

Naam: Klas: Studentnummer:

Inleiding

Deze en volgende week gaan we een complete klasse-AB versterker bouwen. Veel audio-versterkers vallen in deze categorie: het compromisloze ontwerp van een pure klasse-A versterker zorgt voor veel warmte-ontwikkeling en een laag rendement. Bij een klasse AB versterker wordt het positieve en het negatieve deel door aparte transistoren versterkt. Dit wordt ook wel push-pull amplifier genoemd. In figuur 1 wordt het blokschema gegeven van een klasse-AB versterker. Deze gaan we stap voor stap opbouwen en hiervan een print maken. Uiteindelijk levert iedere student een werkende versterker op. De versterker kan maximaal 50 W leveren in $8\ \Omega$.

Leerdoelen

- Uit discrete componenten een klasse-AB versterker kunnen bouwen.
- De diverse deelsystemen voor een klasse-AB versterker kunnen dimensioneren
- Metingen kunnen verrichten aan een versterker op basis van een zelfgemaakte print.

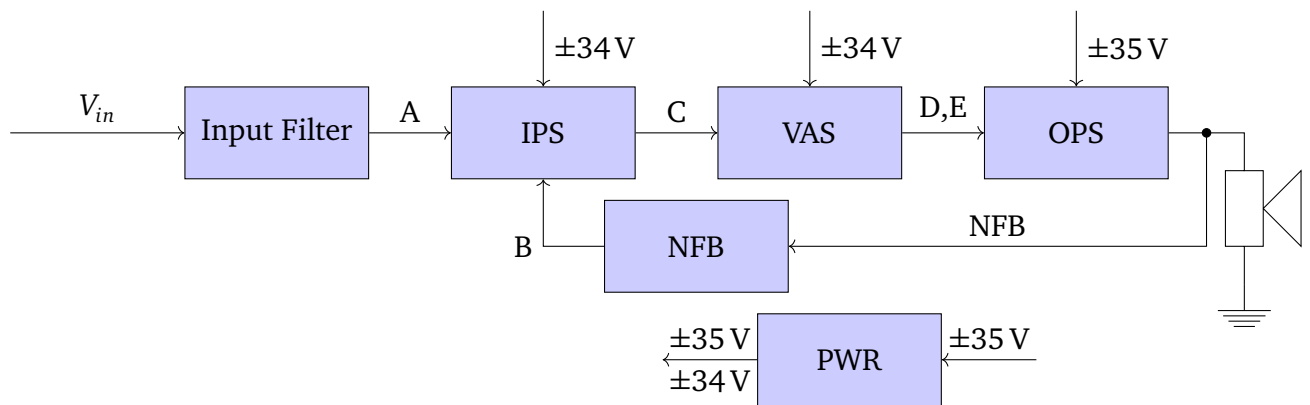
Vorbereiding op de les

LET OP: Dit is een grote opdracht, waar je veel voorbereidingstijd voor nodig hebt. Zonder voorbereiding heb je GEEN toegang tot het practicum. Bekijk ook de kennis-clips die specifiek voor dit lab gemaakt zijn.

LET OP: De opbouw van deze schakeling op een breadboard is kritisch! Gebruik zo kort mogelijke verbindingen. Knip draden van componenten af, zodat ze plat op het breadboard komen te liggen en gebruik niet meer dan 1 breadboard.

Tabel 1: Voorbereiding checklist

Opdracht nr.	Vorbereiding	Gedaan?
1 PWR	Berekening van R_{19} en R_{23}	
2 IFLTR	Berekening van C_{IN} en C_C + simulatie (frequentie-responsie)	
3 IPS	Berekening R_8 , R_{out} en A_{1s}	
4 VAS	Berekening R_{14} , R_{out} , R_{11} , P_1 , bepaal A_{CE} en A_{OL} uit simulaties	
5 OPS	Berekening van R_{20} , R_{21} , power-rating R_{29} en $R_{31} + L_1$ wikkelen	
6 NFB	Berekening van R_3 en C_{41} , uitleg + simulatie (frequentie-responsie)	
7 PCB	Maken PCB + opbouw op breadboard en print + werkend krijgen	



