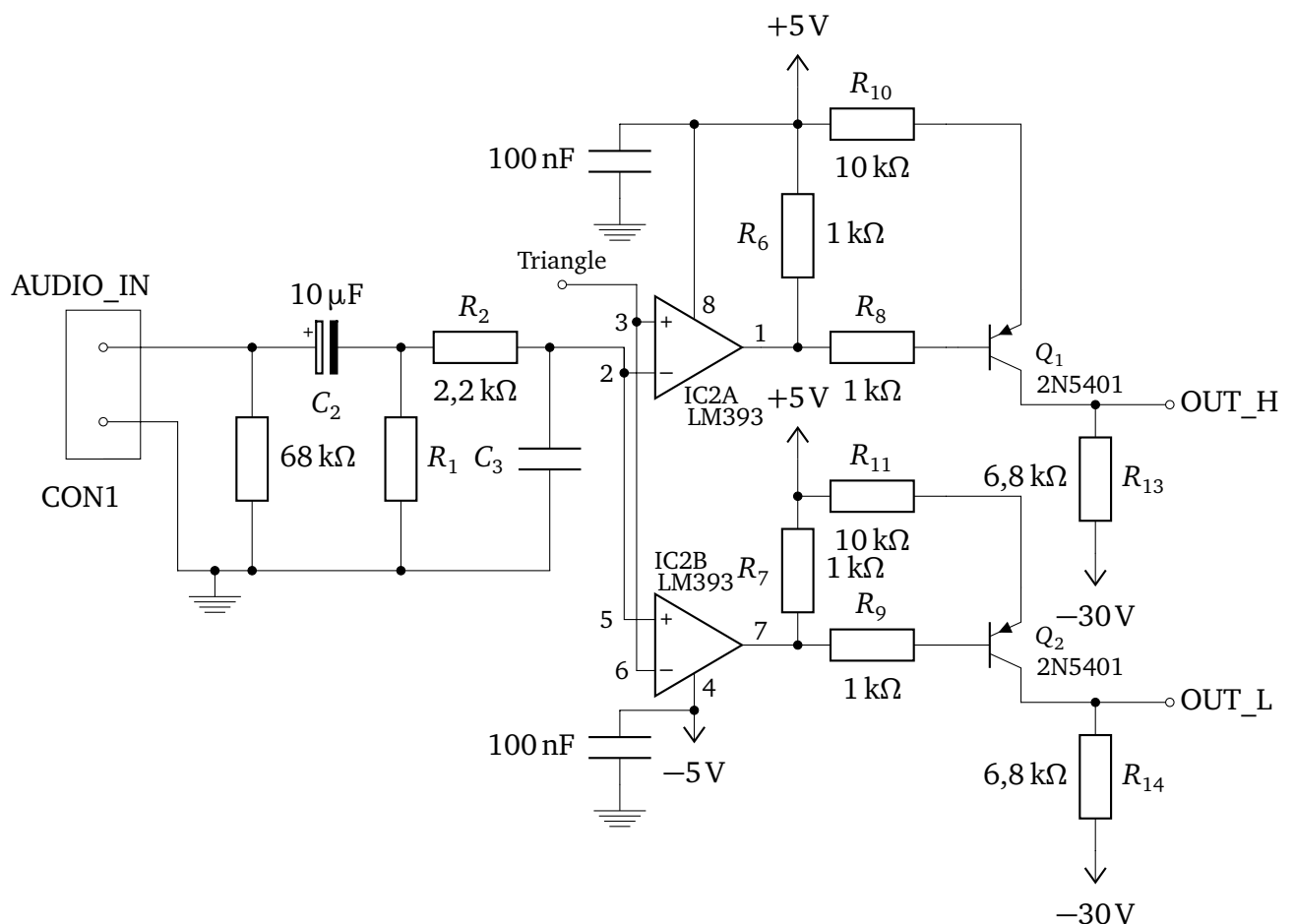
Opdracht 2: Bouwen van driehoekgenerator m.b.v. een NE555

- Simuleer schakeling 2 in LT-Spice en beantwoord hiermee de volgende vragen:
 - Tussen welke spanningswaarden varieert de opgewekte driehoekspanning? Verklaar dit.
 - Leg uit hoe deze schakeling werkt. Kijk vooral goed naar het interne schema uit de NE555 datasheet.
 - Bereken hoe groot de weerstand R_3 moet zijn om een frequentie van 200 kHz te krijgen voor de driehoekspanning.
- Bouw schakeling 2 nu op
- Verifieer de correcte werking van het geheel op de scope: als er oscillaties zichtbaar zijn in het driehoeksignaal, dan zijn de condensatoren van 100 nF niet dicht genoeg bij pin 1 en pin 8 geplaatst. Zorg ervoor dat de frequentie tussen 190 kHz en 210 kHz ligt. Pas eventueel de waarde van weerstand R_3 aan. Noteer de gemeten frequentie van het signaal.