Figuur 1: Blokschema van een High-end klasse-AB versterker

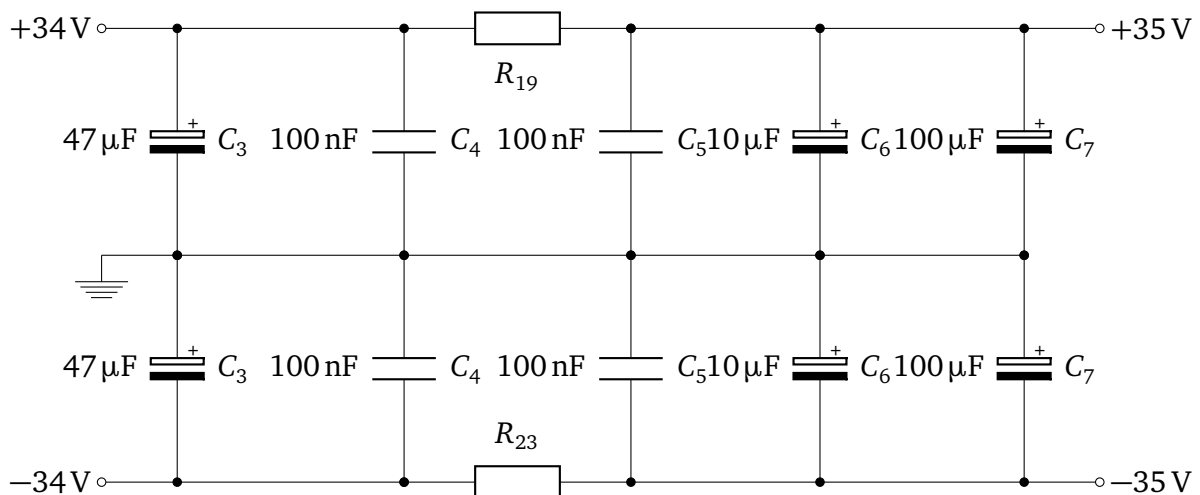
Tabel 2: Uitleg afkortingen

Term	Betekenis	Uitleg
Input Filter	Laag- en Hoog-doorlaatfilter	Passieve eerste-orde filters
IPS	Input Stage	Verschilversterker met stroombron en active-load
VAS	Voltage Amplifier Stage	Spanningsversterker en V_{be} multiplier
OPS	Output Stage	Stroomversterker, kortsluitbeveiliging en output-filter
NFB	Negative Feedback stage	instellen overall-gain, met laag- en hoogdoorlaatfilter
PWR	Voeding	$\pm 35\text{ V}$ voor OPS en $\pm 34\text{ V}$ voor IPS en VAS

Opdrachten

Power Supply

We beginnen met de opbouw van de power-supply voor de klasse-AB versterker. De voeding krijgt +35 V en −35 V binnen (gebruik hier een labvoeding voor), deze worden op de print ontkoppeld en vervolgens wordt hier +34 V en −34 V gemaakt voor de IPS en de VAS. Dit gebeurt door hier een RC-filter voor te gebruiken. Hierdoor krijgen zowel de input-stage als de voltage-amplifier stage een veel schonere voedingsspanning. De voeding voor de output-stage krijgt te maken met grote stromen, waardoor aanzienlijke ruis en rimpel ontstaat. Ook wordt dit RC-filter gebruikt om ongewenste terugkoppeling via de voedingslijnen te voorkomen. Deze ongewenste terugkoppeling via de voedingslijnen zou kunnen resulteren in instabiliteiten of zelfs oscillaties.



Schakeling 1: Voeding voor de klasse-AB versterker

Opdracht 1: Ontwerpen van een voeding voor de klasse-AB versterker

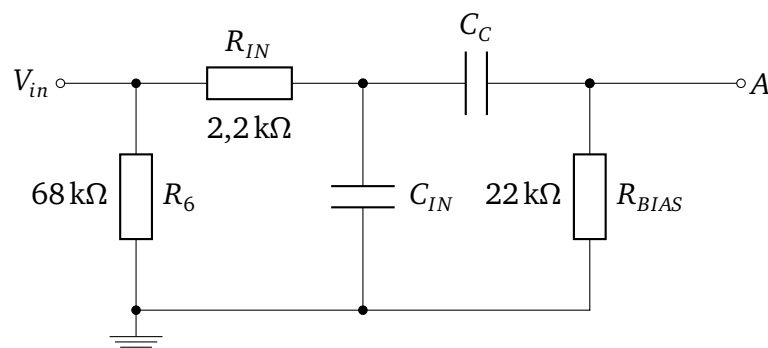
- Zoek op hoeveel stroom er maximaal door R_{19} gaat lopen en bereken de waarde van R_{19} , zodanig dat de maximale spanningsval over R_{19} net iets kleiner is dan 1 V.
- Bereken het vermogen dat R_{19} maximaal dissipeert en kies hiermee het gewenste vermogen van de weerstand.
- Herhaal dit voor R_{23} . Let op: de stroom kan anders zijn dan bij R_{19} !

Conclusie 1

Input-Netwerk

Het volgende onderdeel dat we gaan opbouwen is het input netwerk. Dit bestaat uit zowel een laagdoorlaatfilter als een hoogdoorlaatfilter. De voornaamste functie hiervan is het beperken van de bandbreedte van de versterker tot net iets minder dan de closed-loop bandbreedte van de complete versterker. Voor dit soort audio-versterkers zijn typische kantelfrequenties (-3 dB) gelijk aan 4 Hz en 70 kHz.

Weerstand R_6 wordt gebruikt om te voorkomen dat de ingangsspanning gaat zweven en dat er een DC-spanning op de ingang komt te staan. De koppelcondensator C_C blokkeert alle gelijkspanningen die nog aanwezig zouden kunnen zijn in het ingangssignaal. Weerstand R_{BIAS} zorgt voor een retourpad van een input bias stroom van de verschilversterker in de IPS. Voor een optimale werking van de verschilversterker moet de weerstand R_{BIAS} gelijk zijn aan de NFB weerstand (weerstand R_4 in het schema).



Schakeling 2: Input-netwerk

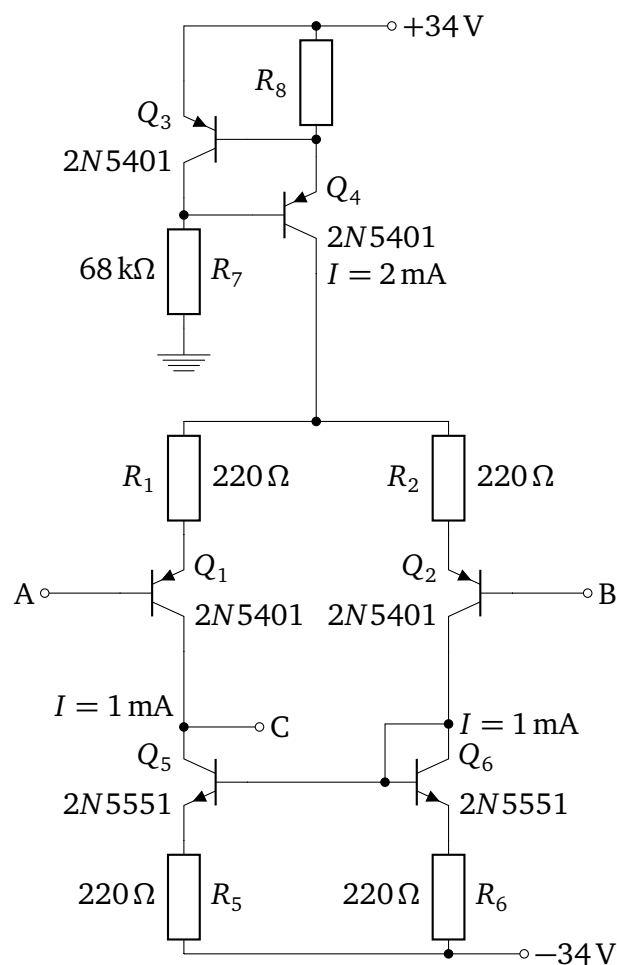
Opdracht 2: Ontwerpen van het input-netwerk

- Bereken de juiste waarden voor zowel C_{IN} als C_C , zodanig dat de kantelfrequenties gelijk worden aan (maximaal) 4 Hz en (minimaal) 70 kHz. Je mag het hoog- en laagdoorlaatfilter apart berekenen (een gecombineerd hoog- en laagdoorfilter (1 overdrachtsfunctie) levert vrijwel dezelfde waarden op).
- Simuleer het complete input-netwerk in LT-SPice en laat hiermee zien dat de frequentieresponsie voldoet aan de gestelde eisen. Zorg dat je deze grafiek kunt laten zien bij het assessment!

Conclusie 2

Input-Stage (IPS)

Het volgende onderdeel dat we gaan opbouwen omvat de de input-stage (IPS) van de versterker, zie schakeling 3. Een input-stage bestaat uit een differentiële versterker (ook wel verschilversterker genoemd), dit zijn de transistoren Q_1 en Q_2 . Om een hoge kwaliteit audioversterking te krijgen, wordt zo'n verschilversterker gevoed door een stroombron (het circuit rond Q_3 , Q_4 , R_7 en R_8) en worden de collectorweerstandenvanvangingen door zogenaamd active-load schakelingen (Q_5 , R_5 en Q_6 , R_6). Een active-load schakeling (in feite een current-mirror) heeft een hoge uitgangsimpedantie (die bepaald wordt door de Early Voltage en de collectorstroom), zodat de versterking van de verschilversterker zo groot mogelijk wordt. En dat is weer gunstig voor een lineair verloop van de frequentie karakteristiek bij terugkoppeling. Ook de toepassing van emitterweerstandenvanvangingen (met een waarde van ongeveer $9 \cdot r'_e$ met $r'_e = r_\pi / \beta$) draagt bij aan dit lineaire verloop.



Schakeling 3: Schema van de Input-Stage (IPS)

Opdracht 3: Input-Stage (IPS)

- De transistoren Q_3 en Q_4 vormen samen met de weerstanden R_7 en R_8 een stroombron. Deze stroombron moet ingesteld worden op een stroom van 2mA. Bereken uit deze requirement de juiste waarde van R_8 .