Conclusie 2

Analoog naar digitaal omzetting

Het volgende onderdeel dat we gaan opbouwen omvat de feitelijke AD-conversie van het analoge audiosignaal naar twee digitale signalen, waarbij het ene digitale signaal de geïnverteerde is van het andere digitale signaal. We hebben twee digitale signalen nodig, omdat de power-amplifier twee mosfets bevat die aan- en uitgeschakeld moeten worden.



Schakeling 3: Schema van de AD-conversie

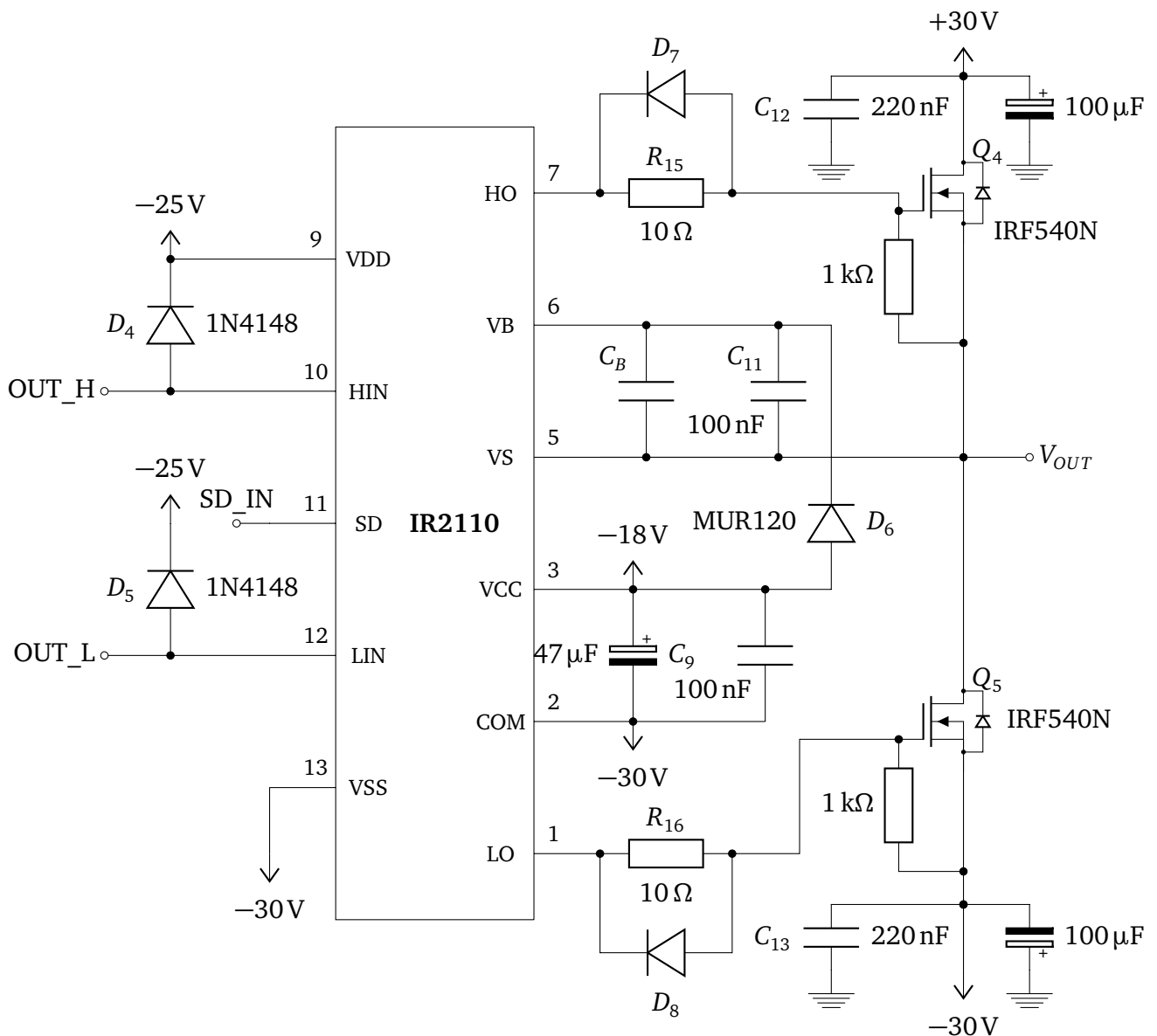
Opdracht 3: AD-Conversion

- a) De weerstanden R_1 en R_2 vormen samen met de condensatoren C_2 en C_3 een hoogdoorlaatfilter en een laagdoorlaatfilter. Voor het hoogdoorlaatfilter is een minimum frequentie gewenst van 0,5 Hz en voor het laagdoorlaatfilter is een maximum frequentie gewenst van 70 kHz. Bereken uit deze requirements de waarden van R_1 en C_3 .
- b) Verklaar waarom in deze schakeling juist een LM393 op-amp genomen is. Bekijk de datasheet van deze opamp om deze vraag te beantwoorden.
- c) Simuleer schakeling 3 in LT-Spice en gebruik de simulatie van de vorige opdracht om de driehoekspanning te genereren. Beantwoord hiermee de volgende vragen:
- Tot welke amplitude van het ingangssignaal werkt deze omzetter? Verklaar dit.
 - Laat zien hoe de uitgangsspanningen OUT_H en OUT_L er uit zien als functie van een sinusvormig ingangssignaal (binnen het audiodomein 20 Hz – 20 kHz). Maak hiervan een print en voeg die bij deze labopdracht toe.
 - Zoom in op de overgangen tussen OUT_H en OUT_L. Wat gebeurt er als we hiermee direct een power-amplifier gaan aansturen? Geef aan hoe we dit kunnen oplossen.