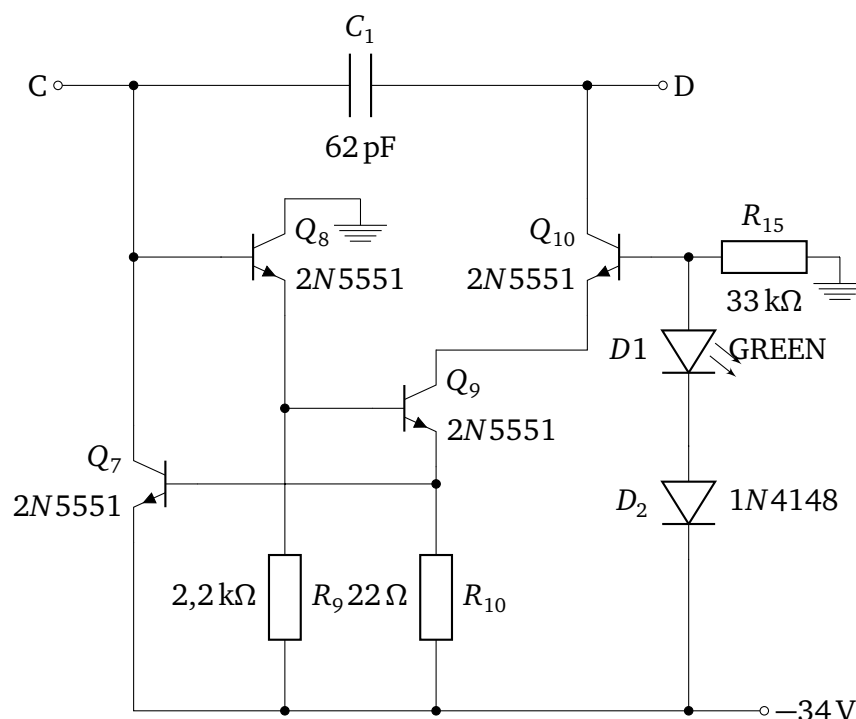
- b) Simuleer deze schakeling in LT-Spice en verifieer dat er inderdaad een stroom van 2 mA geleverd wordt door de stroombron.
- c) Simuleer schakeling 3 in LT-Spice, sluit de B-ingang aan op GND en sluit op de A-ingang een sinus aan van 1 kHz. Hoe groot is nu de AC-spanningsversterking?
- d) Zoek in LT-Spice de parameters op van de gebruikte transistor. We zijn met name geïnteresseerd in de Early voltage V_A (LT-Spice parameter Vaf) en de β (LT-Spice parameter Bf). Bereken hier de waarde van de uitgangsimpedantie van de active-load ($R_{out} = \frac{V_A}{I_C}$). Deze uitgangsimpedantie vormt de collectorweerstand voor Q_1 en deze kunnen we nu gebruiken om de wisselspanningsversterking uit te rekenen.
- e) Bereken nu deze single-ended wisselspanningsversterking voor transistor Q_1 ($A_{1s} = -\frac{\beta R_C}{2r_\pi}$, met $r_\pi \approx \frac{1}{40I_b} = \frac{\beta}{40I_c}$). Komt deze waarde ongeveer overeen met de waarde die je hiervoor al bij de simulatie gevonden hebt?
- f) Bouw deze schakeling nu op een bread-board op. Werk met zo kort mogelijke draden. Sluit de B-ingang aan op GND en de A-ingang aan op de functiegenerator. Zorg ervoor dat de weerstanden R_1 tot en met R_4 zo goed mogelijk gelijk zijn aan elkaar. Als je de mogelijkheid hebt om transistoren te meten, kies dan voor Q_1 en Q_2 en voor Q_5 en Q_6 vrijwel dezelfde transistoren (met gelijke β en gelijke V_{be} spanningen). Besef dat een onbalans van 1 mV door de grote open-loop gain van deze versterker al snel kan leiden tot een groot DC-spanningsverschil op de uitgang. Netjes en symmetrisch opbouwen van deze schakeling is dus van belang! Je kunt ook een kleine DC-offset op de functiegenerator toevoegen om alsnog een acceptabel uitgangssignaal te krijgen.

Conclusie 3

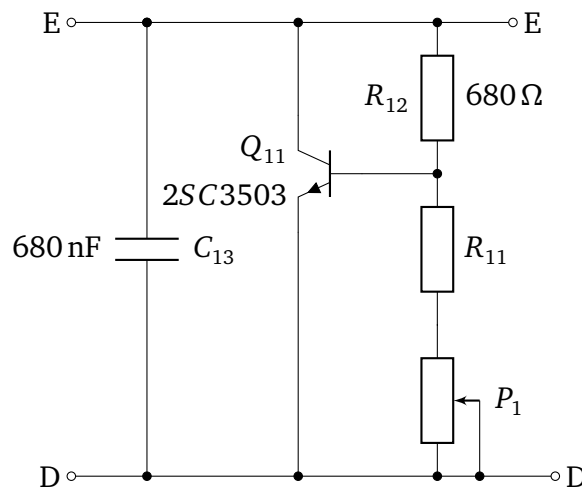
Voltage-Amplifier Stage (VAS)

Het signaal uit de Input-Stage moet geschikt gemaakt worden voor de output-stage. Deze voltage-amplifier stage bestaat uit de volgende deelschakelingen:

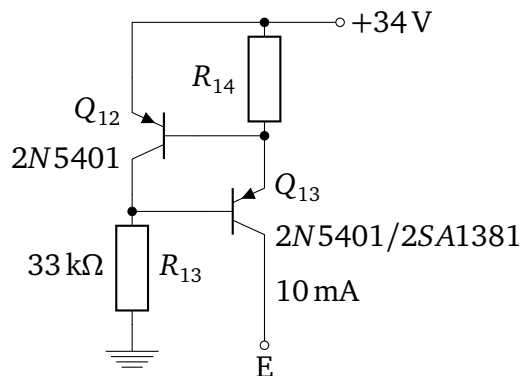
1. schakeling 4: een **common-emitterschakeling** rond Q_9 , met een emitterweerstand R_{10} en een collectorweerstand die vervangen is door een stroombron met een hoge uitgangsimpedantie en die aangesloten wordt op punt D. De versterking van zo'n common-emitterschakeling is gelijk aan: $A = -\frac{\beta \cdot R_C}{r_{\pi} + (\beta + 1)R_E} = -\frac{R_C}{\frac{r_{\pi}}{\beta} + (\frac{\beta + 1}{\beta})R_E} \approx -\frac{R_C}{R_E}$. Aan deze common-emitterschakeling is een transistor Q_8 toegevoegd, die ervoor zorgt dat ze samen als een Darlington transistor gaan werken. Verder is Q_7 toegevoegd, die als kortsluitbeveiliging dient voor Q_9 . Als laatste is Q_{10} nog toegevoegd, die nu samen met Q_9 een cascodeschakeling vormt. De basis van Q_{10} wordt met behulp van D1 en D2 op een vaste spanning gehouden van ongeveer 2,5 V boven de negatieve voedingsspanning. Door het toevoegen van Q_{10} wordt de uitgangsimpedantie van de VAS erg groot. Dit heeft weer een positief effect op zaken als niet-lineariteit en vervorming.
2. schakeling 5: een V_{BE} **multiplier**. Omdat de output-stage een push-pull amplifier bevat, is het van belang om de bovenste transistor en de onderste transistor een DC-spanningsverschil te geven, om crossover-vervorming te verminderen. Deze V_{BE} multiplier wordt met behulp van instelpotmeter P_1 op de juiste ruststroom van rond de 100 mA ingesteld.
3. schakeling 6: een **stroombron** die de stroom levert voor de VAS en tegelijkertijd de collectorweerstand van de common-emitterschakeling bepaalt. Hierdoor wordt de collectorweerstand van de common-emitterschakeling erg groot, terwijl er toch een normale collectorstroom kan blijven lopen.



Schakeling 4: Schema van de VAS: common-emitter deelschakeling



Schakeling 5: Schema van de VAS: V_{BE} -multiplier deelschakeling



Schakeling 6: Schema van de VAS: Stroombron deelschakeling

Opdracht 4: Voltage-Amplifier Stage (VAS)

- Begin met schakeling 6. Deze stroombron moet ingesteld worden op een stroom van 10 mA. Bereken uit deze requirement de juiste waarde van R_{14} .
- Simuleer deze schakeling in LT-Spice en verifieer dat er inderdaad een stroom van 10 mA geleverd wordt door de stroombron.
- Bepaal nu m.b.v. deze simulatie de uitgangsimpedantie van deze stroombron. Doe dit als volgt: sluit op punt E een spanningsbron aan met respectievelijk +15 V en -35 V en meet bij deze spanningen de collectorstroom (zet in LT-Spice de cursor op de collector van de transistor, zodat er een stroomtang verschijnt. Onder in beeld kun je dan de stroom aflezen). Bepaal m.b.v. de formule $R_o = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ de uitgangsimpedantie R_o van deze stroombron. Deze uitgangsimpedantie vormt weer de collectorweerstand voor schakeling 4 en met deze waarde kunnen we dan de versterking voor wisselspanning berekenen.
- Ga nu verder met schakeling 5. De in te stellen spanning tussen de punten D en E moet liggen tussen $3 \cdot V_{BE}$ en $5.5 \cdot V_{BE}$. Bij $3 \cdot V_{BE}$ staan de eindtransistoren compleet uit en bij $5.5 \cdot V_{BE}$ gaat er al flink wat stroom lopen. Bepaal hieruit de juiste waarden voor R_{11} en P_1 . Controleer in LT-Spice dat deze minimum- en

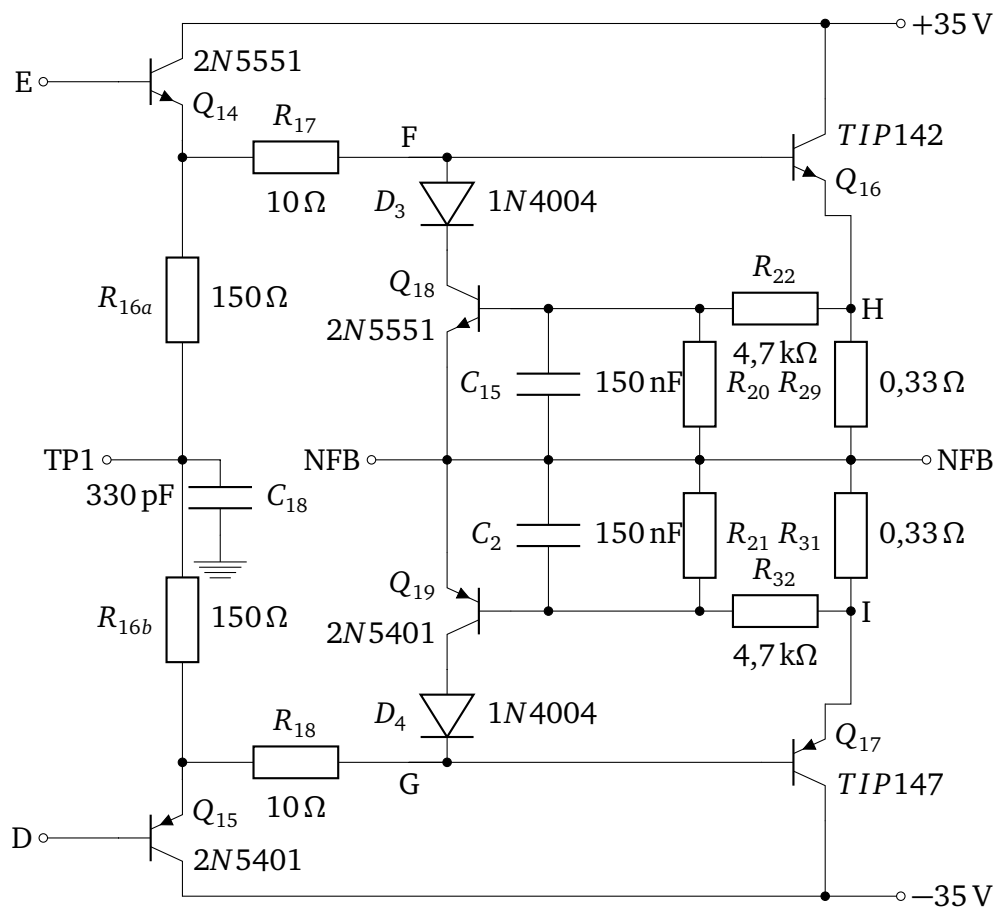
maximumspanning inderdaad met behulp van de potmeter P_1 ingesteld kan worden.