- d) Bouw schakeling 3 nu op en plaats de condensatoren van 100 nF zo dicht mogelijk bij pin 4 en pin 8. Verbind de driehoekgenerator uit de vorige opdracht met deze schakeling. Verifieer de correcte werking van het geheel door AUDIO_IN met GND te verbinden en de uitgangen OUT_H en OUT_L op de scope te plaatsen.

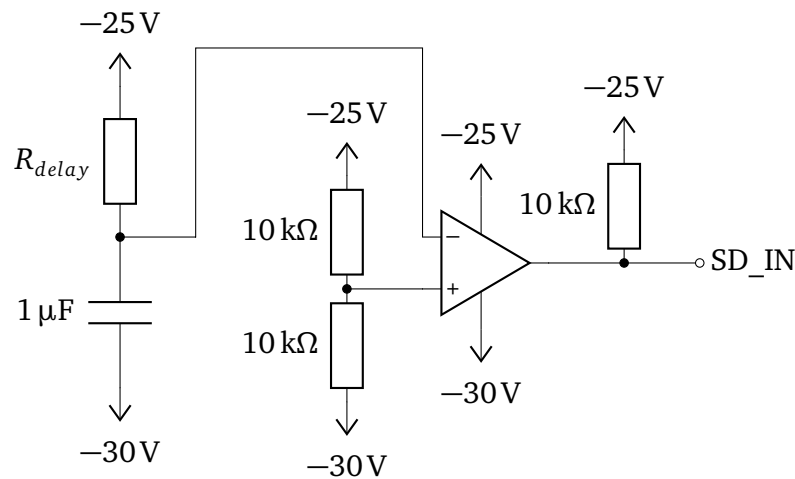
Conclusie 3

Gate-Driver

Om beide mosfets op een goede en snelle manier aan- en uit te zetten, is een gate-driver noodzakelijk. We gebruiken hiervoor een High and Low Side driver van International Rectifier, de IR2110. In schakeling 4 vind je het schema voor de gate-driver en in schakeling 5 vind je het schema voor de bijbehorende inschakelvertraging. Deze inschakelvertraging is noodzakelijk om de gate-driver gecontroleerd te laten opstarten. Integreer deze schakelingen met de al opgebouwde en geteste schakeling van opdracht 3. Met deze schakeling kunnen serieuze vermogens geleverd worden aan een luidspreker. Met +30 V en -30 V kun je ruim 100 W leveren aan een luidspreker van $4\ \Omega$ (en met een paar aanpassingen en + en -70 V kom je op ruim 300 W uit!). De beide mosfets moeten voor dit soort vermogens uiteraard wel op een koelblok gemonteerd worden. Bij opstarten is het van belang om dit gedefinieerd te laten verlopen. Als de shutdown (SD) ingang hoog is (-25 V), dan is de gate-driver niet actief. Als deze gelijk is aan -30 V, dan is de gate-driver actief. Dit wordt gerealiseerd door schakeling 5.