- e) Bouw nu de drie deelschakelingen op in LT-Spice en verbind ze met elkaar.
- f) Bereken de spanningsversterking van deze common-emitterschakeling. Je kunt hierbij gebruik maken van de in deze paragraaf gegeven formules. Door de active-load is de collectorweerstand erg groot geworden en dus wordt deze spanningsversterking ook groot.
- g) Sluit in LT-Spice nu de IPS schakeling en deze VAS deelschakelingen op elkaar aan. Gebruik verder van schakeling 7 (OPS, volgende paragraaf) alleen het deel met Q_{14} , Q_{15} , R_{16a} en R_{16b} . Sluit TP1 aan op ingang B van de IPS. Hiermee bouw je in feite een complete versterker op, met terugkoppeling, maar nog zonder de OPS (iets wat je dadelijk bij de echte opbouw ook zult doen). Het meten van de versterking van de VAS is het beste te doen door de totale versterkerschakeling in LT-Spice te simuleren. Sluit hiervoor een sinus van 1 kHz met een amplitude van 1 V aan op ingang A van de totale versterker en bekijk zowel het ingangssignaal van de VAS (punt C) als de uitgangssignalen van de VAS (punt D en punt E). Hoe groot is nu de AC-spanningsversterking van de VAS? Komt de waarde hiervan overeen met de berekende waarde? Als er verschillen zijn, waar zou dit dan door kunnen komen?
- h) Hoe groot is nu de totale open-loop spanningsversterking als de IPS en de VAS op elkaar aangesloten zouden worden? Wat is de waarde hiervan in dB?
- i) Bouw nu ook deze schakeling op een bread-board op. Gebruik wederom korte draden en bouw het geheel symmetrisch op. Zorg voor een duidelijke scheiding tussen IPS en VAS, zodat je makkelijk kunt foutzoeken. Begin weer met een controle van de stroombronnen en overtuig je ervan dat alle transistoren correct zijn aangesloten. Sluit ook hier weer TP1 aan op ingang B van de IPS. Controleer nu de open-loop gain van de VAS en controleer als laatste de closed-loop gain van de totale opgebouwde schakeling. Kun je deze closed-loop gain verklaren?

Conclusie 4

Output-Stage OPS

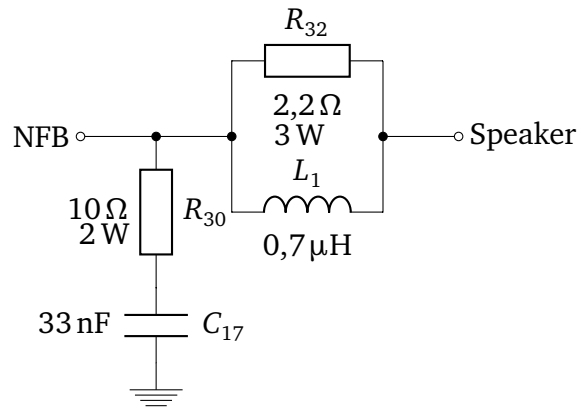
De output-stage bestaat uit vermogenstransistoren die als emittervolger gebruikt worden. Er is een vermogenstransistor voor de positieve spanningen en een vermogenstransistor voor de negatieve spanningen. Om het schakelen tussen de positieve en negatieve spanningen zonder crossover vervorming te laten plaatsvinden, wordt de V_{BE} multiplier gebruikt. Dat gaan we hier nog niet instellen, wat we hier wel gaan instellen zijn een tweetal beveiligingscircuits, die noodzakelijk zijn om de transistoren en de luidspreker heel te houden: dat zijn de kortsluitbeveiliging (het circuit rond Q_{18} en het circuit rond Q_{19}) en het output-filter, zie schakeling 7.



Schakeling 7: Output-stage

Opdracht 5: Output-Stage OPS

- Er zijn twee kortsluitbeveiligingen aanwezig, eentje voor iedere power-transistor, zie schakeling 7. Ga voor het nominale vermogen van deze versterker uit van 50 W RMS in 8 Ω. Een goede beveiligingswaarde is dan 100 W RMS, met andere woorden: we willen dat de kortsluitbeveiliging ingrijpt bij een continu vermogen van 100 W. Bereken de hierbij behorende piekwaarde van de stroom die dan door R_{29} loopt. Vergelijk deze waarde met de waarde uit de Safe Operating Area grafiek in de datasheet van de vermogenstransistoren en bepaal hiermee een realistische maximumwaarde voor de toegestane piekstroom (stel de beveiliging

**Schakeling 8:** Output-stage

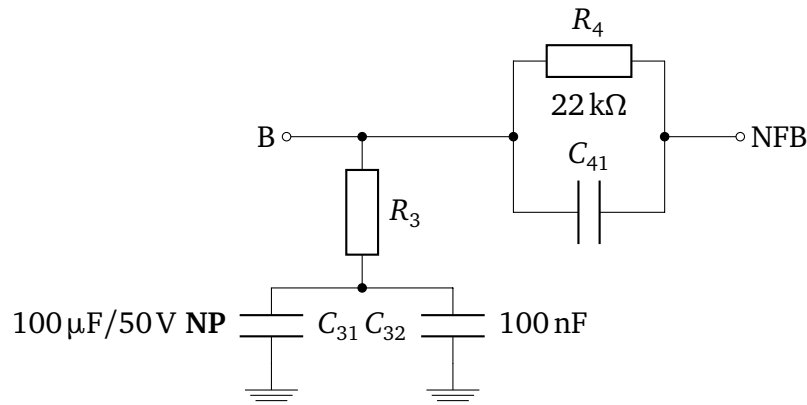
altijd iets lager in dan deze maximumwaarde). Bereken R_{20} nu zodanig dat de kortsluitbeveiliging in gaat grijpen bij de door jouw gekozen beveiligingswaarde voor de piekstroom. Wat wordt hiermee het nominale audiovermogen dat je uit een luidspreker van 8Ω kunt krijgen?

- Doe hetzelfde voor Q_{19} met R_{21} .
- Simuleer deze schakeling en laat zien dat de kortsluitbeveiliging inderdaad actief wordt bij deze beveiligingswaarden.
- Bereken het vermogen dat de weerstanden R_{29} en R_{31} gaan dissiperen bij een vermogen van 50 W RMS. Kies weerstanden die een vermogen van minimaal het dubbele hiervan aankunnen.
- Het output-netwerk (zie schakeling 8) hoeft niet berekend te worden, maar moet je kunnen uitleggen bij een assessment. R_{30} vormt samen met C_{17} een zogeheten Boucherot of Zobel netwerk. Zoek op waar dit voor dient en maak hier notities van.
- Als laatste componenten zien we spoel L_1 en weerstand R_{32} . De spoel voorkomt problemen bij capacatieve belastingen (bijvoorbeeld bij elektrostatische luidsprekers), terwijl parallelweerstand R_{32} er weer voor zorgt dat de overdracht van bloksignalen door L_1 niet nadelig wordt beïnvloed. De weerstand mag geen draadgewonden type zijn, maar is bij voorkeur een Metal-Oxide-Film (MOF) type. De spoel L_1 moet zelf gemaakt worden en dat doe je als volgt: wikkel ongeveer 15 windingen van 1-mm lakdraad over de weerstand R_{29} . Meet na afloop de inductiviteit met een LCR-meter en pas het aantal windingen eventueel aan.

Conclusie 5

Negative Feedback (NFB)

Het uitgangssignaal wat naar de luidspreker gaat, wordt ook teruggekoppeld naar de Input-Stage (IPS). Dit teruggekoppelde signaal willen we ook weer begrenzen qua bandbreedte, hetgeen gebeurt met behulp van schakeling 9.



Schakeling 9: Negative-feedback

Opdracht 6: Negative Feedback (NFB)

- De mate van terugkoppeling wordt bepaald door de weerstanden R_3 en R_4 . Bepaal deze waarden zodanig dat de terugkoppelfactor β gelijk wordt aan 0.0435. Hoe groot wordt nu de totale closed-loop gain van de versterker? Hoeveel dB is dit?
- Met behulp van R_4 en C_{41} wordt de bandbreedte aan de bovenkant begrensd. Leg uit hoe C_{41} ervoor kan zorgen dat de closed-loop gain kleiner wordt als de frequentie groter wordt.
- Bereken nu de waarde van C_{41} zodanig, dat het -3 dB punt rond de 150 kHz komt te liggen.
- De onderkant van de bandbreedte voor terugkoppeling wordt begrensd door R_3 , C_{31} en C_{32} . Leg uit hoe deze componenten ervoor zorgen dat de closed-loop gain kleiner wordt als de frequentie lager wordt.
- Bereken nu de waarde van R_3 zodanig, dat het -3 dB punt rond de 1,5 Hz komt te liggen.
- Simuleer de schakeling in LT-Spice en verifieer de frequentieresponsie van dit NFB netwerk (de ingang is NFB, de uitgang is dan B). Zorg ervoor dat je deze frequentieresponsie ook weer kunt laten zien bij het assessment.