Schakeling 4: Schema van de Gate-Driver



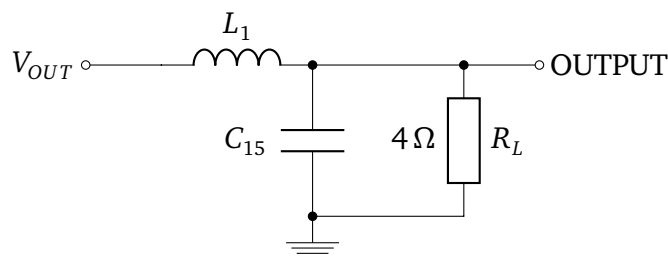
Schakeling 5: Schema van de inschakelvertraging

Opdracht 4: AD-Conversion

- Simuleer schakeling 4 met schakeling 5 in LT-SPICE. Zorg dat je een model hebt voor de IR2110 en dat de schakeling uit de vorige opdracht hier op aangesloten wordt. Sluit een weerstand van $1\text{ k}\Omega$ aan op V_{OUT} . Leg uit waarvoor de weerstanden R_{15} , R_{16} , D_7 en D_8 dienen en hoe ze werken.
- Bereken de waarde van de inschakelvertraging weerstand R_{delay} en van de bootstrap condensator C_B (zie slides van college). De opstartvertraging moet ongeveer 500 ms bedragen.
- Maak een screenshot van het uitgangssignaal en voeg dit toe aan deze labopdracht.
- Maak een FFT van het uitgangssignaal en verklaar de resultaten.
- Geef aan hoe je het uitgangssignaal kunt verbeteren en welke frequenties je specifiek zou willen verwijderen.
- Bouw schakeling 4 en schakeling 5 nu op en integreer de driehoekgenerator uit de vorige opdracht met deze schakeling. Verbind de ingang met GND en verwijder de beide mosfets alvorens er spanning op te zetten.
- Controleer als eerste of overal de juiste voedingsspanningen staan. Controleer vervolgens of op pin 10 en pin 12 goede blokspanningen staan. Als de gate-driver goed werkt, moeten nu ook op pin 7 en pin 1 goede blokspanningen staan.
- Zet de stroombegrenzing van beide voedingen op 0,2 A (belangrijk!) en sluit vervolgens een weerstand van $1\text{ k}\Omega$ / 2 W aan op V_{OUT} . Schakel nu de spanning in en let goed op de stroombegrenzing van de voeding. Als deze aan gaat, dan direct alles weer uitzetten! Controleer de opgebouwde schakeling met het schema van schakeling 4 en zoek de fout.

Conclusie 4**LC-Filter**

Zoals we in de vorige opdracht al gezien hebben, is een lowpass-filter noodzakelijk om de schakelfrequentie te verwijderen uit het uitgangssignaal. Hiervoor wordt een LC-filter gebruikt, zie schakeling 6.



Schakeling 6: Schema van het LC-filter

Opdracht 5: LC-Filter

- Leg uit waarom een RC-filter niet geschikt is om te filteren in deze situatie.
- Ga uit van schakeling 6 en bereken de waarden voor L_1 en C_{15} (zie slides van het college voor de theorie) indien het volgende gegeven wordt:
 - de cut-off frequency f_c is gelijk aan 22 kHz
 - de quality-factor Q_c moet gelijk zijn aan 1.3 (een piek van +3 dB)
 - ga bij deze berekening uit van een luidsprekerimpedantie (R_L) van 4Ω
- Simuleer het LC-filter met de gevonden waarden in LT-Spice en verifieer de correcte werking. Noteer de waarde van de gevonden cut-off frequency f_c .
- We gaan de filterspoel L_1 nu zelf maken. Je hebt hiervoor een T106-2 toroïde nodig. Deze heeft een kern van ijzerpoeder die minder snel de verzadiging ingaat. Gebruik de datasheet van de toroïde om in te schatten hoeveel windingen je nodig hebt. Voor de windingen gebruik je AWG-20 koperdraad.
- Meet met een meter de inductiviteit en corrigeer waar nodig.
- Bouw schakeling 6 nu op maak een bode-plot van dit filter. Bij welke frequentie is de versterking gelijk aan -3 dB?

Conclusie 5**Opdracht 6: Volledige klasse-D versterker**

- a) Integreer nu alle deelschakelingen met elkaar tot een werkende klasse-D amplifier, sluit een audiosignaal aan op de ingang en een luidspreker van 4Ω op de uitgang.
- b) Verifieer de correcte werking van de totale schakeling.

Conclusie 6

Controle: controleer of je overal alle gegevens goed opgeschreven hebt. Zijn alle grafieken en tabellen volledig ingevuld? Heb je alle simulaties opgeslagen en foto's/filmpjes gemaakt van alle opgebouwde schakelingen en uitgevoerde metingen? En heb je zinvolle conclusies opgeschreven en deze goed onderbouwd?