Conclusie 6

Totale klasse AB versterker

Opdracht 7: Simulatie + Breadboard

- a) Integreer in LT-Spice nu alle deelschakelingen met elkaar tot een simulatie van de complete versterker. Zet een sinus van 1 kHz met een amplitude van 1 V op de ingang van de versterker. Controleer dat er een sinus aanwezig is op de uitgang van de versterker met een amplitude van ongeveer 23 V. Bepaal nu de kantelpunten (-3 dB punten) van deze versterker.
- b) Maak van dit LT-Spice schema een schema in bijvoorbeeld KiCAD en zorg dat de Electrical Rule-Check (ERC) geen foutmeldingen meer oplevert. Dit schema gaat vanaf nu je 'reference-design' worden, zorg dus voor goed versiebeheer (bijv. door de schakeling in Github op te nemen).
- c) Als de totale schakeling goed werkt in LT-Spice, bouw deze dan op een breadboard op. Gebruik van schakeling 7 (de OPS) alleen het deel met Q_{14} , Q_{15} , R_{16a} en R_{16b} . Sluit TP1 aan op ingang B van de IPS. Hiermee bouw je in feite een complete versterker op, met terugkoppeling, maar nog zonder de OPS.
- d) Controleer als eerste of de voedingsspanningen overal aanwezig zijn. Controleer vervolgens of de stroombronnen de juiste stromen geven. Controleer hierna de werking van de V_{be} multiplier. Tussen welke spanningswaarden kun je V_{DE} (de spanning tussen knooppunt D en E) regelen met potmeter P1?
- e) Meet ook hier weer de totale versterking van de schakeling en zorg voor bijvoorbeeld scoopplaatjes die je bij het assessment kunt laten zien (incl. foto's van de opbouw van de schakeling op een breadboard).
- f) Bouw nu ook schakeling 7 (de OPS) erbij op, maar zonder (!) de eindtransistoren Q_{16} en Q_{17} . Test de werking van de kortsluitbeveiliging door een DC-spanning aan te bieden op de punten H en I. Bij welke spanningswaarde gaat Q_{18} (en Q_{19}) in geleiding? Komt dit overeen met je berekeningen?

Opdracht 8: PCB + opbouw

- a) Maak nu op basis van het schema een print (PCB) die aan de richtlijnen voldoet, zoals beschreven in 'Handleiding PCB Design'.
- b) Let bij het maken van deze print specifiek op het volgende:
 - a) Een aantal transistoren moeten fysiek tegen elkaar aan geplaatst worden (back-to-back), zodat ze zo goed mogelijk dezelfde temperatuur hebben en dus dezelfde stroom gaan voeren. Dit geldt voor Q_1 en Q_2 en voor Q_5 en Q_6 .
 - b) Zorg voor goede meetpunten voor punten H en I, zodat de ruststroom goed ingesteld kan worden.
 - c) Ook de punten D, E, TP1, en NFB moeten makkelijk te bereiken zijn.

- d) De transistoren Q_{11} , Q_{16} en Q_{17} moeten bij elkaar op 1 koelplaat komen, waarbij Q_{11} tussen de beide andere transistoren in geplaatst moet worden. De afstand tussen Q_{11} en een vermogenstransistor bedraagt 0.6 inch hart op hart.
- e) Zorg dat spoel L_1 ook aansluitpunten heeft, deze wordt over R_{29} heen gewikkeld.
- f) Plaats R_{30} en C_{17} zo dicht mogelijk bij R_{29} en R_{31} .
- c) Verstuur de Gerber-files naar een PCB-fabrikant (bijv. jlcpcb of Eurocircuits) en laat een print hiervan fabriceren.
- d) Bouw de print op tot een werkende versterker. Monteer in eerste instantie nog niet de weerstanden R_{17} en R_{18} en verbind TP1 met NFB.
- e) Controleer als eerste of de voedingsspanningen overal aanwezig zijn. Controleer vervolgens of de stroombronnen de juiste stromen geven. Controleer hierna de werking van de V_{be} multiplier. Tussen welke spanningswaarden kun je V_{DE} (de spanning tussen knooppunt D en E) regelen met potmeter P1? Draai de potmeter nu naar de minimumstand toe (V_{DE} is zo klein mogelijk).
- f) Monteer nu de eindtransistoren samen met Q_{11} op een koelblok (belangrijk!) en verwijder de TP1 - NFB aansluiting weer. Monteer nu ook de weerstanden R_{17} en R_{18} . Zet de stroombegrenzing van de voeding op ongeveer 500 mA en sluit de ingang van de versterker aan op GND. Meet met een multimeter op DC-bereik de spanning over de punten H en I, dus over R_{29} en R_{31} (dit is het meest nauwkeurig). Draai nu langzaam potmeter P_1 omhoog (VOORZICHTIG! LANGZAAM!) totdat de ruststroom door Q_{16} en Q_{17} ongeveer 100 mA bedraagt (**Bereken van te voren hoeveel mV dat is op de multimeter**). Controleer de ruststroom na 10 minuten nog een keer als alle transistoren warm geworden zijn.
- g) "Everything louder than everything else": Luister naar je favoriete Metallica of Slayer nummer op vol vermogen en kijk of de transistoren niet te warm worden. Zolang je je hand op het koelblok kunt houden, is het goed.

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?